

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ
CATEDRA DE ELECTROENERGETICĂ

622.710
366 D

**OPTIMIZAREA FUNCȚIONĂRII REȚELELOR ELECTRICE
DE DISTRIBUȚIE**

teză de doctorat

Conducător științific

Prof. dr. ing. Viorel Negru

Autor
ing. Adrian Pană

1998

622.710
366 D

Cuprins

Capitolul 1. Criterii și acțiuni pentru optimizarea funcționării rețelelor electrice de distribuție. Obiectul lucrării de doctorat.

1.1. Punerea problemei.....	1-1
1.1.1. Reducerea consumului propriu tehnologic și a pierderilor în rețelele electrice de distribuție.....	1-2
1.1.2. Creșterea gradului de continuitate în alimentarea consumatorilor.....	1-3
1.1.3. Diminuarea gradului de poluare a tensiunii.....	1-4
1.2. Obiectul lucrării de doctorat.....	1-5

Capitolul 2. Regimurile nesinusoidale și nesimetrice ale rețelelor electrice.

2.1. Introducere.....	2-1
2.2. Regimul permanent nesinusoidal (deformant).....	2-1
2.2.1. Originea perturbațiilor armonice.....	2-1
2.2.2. Mărimi caracteristice.....	2-5
2.2.2.1. Mărimi caracteristice ale curbelor periodice nesinusoidale.....	2-5
2.2.2.2. Indicatori ai nivelului fenomenelor deformante în rețelele electrice.....	2-8
2.2.2.3. Puteri și energii în rețelele electrice poluate armonic.....	2-10
2.2.3. Condiții de determinare a mărimilor caracteristice.....	2-13
2.2.4. Efectele poluării armonice. Niveluri admisibile.....	2-14
2.2.5. Măsuri pentru prevenirea și limitarea regimului deformant.....	2-17
2.3. Regimul permanent dezechilibrat.....	2-22
2.3.1. Originea dezechilibrelor.....	2-22
2.3.2. Mărimi caracteristice.....	2-22
2.3.3. Condiții de determinare a mărimilor caracteristice.....	2-26
2.3.4. Efectele dezechilibrelor. Niveluri admisibile.....	2-27
2.3.5. Măsuri pentru prevenirea și limitarea regimului dezechilibrat.....	2-28
2.4. Sistem de achiziție și prelucrare a datelor pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale rețelelor electrice.....	2-32
2.4.1. Metode și mijloace pentru determinarea mărimilor caracteristice regimurilor deformante și dezechilibrate.....	2-32
2.4.2. Structura principală.....	2-33
2.4.3. Descrierea elementelor componente.....	2-33
2.4.4. Modul de lucru.....	2-38
2.5. Determinări experimentale.....	2-39

Capitolul 3. Elemente de calcul pentru echilibrarea rețelelor electrice de distribuție cu trei conductoare, prin compensarea transversală a sarcinilor dezechilibrate

3.1. Introducere.....	3-1
3.2. Stabilirea elementelor schemei de compensare.....	3-2
3.3. Criteriul a. Compensarea totală a puterii reactive ($\cos \varphi_d = 1$).....	3-5
3.3.1. Stabilirea valorilor elementelor schemei de compensare.....	3-5
3.3.2. Semnificația fizică a relațiilor pentru calculul susceptanțelor de compensare.....	3-8
3.3.3. Elementele schemei de compensare exprimate cu ajutorul componentelor de secvență ale curenților de sarcină.....	3-11
3.3.4. Curenții de compensare exprimați în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină.....	3-15
3.3.5. Circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată cu ajutorul componentelor simetrice.....	3-15
3.3.6. Curenții și elementele schemei de compensare exprimate cu ajutorul curenților de sarcină.....	3-19
3.3.7. Circulația de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată în componente de fază.....	3-20
3.4. Criteriul b. Compensarea puterii reactive până la un factor de putere impus.....	3-25
3.5. Criteriul c. Reglarea tensiunii pe barele consumatorului.....	3-27
3.5.1. Punerea problemei.....	3-27

3.5.2. Suseptanțele de compensare în funcție de suseptanțele sarcinii.....	3-28
3.5.3. Suseptanțele de compensare în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină.....	3-30
3.5.4. Curenții de compensare în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină.....	3-30
3.5.5. Curenții de compensare în funcție de componentele active și reactive ale curenților de sarcină.....	3-31
3.6. Criteriul d. Minimizarea puterii reactive instalate în compensator.....	3-31
3.7. Criteriul e. Minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare.....	3-33
3.8. Aplicație numerică.....	3-34

Capitolul 4. Elemente de calcul pentru echilibrarea rețelelor electrice de distribuție cu patru conductoare, prin compensarea transversală a sarcinilor dezechilibrate

4.1. Considerații generale.....	4-1
4.2. Criteriul a. Îmbunătățirea factorului de putere fără a lua în considerare regimul dezechilibrat.....	4-4
4.2.1. Criteriul a1 - Îmbunătățirea factorului de putere în rețeaua de alimentare prin compensarea până la anulare a componentei reactive a curentului de secvență directă, folosind o compensare simetrică.....	4-4
4.2.2. Criteriul a2 - Minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare.....	4-4
4.3. Criteriul b. Echilibrarea sarcinii pe cele trei faze ale rețelei fără a se urmări în mod special îmbunătățirea factorului de putere.....	4-6
4.4. Criteriul c. Îmbunătățirea factorului de putere și micșorarea nesimetriei.....	4-8
4.4.1. Criteriul c1 Minimizarea nesimetriei sarcinii prin anularea prin compensare a curentului de secvență homopolară și creșterea factorului de putere prin compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă.....	4-8
4.4.2. Criteriul c2. Micșorarea nesimetriei sarcinii prin anularea prin compensare a curentului de secvență inversă și creșterea factorului de putere prin compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă.....	4-9
4.4.3. Criteriul c3. Simetrizarea totală și maximizarea factorului de putere.....	4-9
4.4.3.1. Criteriul c3-1. Intervenția compensatorului Δ numai în circulația curenților de secvență inversă.....	4-10
4.4.3.2. Criteriul c3-2. Minimizarea pierderilor de putere activă în compensatoare..	4-10
4.4.3.3. Criteriul c3-3. Minimizarea puterii reactive instalate pentru compensare.....	4-12
4.4.4. Criteriul c4. Simetrizarea sarcinii și compensarea puterii reactive până la un factor de putere impus.....	4-13
4.5. Criteriul d. Minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare.....	4-13
4.6. Suseptanțele de compensare exprimate în funcție de componentele curenților de fază, respectiv de admitanțele echivalente ale sarcinii.....	4-15
4.7. Circulația de curenți și puteri în ansamblul consumator compensator, în componente de fază.....	4-16
4.8. Curenții de compensare exprimați cu ajutorul componentelor curenților de secvență ai sarcinii.....	4-21
4.9. Circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator calculată cu ajutorul componentelor simetrice.....	4-22
4.10. Suseptanțele de compensare exprimate în funcție de componentele de secvență ale curenților de sarcină.....	4-25
4.11. Mecanismul compensării.....	4-26
4.12. Aplicație numerică.....	4-28

Capitolul 5. Determinări experimentale

5.1. Introducere.....	5-1
5.2. Experimentul nr.1 : Compensarea într-o rețea trifazată cu trei conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură pur rezistivă, folosind un compensator cu susceptanțe fixe.....	5-2
5.3. Experimentul nr. 2 : Compensarea într-o rețea trifazată cu trei conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură pur rezistivă, folosind un compensator cu susceptanțe variabile.....	5-10

5.4. Experimentul nr. 3 : Compensarea într-o rețea trifazată cu trei conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură mixtă R-L, folosind un compensator cu susceptanțe variabile.....	5-12
5.5. Experimentul nr. 4 : Compensarea într-o rețea trifazată cu patru conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură mixtă R-L, folosind un compensator cu susceptanțe variabile.....	5-16
5.6. Observații și comentarii asupra rezultatelor experimentelor.....	5-21

Capitolul 6. Compensarea puterii reactive în rețelele de distribuție ce funcționează în regimuri nesimetrice și nesinusoidale

6.1. Aspecte generale.....	6-1
6.2. Interdependența acțiunilor ce urmăresc îmbunătățirea factorului de putere, echilibrarea sarcinii respectiv filtrarea curenților armonici.....	6-2
6.2.1. Definierea unui factor de putere în regim nesimetric și nesinusoidal.....	6-3
6.2.1.1. Elemente introductive.....	6-3
6.2.1.2. Criterii pentru definierea unui factor de putere.....	6-4
6.2.1.3. Definierea unui factor de putere în rețelele electrice trifazate funcționând în regim nesimetric și nesinusoidal.....	6-5
6.2.2. Elemente de calcul.....	6-7
6.2.2.1. Cazul 1. Nu se intervine pentru ameliorarea regimului de funcționare....	6-8
6.2.2.2. Cazul 2. Se acționează numai pentru compensarea puterii reactive.....	6-9
6.2.2.3. Cazul 3. Se acționează numai pentru echilibrarea sarcinii.....	6-10
6.2.2.4. Cazul 4. Se acționează numai pentru filtrarea armonicilor de curent.....	6-12
6.2.2.5. Cazul 5. Se acționează pentru compensarea puterii reactive și echilibrarea sarcinii.....	6-14
6.2.2.6. Cazul 6. Se acționează pentru compensarea puterii reactive și filtrarea armonicilor de curent.....	6-15
6.2.2.7. Cazul 7. Se acționează pentru compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor de curent.....	6-16
6.2.3. Aplicație numerică.....	6-17
6.2.3.1. Descriere.....	6-17
6.2.3.2. Interpretarea rezultatelor.....	6-20
6.3. Analiza interdependenței dintre compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor de curent din perspectiva calității tensiunii.....	6-28
6.3.1. Punerea problemei.....	6-28
6.3.2. Elemente de calcul.....	6-29
6.3.3. Aplicație numerică.....	6-32

Capitolul 7. Concluzii generale și contribuții originale

7.1. Concluzii generale.....	7-1
7.2. Principalele elemente de contribuție originală ale tezei de doctorat.....	7-6

Bibliografie

ANEXA 1. Instrumentul virtual folosit în cadrul experimentelor și exemplul de fișier de date
ANEXA 2. Program pentru analiza numerică a semnalelor acționionate și exemple de rezultate
ANEXA 3. Probleme tipice pentru rețelele trifazate dezechilibrate
ANEXA 4. Relații particulare pentru calculul impedinței schemei echivalente a unei sarcini din conexiune A în conexiune Y și invers
ANEXA 5. Relații între elementele componente ale schemei echivalente în Y a unei sarcini trifazate într-o rețea fără conductori neutri
ANEXA 6. Expresiile în componente simetrice ale curenților pe fazele unor receptoare electrice trifazate
ANEXA 7. Determinarea grafică a componentelor simetrice ale unui sistem trifazat de mărimi..
ANEXA 8. Rezultate ale aplicațiilor numerice aferente capitolului al treilea
ANEXA 9. Rezultate ale aplicațiilor numerice aferente capitolului al patrulea
ANEXA 10. Susceptanțe variabile realizate cu dispozitive de comutație statică
ANEXA 11. Rezultatele experimentului 1
ANEXA 12. Rezultatele experimentului 2
ANEXA 13. Rezultatele experimentului 3
ANEXA 14. Rezultatele experimentului 4

Capitolul 1

CRITERII ȘI ACȚIUNI PENTRU OPTIMIZAREA FUNCȚIONĂRII REȚELELOR ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE.

Obiectul lucrării de doctorat

1.1. Punerca problemei

Dispuse între rețelele de transport și instalațiile de utilizare a energiei electrice, rețelele de distribuție au câteva caracteristici principale specifice. Astfel, datorită diversității mari a puterilor ce trebuie asigurate utilizatorilor, de la câțiva kVA până la câțiva MVA, ele vor cuprinde instalații la toate nivelele de tensiune. Structura lor este în același timp foarte complexă, cuprinzând un număr foarte mare de elemente (stații de transformare, puncte de alimentare, stații de conexiuni, posturi de transformare, linii electrice) nemaivorbind de instalațiile auxiliare de comandă și control ale acestora.

Dacă se mai consideră și suprafețele foarte mari ale zonelor pe care sunt amplasate, se poate intui ușor o mare complexitate a problemei optimizării funcționării rețelelor electrice de distribuție.

Enunțul ei are însă o formulare foarte simplă: maximizarea eficienței tehnico-economice în toate etapele de concepție-proiectare, construcție-montaj și exploatare a rețelelor electrice de distribuție.

Problema generală a optimizării funcționării rețelelor electrice de distribuție se poate rezolva astfel prin divizarea în subprobleme care în general folosesc criterii diferite de optimizare. Dar pentru că toate aceste subprobleme sunt "verigi" ale aceluiași "lanț" și cum "un lanț este la fel de slab ca cea mai slabă verigă a sa", fiecărei subprobleme trebuie să i se acorde aceeași importanță.

Înainte de a trece la expunerea succintă a acestei diversități de subprobleme vrem să mai subliniem un aspect legat de funcționarea rețelelor electrice de distribuție. Este vorba de faptul că analiza funcționării acestora nu poate fi făcută corect sau complet dacă nu este luată în considerare și funcționarea instalațiilor de utilizare a energiei electrice pe care le alimentează. Acesta întrucât cele două elemente au o funcționare unitară, se influențează reciproc, se intercondiționează. Pentru studierea funcționării acestui ansamblu se poate utiliza conceptul de *calitate în alimentarea cu energie electrică*, în cadrul căruia se abordează:

1. *calitatea sistemului de alimentare*, cu referire la elementele specifice funcționării fiecăreia dintre cele două componente:

- *rețeaua furnizorului de energie electrică*;
- *instalația de utilizare*.

2. *calitatea produsului "energie electrică"*, cu referire la interacțiunea dintre rețeaua de distribuție și instalația de utilizare.

Rezolvarea problemei generale a optimizării funcționării rețelelor de distribuție se realizează atunci când în toate etapele amintite mai sus se aplică soluții care îndeplinesc simultan cele două categorii de restricții:

- restricțiile economice;
- restricțiile tehnice.

Restricțiile economice se manifestă de fapt sub forma minimizării costurilor și se aplică atât în faza de concepție-proiectare a unei rețele sau a unui element de rețea, cât și în faza de exploatare.

În faza de concepție-proiectare restricțiile economice intervin în etapa de alegere a soluțiilor pentru temele de proiectare. Aceasta se desfășoară prin aplicarea unor algoritmi de selecție tehnico-economici. Drept criteriu economic general valabil este cel al *eficienței economice a investiției* și este aplicat în mai multe forme:

- criteriul cheltuielilor totale actualizate minime;
- criteriul venitului net actualizat;
- criteriul duratei de recuperare a investiției;
- criteriul ratei interne de rentabilitate;
- criteriul cheltuielilor anuale nivelate (egalizate);

În etapa de exploatare, restricțiile economice intervin sub forma minimizării costurilor legate de activitatea administrativă, de cea de mentenanță și conducere a funcționării. Un element distinct aici îl constituie costul pierderilor de energie activă în elementele ce rețea, unul dintre indicatorii eficienței economice a exploatării.

Restricțiile tehnice aferente funcționării rețelelor electrice de distribuție sunt mult mai numeroase și se pot împărți în următoarele categorii:

- condițiile tehnice de funcționare a elementelor componente ale instalațiilor;
- limitele de variație ale mărimilor caracteristice regimurilor normale de funcționare și a celor care definesc perturbațiile față de regimul normal;
- condițiile impuse de siguranța în funcționare a instalațiilor și de continuitatea în alimentarea consumatorilor;
- limitele de variație ale mărimilor ce definesc compatibilitatea electromagnetică.

Drept criterii tehnice de apreciere a funcționării unei rețele electrice de distribuție se pot folosi:

- consumul propriu tehnologic (CPT) și pierderile de putere și energie electrică;
- continuitatea în alimentarea consumatorilor;
- gradul de poluare a tensiunii.

Prin urmare, măsurile pentru optimizarea funcționării rețelelor de distribuție, care (în de fapt de *optimizarea regimurilor de funcționare* ale acestora se pot și ele diferenția în funcție de aceste criterii.

1.1.1. Reducerea consumului propriu tehnologic și a pierderilor în rețelele electrice de distribuție.

Reducerea consumului propriu tehnologic și a pierderilor prin optimizarea activităților de exploatare și de dezvoltare ale rețelelor este unul dintre obiectivele cele mai importante ale furnizorului de energie electrică. Principalele măsuri tehnice de reducere a consumului propriu tehnologic și a pierderilor în rețele sunt ([29]):

A. Măsuri de reducere a pierderilor care nu necesită investiții pentru aplicare.

- A1.- stabilirea schemei normale de funcționare având ca scop minimizarea CPT;
- A2.- determinarea regimului optim de tensiuni și putere reactivă (optimizarea regimurilor de funcționare ale instalațiilor de compensare a puterii reactive);
- A3.- optimizarea regimurilor de funcționare ale transformatoarelor în stațiile cu două sau mai multe transformatoare;
- A4.- stabilirea rapoartelor optime de transformare la unitățile fără reglaj sub sarcină;
- A5.- debrucarea optimă a rețelelor de diferite tensiuni;
- A6.- optimizarea nivelului tensiunii;
- A7.- echilibrarea naturală a sarcinii pe fazele rețelei.

B. Măsuri tehnice de reducere a CPT care necesită investiții pentru aplicare.

- B1.- creșterea tensiunii nominale prin construirea de racorduri adânci la înaltă tensiune sau trecerea rețelelor la o treaptă superioară de tensiune, acceptând o reducere a rezervei în izolație (de ex. de la 10 kV la 20 kV sau de la 0,38 kV la 0,6 kV);
- B2.- instalarea de mijloace suplimentare de compensare a puterii reactive și de reglaj a tensiunii (transformatoare cu reglaj de tensiune în locul celor fără reglaj, compensarea capacitivă serie, sisteme FACTS [51]) și optimizarea repartiției acestora;
- B3.- optimizarea parametrilor echivalenți ai elementelor de rețea prin:
 - corelarea puterii instalate în stațiile și posturile de transformare cu sarcina acestora;
 - mărirea secțiunii conductoarelor liniilor;
 - eliminarea dublelor transformări dintre rețele de transport și cele de distribuție.
- B4.- optimizarea dezvoltării și reconstrucției rețelei de distribuție prin:
 - optimizarea reconstrucției și reducerea razei de acțiune pe măsura creșterii consumului;
 - introducerea distribuției descentralizate pe joasă tensiune (prin eliminarea practic a rețelei de joasă tensiune).

Este evident că decizia de aplicare a uneia dintre aceste soluții trebuie să fie luată prin utilizarea unor criterii de selecție tehnico-economică.

1.1.2. Creșterea gradului de continuitate în alimentarea consumatorilor

Asigurarea alimentării cu energie electrică, fără întrerupere, a consumatorilor reprezintă de asemenea o problemă importantă a furnizorului și o componentă a calității energiei electrice furnizate.

Optimizarea gradului de continuitate în alimentarea consumatorilor se face din considerente tehnico-economice și este o sumă de acțiuni care include ([111], [112]):

- optimizarea structurii și exploatării rețelei de distribuție a furnizorului;
- optimizarea structurii și exploatării rețelei de distribuție a utilizatorului;
- optimizarea soluției de desensibilizare a receptoarelor față de goluri de tensiune și întreruperi scurte sau de lungă durată.

Primele două categorii de acțiuni se pot considera similare deși sunt diferite ca amploare. Optimizarea structurii schemelor rețelelor de alimentare ale furnizorului și ale utilizatorului se face în funcție de sarcina maximă de durată și de condițiile de continuitate cerute.

Optimizarea exploatării rețelelor presupune pe de o parte ridicarea nivelului tehnic al echipamentelor folosite iar pe de altă parte optimizarea activității de mentenanță a rețelelor. Aceasta presupune printre altele:

- supravegherea sistematică a rețelelor;
- aplicarea de programe de mentenanță ale punctelor celor mai sensibile ale instalațiilor;
- aplicarea de tehnici, tehnologii, echipamente și materiale noi în scopul:
 - localizării cât mai precise și rapide a defectelor și incidentelor;
 - reducerea distanțelor și timpilor de intervenție;
 - limitarea sau chiar evitarea întreruperilor pentru lucrări.

Pentru desensibilizarea instalațiilor față de goluri de tensiune și întreruperi de scurtă durată se aplică o serie de soluții cum ar fi ([80]):

- protecții de minimă tensiune speciale;
- alegerea adecvată a echipamentelor în funcție de sensibilitatea lor naturală;
- alimentarea receptoarelor sensibile cu surse cu acumulare de energie;
- alimentarea din surse duble.

1.1.3. Diminuarea gradului de poluare a tensiunii

Abaterile tensiunilor ca formă de undă, ca valori efective și ca variație în timp față de cazul regimului permanent normal, perfect simetric și sinusoidal, sunt perturbații datorate unei multitudini de cauze, care se manifestă într-o mare diversitate de moduri și au o sumedenie de efecte negative atât asupra rețelei furnizorului cât și asupra instalațiilor utilizatorilor. Perturbațiile au cauze localizate în fiecare dintre cele două componente, motiv pentru care se poate afirma că acestea sunt în același timp perturbatoare și perturbate.

Prezența perturbațiilor de orice fel conduce la o “poluare” a tensiunii prin apariția unuia sau a mai multor neregularități de tipul ([75]):

- variații bruște ale tensiunii;
- fluctuații rapide de tensiune;
- dezechilibre ale tensiunilor trifazate;
- forme nesinusoidale ale undelor de tensiune;
- goluri de tensiune;
- tensiuni de impuls sau supratensiuni de scurtă durată;
- componente continue.

Metodele și mijloacele de diminuare a gradului de poluare a tensiunii urmăresc o optimizare tehnico-economică a măsurilor ce vizează:

- diminuarea numărului surselor de perturbații și a frecvenței acestora;
- limitarea nivelului perturbațiilor și a propagării lor în rețea;
- desensibilizarea instalațiilor electrice ale furnizorului și mai ales ale utilizatorilor față de acțiunea perturbațiilor.

Dintre acestea se amintesc cele mai importante, grupate mai jos în funcție de perturbația la care se referă:

1°- Metodele și procedeele de eliminare a *fluctuațiilor de tensiune* sunt aplicate asupra instalațiilor perturbatoare, cele mai semnificative fiind ([78]):

1.1.- în cazul cuptoarelor cu arc:

- instalarea unei inductanțe în serie cu cuptorul;
- racordarea la o rețea de tensiune superioară;
- reglarea compensării puterii reactive absorbite din rețea cu ajutorul compensatoarelor sincrone sau a compensatoarelor statice;
- compensarea capacitivă serie în amonte de punctul de racord comun cu a altor consumatori;

1.2.- în cazul mașinilor de sudură:

- racordarea în secțiuni ale rețelei cu puteri de scurtcircuit mai mari.

2°- *Dezechilibrele tensiunilor* trifazate se diminuează prin acțiuni asupra dezechilibrelor sarcinii pe cele trei faze ale rețelei. Principalele metode și mijloace folosite urmăresc ([38], [58], [77]) :

2.1.- echilibrarea naturală prin optimizarea repartiției sarcinilor monofazate;

2.2.- echilibrarea artificială prin folosirea unor instalații de simertizare ce folosesc:

- scheme cu elemente reactive;
- scheme cu transformatoare;
- compensatoare statice cu reglajul automat al puterilor reactive pe fazele rețelei (domeniu în care aduce a contribuție și lucrarea de față).

3°- Efectele perturbatoare ale *poluării armonice* se atenuează prin aplicarea de metode, măsuri și mijloace tehnice ce aparțin unor tipuri de soluții ce se pot împărți în trei categorii ([30], [42]) :

3.1.- stabilirea de scheme și regimuri adecvate de funcționare ale echipamentelor:

- redresoare cu număr mare de alternanțe;
- coordonarea nesimultaneității funcționării echipamentelor perturbatoare.

3.2.- adoptarea de scheme de alimentare cu energie electrică care conduc la limitarea conținutului de armonici:

- conectarea consumatorilor deformați la o tensiune nominală adecvată;
- asigurarea unei puteri de scurtcircuit la bornele acestora cât mai ridicate;
- alimentarea pe căi separate a consumatorilor deformați, etc.

3.3.- utilizarea de echipamente specializate pentru limitarea conținutului de armonici:

- filtre de curenți armonici;
- sisteme moderne de control al nivelului poluării armonice;
- filtre active.

4°- Împotriva *tensiunilor de impuls* și a *supratensiunilor de scurtă durată* acțiunile întreprinse vizează limitarea nivelului acestora și optimizarea protecției instalațiilor prin :

- alegerea metodelor adecvate de protecție:
 - serie (transformatoare de izolare, filtre, etc.);
 - paralel (eclatoare, descărcătoare cu rezistență variabilă, diode în avalanșă);
- optimizarea concepției și realizării instalațiilor de legare la pământ.

1.2. Obiectul lucrării de doctorat

Lucrarea de doctorat de față este urmarea firească a unei activități continue a autorului, desfășurată în domeniul optimizării funcționării rețelelor electrice. Acest domeniu, în care își desfășoară de altfel și activitatea didactică, este “firul roșu” imaginar, care leagă elementele prin care i s-au concretizat eforturile: lucrări științifice, contracte de cercetare, referate, lucrări didactice.

Din multitudinea de probleme legate de optimizarea funcționării rețelelor electrice de distribuție, a căror clasificare a fost schițată în paragrafele anterioare, locul central în activitatea științifică a autorului a fost deținut de *studiul regimurilor permanente nesimetrice și nesinusoidale ale rețelelor electrice*, în cadrul căruia a adus contribuții teoretice și practice privind:

- analiza și identificarea regimurilor;
- metodele și mijloacele de analiză și identificare;
- metodele și mijloacele de diminuare a efectelor perturbațiilor caracteristice.

Aceste contribuții, prezentate în lucrări științifice publicate la simpozioane, conferințe sau în reviste de specialitate, în calitate de autor principal sau coautor ([1]-[19]), sau în contracte de cercetare științifică încheiate cu beneficiari din domeniul furnizării energiei electrice ([22]-[27]), vizează următoarele subiecte:

- identificarea și analiza regimului deformant în stațiile de transformare ce alimentează consumatori de tip tracțiune electrică feroviară;
- identificarea regimurilor perturbate prin analiza regimului deformant al rețelelor;
- propagarea regimului nesinusoidal prin transformatoarele rețelelor electrice;
- evaluarea impedanțelor armonice în rețelele de distribuție;
- propagarea regimului nesinusoidal în rețelele de distribuție de înaltă tensiune;
- precizia transformatoarelor de măsură de curent și tensiune în regim deformant;
- determinarea caracteristicilor statice ale consumatorilor deformanți;
- compensarea puterii reactive în rețelele cu sarcini dezechilibrate;
- interdependența acțiunilor ce vizează echilibrarea sarcinii și compensarea puterii reactive;
- sistemul de achiziții și prelucrare a datelor, realizat cu contribuția autorului și utilizat la determinările experimentale.

Continuând traseul preocupărilor în domeniul precizat, lucrarea de față își propune să aducă o contribuție la soluțiile actuale pentru limitarea regimurilor dezechilibrate în rețelele trifazate de curent alternativ prin dezvoltarea modelului matematic necesar unor sisteme automate "inteligente".

Este vorba despre compensarea asimetrică a puterii reactive pe fazele unei rețele, care, în condițiile implementării unor sisteme flexibile de tip FACTS- Flexible Alternante Current Transmission Systems ([51], [55]), face posibilă echilibrarea on-line a regimurilor nesimetrice ale rețelelor.

Astfel, în *capitolul al doilea* s-a făcut o parcurgere sintetică a elementelor caracteristice regimurilor nesimetrice și deformante ale rețelelor de distribuție în ceea ce privește cauzele, mărimile caracteristice, efectele și măsurile necesare atenuării efectelor acestor perturbații. Tot în acest capitol este abordată problema mijloacelor de identificare și analiză aplicabile în cazul acestor regimuri și este prezentat sistemul de achiziție și prelucrare a datelor, realizat cu contribuția originală a autorului pe componenta soft, sistem cu care s-au făcut numeroase măsurători atât în rețelele reale, la toate nivelele de tensiune, cât și în cadrul experimentelor de laborator prezentate în această lucrare.

Capitolele al treilea și al patrulea conțin modelele matematice ale echilibrării sarcinilor rețelelor trifazate cu trei respectiv patru conductoare, prin compensarea transversală asimetrică a puterii reactive.

În fiecare caz a fost demonstrată posibilitatea transformării unui consumator echivalent trifazat dezechilibrat, având orice caracter (rezistiv, rezistiv-inductiv) și orice grad de dezechilibru, într-un consumator perfect echilibrat, pur rezistiv sau cu un factor de putere oarecare, prestabilit.

Mecanismul compensării constă de fapt în redistribuirea puterilor active și reactive între faze, obținută prin compensarea transversală asimetrică a puterii reactive, în primul caz prin folosirea unui compensator în conexiune Δ , iar în cel de-al doilea caz cu două compensatoare, unul în conexiune Δ și celălalt în conexiune Y.

În ambele cazuri există o infinitate de soluții pentru valorile susceptanțelor de compensare dar o singură soluție atunci când se folosește suplimentar unul dintre criteriile următoare:

- compensarea totală a puterii reactive absorbite de către consumatorul echivalent ;

- compensarea parțială, până la un factor de putere impus, a puterii reactive absorbite ;
- minimizarea puterii reactive instalate în compensator;
- minimizarea pierderilor totale de putere reactivă în rețeaua de alimentare;
- reglajul tensiunii în nodurile rețelei, la un nivel impus.

Aplicând criteriile stabilite, s-au determinat:

- relațiile pentru calculul susceptanțelor și curenților de compensare în funcție de susceptanțele echivalente ale sarcinii și de componentele de fază respectiv de secvență ale curenților de sarcină, relații necesare dimensionării compensatoarelor și construirii legilor de comandă pe baza cărora poate opera un sistem de reglare automată;

- circulația de curenți și puteri în componente de fază și componente simetrice în interiorul ansamblului consumator-compensator, necesară explicării mecanismului compensării;

Pentru a evalua implicațiile cantitative ale aplicării modelelor matematice dezvoltate în aceste capitole, în fiecare caz a fost întocmit un program de calcul (în limbajul Turbo Pascal) pentru aplicații numerice ce se referă la diverse combinații de valori efective și grade de dezechilibru ale curenților pe fazele sarcinii.

Capitolul al cincilea prezintă o serie de experimente de laborator, realizate pe baza modelelor matematice obținute. S-au modelat atât sarcini trifazate conectate în rețelele cu trei conductoare cât și pentru rețelele cu patru conductoare. Pe baza acestora s-au dimensionat și s-au construit susceptanțele variabile, de tipul celor utilizate în sisteme FACTS (în cazul de față cu bobine comandate cu tiristoare), ce au fost integrate apoi în cele două compensatoare. Rezultatele validează cu o bună precizie, modelele matematice dezvoltate în capitolele trei și patru și totodată confirmă posibilitatea utilizării de compensatoare asimetrice cu susceptanțe variabile pentru echilibrarea automată a sarcinii rețelelor dezechilibrate.

În *capitolul al șaselea* problema se dezvoltă prin analiza unor aspecte legate de compensarea puterii reactive în rețelele electrice de distribuție ce funcționează în regimuri dezechilibrate și deformante. Mai precis se studiază interdependența acțiunilor de optimizare ce urmează:

- compensarea puterii reactive pentru îmbunătățirea factorului de putere;
- echilibrarea sarcinii;
- atenuarea regimului deformant prin filtrarea armonicilor de curent.

Se presupune desigur că pentru echilibrarea sarcinii se folosește metoda expusă în capitolele anterioare, utilizând modelul matematic aferent acestora.

Cele trei acțiuni se aplică separat sau sub formă de combinații ale lor .

Efectele aplicării într-o rețea a fiecăreia dintre variantele rezultate sunt apoi analizate prin prisma eficienței, măsurată prin factorul de putere, respectiv a calității tensiunii în rețea (valoare efectivă, dezechilibru și distorsiune). Construcția teoretică este însoțită și de această dată de o aplicație numerică, ce ia în considerare diverse variante de sarcini dezechilibrate și deformante.

În ansamblul său, lucrarea și-a propus să aducă o contribuție semnificativă la dezvoltarea metodelor de simetrizare a rețelelor trifazate dezechilibrate, prin dezvoltarea modelelor matematice necesare compensării asimetrice în rețelele cu trei respectiv patru conductoare și validarea experimentală a acestora.

De asemenea s-a urmărit determinarea compatibilității metodelor analizate cu celelalte metode folosite în rețelele electrice pentru optimizarea funcționării acestora, legate de compensarea puterii reactive și filtrarea armonicilor. Rezultatele obținute sunt deosebit de utile în perspectiva integrării lor în sistemele flexibile, cărora le este rezervat un rol important în controlul și reglajul necesar funcționării optime a rețelelor electrice de distribuție ale viitorului.

1

Capitolul 2

REGIMURILE NESINUSOIDALE ȘI NESIMETRICE ALE REȚELOR ELECTRICE

2.1. Introducere

Deoarece sunt caracterizate prin abaterile față de regimul permanent perfect sinusoidal și simetric de funcționare a rețelelor electrice, prin perturbații ale acestuia, regimul permanent nesinusoidal (deformant) și regimul permanent nesimetric sunt considerate *regimuri perturbate* de funcționare.

Regimul perfect sinusoidal și simetric este însă unul teoretic, ideal, regimurile reale de funcționare fiind întotdeauna regimuri perturbate cauzate de imperfecțiunile, niciodată înlăturate în totalitate, ale elementelor componente ale instalațiilor de producere, transport, distribuție și utilizare, de interacțiunile cu mediul în care funcționează, etc.

Dezvoltarea și evoluția sistemelor electroenergetice a fost însoțită și de o evoluție a perturbațiilor în funcționarea lor, astfel încât s-a ajuns la etapa în care nivelul perturbațiilor trebuie în mod imperativ limitat, pentru a satisface pretențiile tot mai ridicate ale consumatorilor.

Activitatea specialiștilor îndreptată spre identificarea cauzelor, definirea mărimilor caracteristice, cuantificarea și atenuarea efectelor perturbațiilor, au condus la apariția unor concepte noi, cum sunt cele de *calitate a energiei electrice* și de *compatibilitate electromagnetică*, care, însoțite fiind de standarde și normative (încă perfectibile), stabilesc concret cerințele legate de concepția, proiectarea, execuția și funcționarea tuturor instalațiilor implicate în producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei electrice.

O parte dintre elementele referitoare la cauzele, caracteristicile, efectele, metodele de identificare, analiză și atenuare a regimurilor amintite sunt parcurse sintetic în cadrul acestui capitol.

2.2. Regimul permanent nesinusoidal (deformant)

2.2.1. Originea perturbațiilor armonice

Tensiunile și curenții nu sunt perfect sinusoidali într-o rețea electrică, deoarece anumite aparate electrice absorb curenți electrice nesinusoidali, distorsionând deci unda de tensiune, iar rețeaua electrică propagă aceste distorsiuni, uneori chiar amplificându-le ([65]).

Principalele aparate care produc armonici sunt:

- transformatoarele și mașinile electrice rotative care produc armonici de rang impar, însă de amplitudini mici, care se pot neglija în majoritatea cazurilor;

- redresoarele : punți Graetz hexafazate sau dodecafazate, utilizate în special pentru alimentarea motoarelor de curent continuu cu viteză variabilă, în circuite cu electronică de putere, pentru electroliză;
- sistemele electronice de putere, având la bază diode sau tiristoare;
- cuptoarele cu plasmă și cele cu inducție;
- aparatele de înaltă frecvență;
- aparatele electrice și electronice pentru birotică și utilizări casnice;
- rețeaua electrică însăși.

Domeniile de frecvență care corespund acestor armonici sunt în general cuprinse între 100 Hz și circa 2000 Hz, respectiv armonicilor de rang $n=2$ și celor de rang $n=40$.

Este posibil însă să existe în tensiunile rețelelor electrice și *interarmonici* pentru care rangul n nu este un număr întreg și poate fi chiar inferior lui 1 (subarmonici).

În prezent, sistemele electronice de putere cu surse în comutație constituie principala sursă de frecvențe armonice și interarmonice susceptibile a fi întâlnite în tensiunea rețelelor electrice de distribuție de alimentare. Aceste aparate pot fi asimilate ca *generatoare de curenți armonici*, amplitudinea acestora fiind practic independentă de impedanța rețelei de alimentare și de deformarea undei de tensiune și depinzând numai de condițiile intrinseci de funcționare a aparatelor, în regim normal de exploatare.

Astfel, redresoarele simetrice hexafazate și dodecafazate dau naștere în rețeaua de alimentare la curenți armonici de rang $n=k \cdot p \pm 1$, k fiind număr întreg iar p numărul fazelor redresorului. Majoritatea armonicilor produse sunt de rang impar. Amplitudinea lor descrește după o lege aproximativă de forma:

$$I_n = \frac{I_1}{n^{1,2}} \quad (2.1)$$

în care I_n este amplitudinea curentului armonic de rang n , iar I_1 amplitudinea fundamentalei de curent.

Echipamentele ce conțin electronică de putere pot da naștere la:

- armonici pare - cazul sistemelor redresoare disimetrice, în special al punților mixte echipate cu diode și tiristoare;
- subarmonici - de frecvențe sub 50 Hz, cazul cicloconvertoarelor;
- interarmonici - cazul sistemelor utilizate pentru realizarea motoarelor cu viteză variabilă de curent alternativ și a cuptoarelor electrice cu arc, care conțin toată gama de armonici, amplitudinea acestora descreșcând cu creșterea frecvenței.

În afara surselor amintite, în sistemul electroenergetic regimul deformant se datorează *elementelor care amplifică regimul deformant*. Este de exemplu cazul liniilor electrice, care în condițiile în care sunt parcurse de curenți armonici, pot reacționa ca circuite oscilante formate de inductivitățile și capacitățile proprii, frecvența de rezonanță a acestora putând coincide cu frecvențele curenților armonici produși de elementele care generează fenomene deformante.

Sursele de regim deformant pot fi clasificate în surse de tensiuni respectiv de curenți armonici și pot exista atât în rețelele furnizorilor cât și în cele ale utilizatorilor.

Sursele de tensiuni armonice sunt surse care produc tensiuni electromotoare nesinusoidale. La aceste surse undele tensiunilor și curenților sunt alternativ simetrice și deci nu conțin decât armonici impare care uneori pot cauza oscilații interarmonice (subarmonice).

Armonicile de tensiune de ordin par pot fi generate îndeosebi de *sursele de curenți armonici*. Ele dețin în condiții obișnuite, o pondere scăzută în raport cu celelalte armonici din rețea. Condiționarea reciprocă între armonicile de curent și cele de tensiune este

influențată de reactanțele și de configurația rețelei, precum și de fenomenele de rezonanță și ferorezonanță care se pot manifesta în anumite situații.

Perturbațiile armonice pot apărea în diferite puncte ale rețelei, mult îndepărtate de sursa perturbatoare, din cauza disproporției relative a impedanțelor pe care se închid acești curenți. Zona de propagare a armonicilor superioare este cu atât mai extinsă cu cât tensiunea de lucru la bara de racord a sursei deformante este mai ridicată. În zonele de rețea în care predomină sursele de curenți armonici asupra surselor de tensiuni armonice, inductanțele circuitelor conduc la amplificarea armonicilor de tensiune. În schimb, în zonele de rețea în care predomină sursele de tensiuni armonice, capacitățile au un rol de amplificare a armonicilor de curent.

Elementele liniare ale rețelei cum sunt rezistențele, inductivitățile, capacitățile, care sunt constante, nu convertesc frecvențele tensiunilor și curenților armonici ci realizează amplificarea sau atenuarea lor. Elementele neliniare sunt răspunzătoare de conversia frecvențelor.

Prin urmare, tensiunile armonice provenind de la sursele de tensiuni armonice și aplicate rețelei în diferite puncte, dau naștere curenților armonici de ordin corespunzător sau diferit ce sunt amplificați sau atenuați de către elementele neliniare ale circuitelor și de către cele reactive (inductivități, capacități). Curenții armonici injectați de sursele de curenți armonici, se închid pe circuitele rețelei conducând la o deformare corespunzătoare a tensiunii, în funcție de valorile impedanțelor echivalente ale rețelei în punctele de injecție respective. Din acest motiv, spectrul tensiunii în aceste puncte are calitativ aceeași variație ca și spectrul curentului nesinusoidal injectat de sursa deformantă.

Sursele de curenți armonici se atribuie acelor elemente deformante care, în regim sinusoidal de tensiune, introduc armonicilor superioare în curentul absorbit din rețeaua electrică. Valorile tensiunilor armonice rezultate la locul de racord al sursei, sunt proporționale cu intensitățile curenților armonici generați și cu impedanțele echivalente ale rețelei.

Tensiunile armonice observate într-un punct al rețelei electrice sunt influențate de:

- combinațiile armonicilor de același rang, provenite din surse diferite, ce depind de amplitudinea armonicilor;
- prezența sau absența condițiilor favorabile de rezonanță.

În toate rețelele electrice există inductivități și rezistențe peste care se suprapun adesea capacități. Ținând seama de domeniul de frecvență definit mai sus, aceste mărimi pot fi considerate ca fiind constante localizate. Este deci adesea foarte posibil să apară fenomene de rezonanță, mai mult sau mai puțin accentuate, pe una sau mai multe frecvențe. Aceste fenomene de rezonanță sunt caracterizate prin doi parametri și anume:

- frecvența de rezonanță;
- amplitudinea rezonanței, reprezentată de raportul dintre amplitudinile tensiunilor sau curenților corespunzători la două stări: în condiții de rezonanță și în afara rezonanței. Acest raport se numește *factorul de amplificare*, *factorul de calitate* sau *factorul de supratensiune* al circuitului, fiind de forma $\omega L/R$ în cazul circuitelor rezonante respectiv $R/\omega L$ în cazul circuitelor antirezonante.

În cazurile frecvent întâlnite în practică, în care o stație de transformare î.t./m.t. alimentează o sarcină care include o punte redresoare sau echipamente cu tiristoare și posedă o baterie de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere (fig.2.1.), frecvența de rezonanță pe barele de m.t. se poate calcula cu o bună aproximație, cu relația:

$$f = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}} \quad (2.2.)$$

în care S_{sc} este puterea de scurtcircuit la 50 Hz a rețelei la nivelul barelor de medie tensiune ale stației iar Q_C puterea reactivă a bateriei de condensatoare ([65], [75]).

Valoarea frecvenței de rezonanță este puțin influențată de sarcină, când impedanța sa, reprezentată printr-o schemă paralel LR, este mare în raport cu reactanța echivalentă din amonte de barele de medie tensiune ($X_{IT} + X_T$).

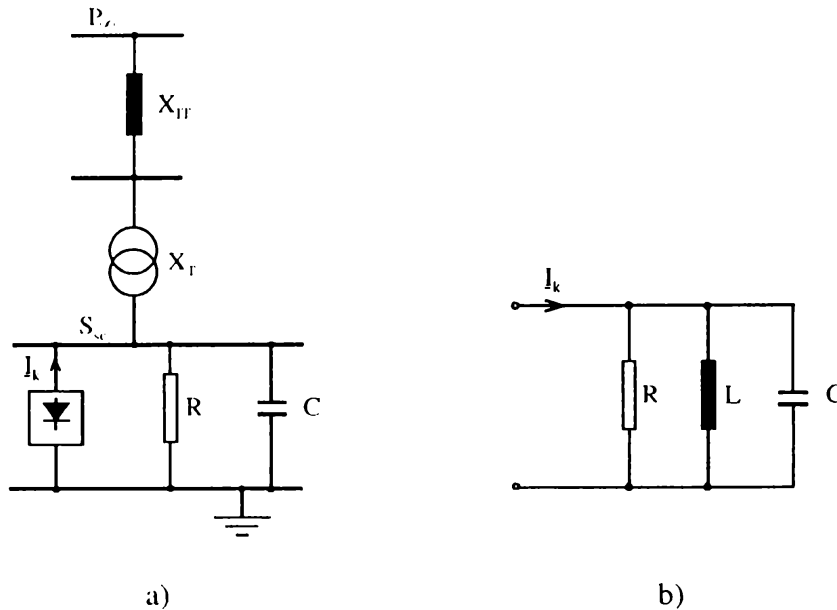


Fig. 2.1. Schema unei stații de transformare care alimentează sarcini din care una este sursă de curenți armonici : a) schema monofilară principală ; b) schema echivalentă armonică.

În schimb, factorul de calitate al circuitului reprezentativ este foarte dificil de estimat. Valoarea sa depinde foarte mult de rezistența R cu care se modelează partea din sarcină corespunzătoare energiei amortizante, analoagă energiei termice. Valoarea rezistenței R este dificil de apreciat și în plus, depinde de sarcinile efectiv racordate la rețea, deci variabile în timp de o manieră aleatoare.

O estimare aproximativă a factorului de amplificare a tensiunii, corespunzător frecvenței de rezonanță se poate face în condițiile:

- aproximării sarcinii amortizante cu puterea activă absorbită de sarcinile racordate la barele de m.t.;
- considerării sarcinilor active constante;
- echivalării sarcinii amortizante printr-o rezistență R , independentă de frecvență.

Rezultă astfel relația aproximativă:

$$q = \frac{\sqrt{Q_C \cdot S_{sc}}}{P} \quad (2.3.)$$

Calculul și măsurătorile în rețele au condus la estimări ale factorului de amplificare corespunzătoare unor valori medii între 2÷4, valorile extreme putând atinge în cazuri particulare, valoarea 10.

Sunt foarte rare cazurile în care, la nivelul sistemelor de bare de m.t. din stațiile de transformare, se întâlnesc rapoarte ale tensiunilor armonice având valori mai mari de câteva procente, deoarece frecvențele întâlnite sunt adesea de rang impar și inferioare lui 15. Ținând seama că rezonanțele sunt relativ amortizate, este posibil ca două sau trei armonici apropiate să aibă amplitudini puțin diferite.

2.2.2. Mărimi caracteristice

2.2.2.1. Mărimi caracteristice ale curbelor periodice nesinusoidale

Curbele de curent sau tensiune, într-o rețea poluată armonic, sunt periodice și deci pot fi descrise de funcția

$$f(t) = f(t \pm kt) \quad (2.4)$$

unde $k=1,2,\dots$; $T = \frac{2\pi}{\omega}$, perioada funcției; ω - pulsația curbei fundamentale.

Dacă funcția îndeplinește condițiile Dirichlet (funcția este mărginită și punctele sale de discontinuitate, ca și maximele și minimele sunt în număr limitat), curba sinusoidală, pe intervalul unei perioade, poate fi exprimată prin serii Fourier ([30], [84]):

- forma dezvoltată:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.5)$$

- forma restrânsă:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (2.6)$$

- cu termeni complecși

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{G}_n \cdot e^{jn\omega t} \quad (2.7)$$

Dacă se face notația

$$\underline{I}_n = 2 \cdot j \cdot \underline{G}_n \quad (2.8)$$

relația (2.7) poate fi scrisă sub forma:

$$f(t) = \frac{1}{2j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{I}_n \cdot e^{jn\omega t} = \frac{\underline{I}_0}{2j} + \sum_{n=1}^{\infty} \underline{I}_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (2.9)$$

În relațiile (2.5)... (2.9) au fost utilizate relațiile:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos n\omega t \cdot dt \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.10)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin n\omega t \cdot dt \quad c_0 = \frac{a_0}{2} \quad (2.11)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad \alpha_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (2.12)$$

c_n - amplitudinea armonicii de rang n ;

α_n - defazajul armonicii de rang n în planul $n\omega t$, față de originea aleasă inițial în mod arbitrar.

În planul fundamentalei (planul ωt), unghiul de defazaj rezultă :

$$\alpha'_n = \frac{\alpha_n}{n} \quad (2.13)$$

În cazurile practice, dezvoltarea în serie Fourier este limitată la primii k termeni (în normativele actuale s-a stabilit ca utilă studierea doar a primelor 40 de armonici). Eroarea medie pătratică este minimă dacă coeficienții primilor k termeni ai sumei sunt coeficienții dezvoltării în serie Fourier.

Amplitudinea în complex \underline{F}_n a armonicii de rang n poate fi exprimată și sub forma:

$$\underline{F}_n = b_n + ja_n = \frac{2j}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-jn\omega t} dt = F_n e^{j\alpha_n} \quad (2.14)$$

relație din care se observă că:

$$\underline{F}_{-n} = -\underline{F}_n^* \quad (2.15)$$

În rețelele electrice trifazate simetrice și echilibrate, curenții electrici din cele trei faze i_I, i_{II}, i_{III} , pot fi scriși sub forma (considerând nulă componenta de curent continuu):

$$\begin{aligned} i_I(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \\ i_{II}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin\left(n\omega t + \alpha_n - \frac{2\pi}{3}n\right) \\ i_{III}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin\left(n\omega t + \alpha_n + \frac{2\pi}{3}n\right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

în care $I_n = \sqrt{2}I_{efn}$ este amplitudinea armonicii de rang n a curentului electric. În planul complex al armonicii de rang n , relațiile (2.16) devin:

$$\begin{aligned} \underline{I}_n^I &= I_n \cdot e^{j\alpha_n} \\ \underline{I}_n^{II} &= I_n \cdot e^{j\left(\alpha_n - \frac{2\pi}{3}n\right)} \\ \underline{I}_n^{III} &= I_n \cdot e^{j\left(\alpha_n + \frac{2\pi}{3}n\right)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Suma \underline{I} a celor trei curenți are forma:

$$\underline{I} = \underline{I}_n^I + \underline{I}_n^{II} + \underline{I}_n^{III} = I_n \cdot e^{j\alpha_n} \left(1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}n} + e^{j\frac{2\pi}{3}n} \right) \quad (2.18)$$

Din relația (2.18) se observă că:

- pentru $n = 3p, p=1,2,3, \dots$ $\underline{I} = 3 \cdot I_n e^{j\alpha_n} = 3 \cdot \underline{I}_n^I$ (2.19)

- pentru $n = 3p \pm 1$ $\underline{I} = 0$ (2.20)

Relația (2.19) pune în evidență faptul că armonicile de rang $3p$ formează sisteme homopolare, iar din relația (2.20) se observă că armonicile de rang $3p+1$ și $3p-1$ formează sisteme directe respectiv inverse.

• **Valoarea medie pe o perioadă a funcției nesinusoidale**

Dacă funcția periodică $f(t)$ este dată de forma restrânsă a dezvoltării în serie Fourier, valoarea medie pe o perioadă T rezultă:

$$F_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt = C_0 \quad (2.21)$$

Se observă că valoarea medie a funcției periodice **corespunde componentei continue !**

• **Valoarea efectivă a funcției nesinusoidale periodice**

Valoarea efectivă a funcției $f(t)$ se determină din relația:

$$I_{ef} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{ef\ n}^2} \cong \sqrt{\sum_{n=0}^k I_{ef\ n}^2} \quad (2.22)$$

unde $I_{ef\ n} = I_n \cdot \sqrt{2}$ este valoarea efectivă a armonicii de rang n ; ($I_{ef\ 0} = C_0$ este componenta continuă a funcției).

În rețelele trifazate simetrice și echilibrate, dacă tensiunile nu sunt sinusoidale, raportul dintre tensiunea de linie în valori efective și tensiunea de fază, în valori efective, este diferit de $\sqrt{3}$, valoare ce caracterizează regimul perfect sinusoidal.

Dacă tensiunile pe cele trei faze sunt nesinusoidale, expresiile lor pot fi scrise sub forma (neglijând componenta de tensiune continuă) :

$$\begin{aligned} u_I &= \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \beta_n) \\ u_{II} &= \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin\left(n\omega t + \beta_n - \frac{2\pi}{3}n\right) \\ u_{III} &= \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin\left(n\omega t + \beta_n + \frac{2\pi}{3}n\right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Tensiunea de linie u_{I-II} rezultă:

$$u_{I-II} = \sum_{n=1}^{\infty} 2U_n \left(\sin n\omega t + \beta_n - \frac{\pi}{3}n + \frac{\pi}{2} \right) \sin \frac{\pi}{3}n \quad (2.24)$$

Se observă că:

- pentru $n = 3p, p=1,2,3,$ (2.25)
 $u_{I-II} = 0$

- pentru $n = 3p \pm 1$ (2.26)
 $u_{I-II} = \sqrt{3}U_n \sin\left[(3p \pm 1)\omega t + \beta_{3p \pm 1} \pm \frac{\pi}{6}\right]$

Relația (2.25) pune în evidență că tensiunile între faze nu conțin armonici de rang $3p$, iar din relația (2.26) rezultă că tensiunile între faze conțin numai armonici de rang $3p \pm 1$, cu amplitudinea de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât tensiunile corespunzătoare pe fază.

Valoarea efectivă a tensiunii între faze (tensiunea de linie) se calculează cu relația:

$$U_{ef, I-II} = \sqrt{3} \sqrt{\sum_{p=0}^{\infty} U_{ef, 3p \pm 1}^2} \quad (2.27)$$

Raportul dintre valoarea efectivă a tensiunii de linie și cea de fază rezultă:

$$\frac{U_{ef, I-II}}{U_{ef, I}} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{\sum_{p=0}^{\infty} U_{ef, 3p \pm 1}^2}{\sum_{n=1}^{\infty} U_{ef\ n}^2}} < \sqrt{3} \quad (2.28)$$

• **Reziduul deformant al funcției periodice nesinusoidale**

Pentru o funcție periodică nesinusoidală definită de relația (2.9), reziduul deformant are expresia:

$$I_d = \sqrt{I_{ef}^2 - I_{ef1}^2} = \sqrt{I_{ef0}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{efn}^2} \quad (2.29)$$

2.2.2.2. Indicatori ai nivelului fenomenelor deformante în rețelele electrice

Apariția armonicilor superioare într-o rețea electrică, dimensionată să funcționeze la o frecvență fundamentală stabilită prin reglementările în vigoare în regim sinusoidal, conduce la modificarea unora dintre parametrii caracteristici ai rețelei. În acest sens se definesc o serie de indicatori ai regimului deformant care pun în evidență informații specifice privind funcționarea rețelei poluată cu armonici.

Fiecare dintre indicatorii regimului deformant : coeficient de formă, coeficient de vârf, coeficient de distorsiune etc., pune în evidență o anumită latură a impactului regimului deformant asupra funcționării rețelei electrice și deci vor fi utilizate în funcție de domeniul care urmează a fi studiat. Regimul deformant în ansamblu poate fi definit numai pe baza cunoașterii indicatorilor care definesc toate influențele asupra funcționării sistemului energetic.

• Coeficientul de formă

Coeficientul de formă este definit ca raportul dintre valoarea efectivă a curbei periodice nesinusoidale și valoarea medie a curbei pe o jumătate de perioadă:

$$k_f = \frac{I_{ef}}{I_{med,T/2}} \quad (2.30)$$

Valoarea medie a curbei periodice nesinusoidale pe o jumătate de perioadă poate fi determinată din relația:

$$I_{med,T/2} = \frac{a_0}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{n} \quad n = 2p+1 ; p = 0,1,2,\dots \quad (2.31)$$

Pentru o curbă sinusoidală, coeficientul de formă are valoarea $k_f = \sqrt{2}\pi/4 \approx 1,11$. Coeficientul de formă nu poate fi utilizat însă ca unic indicator al regimului deformant având în vedere că pot exista curbe nesinusoidale care să aibă un coeficient de formă egal cu 1,11.

• Coeficientul de vârf

Coeficientul de vârf este definit ca raportul dintre valoarea maximă (amplitudinea) I_{max} a curbei nesinusoidale periodice și valoarea efectivă I_{ef} a funcției:

$$k_v = \frac{I_{max}}{I_{ef}} \quad (2.32)$$

Pentru o curbă sinusoidală coeficientul de vârf are valoarea $\sqrt{2}$. În cazul în care $k_v < \sqrt{2}$ curba este turtită, iar pentru $k_v > \sqrt{2}$ rezultă o curbă ascuțită. Coeficientul de vârf prezintă valori puternic dependente de defazajul componentelor armonice. Astfel, de exemplu, două curbe cu aceeași componentă armonică dar cu defazaje diferite prezintă valori distincte ale coeficientului de vârf. De aceea coeficientul de vârf nu poate fi considerat unic indicator al regimului deformant.

- **Coefficientul de distorsiune**

Coefficientul de distorsiune este un criteriu sintetic ce pune în evidență, în special, efectele termice diferite ale curbelor periodice sinusoidale.

Coefficientul de distorsiune se definește ca raportul dintre reziduul deformant F_d și valoarea efectivă a curbei :

$$k_d = \frac{F_d}{F_{ef}} \quad (2.33)$$

Coefficientul de distorsiune (notat și δ) nu poate fi adoptat ca unic indicator al regimului deformant, deoarece două curbe cu aceeași compoziție armonică și având deci același coeficient de distorsiune, pot avea forme diferite în funcție de defazajele armonicilor componente în raport cu fundamentală.

- **Nivelul armonicilor**

Se definește ca nivel al armonicii în raportul:

$$\gamma_n = \frac{F_{efn}}{F_{ef1}} \quad (2.34)$$

în care F_{efn} și F_{ef1} sunt valorile efective ale armonicii de rang n și respectiv ale fundamentalei.

- **Conținutul în fundamentală**

Se definește ca fiind raportul dintre valoarea efectivă a fundamentalei unde și valoarea efectivă a mărimii periodice, mai puțin pătratul componentei continue, adică

$$v_1 = \frac{F_{ef1}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} F_{efn}^2}} \quad (2.35)$$

- **Coefficientul de deformare**

Este definit ca fiind media aritmetică a modulelor diferențelor între valorile momentane ale curbei deformate și valorile momentane corespunzătoare ale fundamentalei, diferențe raportate la amplitudinea fundamentalei :

$$k_d = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|f(t) - f_1(t)|}{F_{max1}} dt \quad (2.36)$$

- **Valoarea medie redresată**

Este valoarea medie pe o perioadă a modulului funcției periodice :

$$F_{med\ redr} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt \quad (2.37)$$

- **Coefficientul de deviație de tensiune sau curent**

$$k_{dev} = \frac{1}{F_{ef1}} \sum_{n=2}^{\infty} F_{efn} \quad (2.38)$$

Coefficientul de deviație este utilizat în unele cazuri în locul coeficientului de distorsiune.

2.2.2.3. Puteri și energii în rețelele electrice poluate armonice

Definirea puterilor în regim deformant a reprezentat și reprezintă și în prezent o problemă ce suscită discuții în rândul specialiștilor. Este meritul recunoscut al școlii românești de electrotehnică de a prezenta definiții coerente, larg acceptate pe plan internațional [36], [37], [101], [102], [103], [104].

Și în lucrarea de față au fost adoptate aceste definiții. Mai precis, este vorba de cele elaborate de Acad.prof.ing. Constantin Budeanu, bazate pe separarea puterii aparente în trei componente ortogonale, definiții prezentate pe scurt în cele ce urmează.

• Puteri electrice în circuite monofazate

Puterea activă transferată printr-o secțiune a unei rețele electrice poluate armonice se definește similar cu cazul regimului sinusoidal, ea fiind valoarea medie a puterii instantanee:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (2.39)$$

Dacă în relația de definiție se introduc relațiile pentru curbele de tensiune și curent electric în secțiunea respectivă a rețelei poluate armonice, adică:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \alpha_n) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{efn} \sin(n\omega t + \alpha_n) \\ i(t) &= I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \beta_n) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{efn} \sin(n\omega t + \beta_n) \end{aligned} \quad (2.40)$$

se obține:

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} \cdot I_{efn} \cdot \cos \varphi_n \quad (2.41)$$

unde U_n , I_n sunt amplitudinile armonicilor de tensiune, respectiv de curent, de rang n ;

U_{efn} , I_{efn} – valorile efective ale armonicilor de tensiune, respectiv de curent, de rang n ;

U_0 , I_0 – componentele continue ale curbei de tensiune respectiv de curent electric;

α_n , β_n – unghiul de defazaj al armonicii de tensiune, respectiv de curent electric de rang n , în raport cu o axă de referință cuprinsă în planul armonicii de rang n .

$$\varphi_n = \alpha_n - \beta_n$$

Expresia (2.41) a puterii active poate fi scrisă și sub forma:

$$P = P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2.42)$$

Într-un circuit monofazat cu elemente concentrate, puterea activă transferată se regăsește ca puterea disipată în rezistoarele circuitului, conducând la încălzirea acestora. Dacă rezistența electrică a circuitului este r (admisă într-o primă aproximație independentă de rangul armonicii), puterea disipată poate fi scrisă sub forma:

$$P = r \cdot I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} r \cdot I_{efn}^2 = r \cdot I_{ef}^2 \quad (2.43)$$

Puterea reactivă într-un circuit monofazat poluat armonice este definită prin expresia:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} \cdot I_{efn} \cdot \sin \varphi_n = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.44)$$

Această expresie poate fi dedusă pe baza principiului formulat de acad.prof.ing. Constantin Budeanu de descompunere a puterii aparente în trei componente ortogonale [37]. Pe baza expresiilor (2.40) ale tensiunii și curentului electric într-un nod al rețelei, *puterea aparentă* transferată rezultă:

$$S^2 = \sum_{n=0}^{\infty} U_{efn}^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_{efn}^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \left(U_{fn} I_{fn} \cos \varphi_n \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(U_{fn} I_{fn} \cos \varphi_n \right)^2 + \sum_{\substack{k,l=1 \\ k \neq l}}^{\infty} \left(U_{efk}^2 I_{efl}^2 + U_{efl}^2 I_{efk}^2 - 2U_{efk} U_{efl} \cos \varphi_{kl} \right) \quad (2.45)$$

Expresia (2.45) pune în evidență cele trei componente ortogonale ale puterii aparente: activă, reactivă și deformantă:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.46)$$

Puterea deformantă a cărei expresie este indicată în relația (2.45) apare în rețelele poluate armonice, independent de prezența puterii reactive. Unitatea sa de măsură este “volt amper deformant” *vard*. Puterea deformantă are valoarea nulă în regimurile sinusoidale și în cazul în care armonicile de tensiune și curent sunt caracterizate de relația:

$$\frac{U_k}{I_k} = \frac{U_l}{I_l} = \frac{U_n}{I_n} = \dots \quad (2.47)$$

$$\varphi_k = \varphi_l = \varphi_n = \dots$$

Puterea deformantă fazorială elementară se poate scrie:

$$D_{kl} = U_{efk} \cdot I_{efl} \cdot e^{j(\alpha_k + \beta_l)} - U_{efl} \cdot I_{efk} \cdot e^{j(\alpha_l + \beta_k)} = \frac{1}{2} (\underline{U}_k \underline{I}_l - \underline{U}_l \underline{I}_k) \quad (2.48)$$

în care:

$$\begin{aligned} \underline{U}_k &= \sqrt{2} \cdot U_{efk} \cdot e^{j\alpha_k} & \underline{U}_l &= \sqrt{2} \cdot U_{efl} \cdot e^{j\alpha_l} \\ \underline{I}_k &= \sqrt{2} \cdot I_{efk} \cdot e^{j\beta_k} & \underline{I}_l &= \sqrt{2} \cdot I_{efl} \cdot e^{j\beta_l} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Calculul puterii deformante se poate face pe baza unor relații aproximative în următoarele cazuri:

1. dacă tensiunea la bornele consumatorului este practic sinusoidală sau coeficientul de distorsiune al acestuia $k_{du} \leq 20$ %:

$$D \cong U_{ef} I_d \quad (2.50)$$

unde I_d este valoarea efectivă a reziduiului deformant;

2. dacă tensiunea la bornele consumatorului este nesinusoidală cu $k_{du} \geq 20$ % puterea deformantă poate fi dedusă din relația aproximativă:

$$D = U_{ef} I_d + U_d I_{ef} \quad (2.51)$$

Puterea fictivă în regim nesinusoidal este definită prin relația:

$$W = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{Q^2 + D^2} \quad (2.52)$$

Unitatea de măsură propusă pentru cuantificarea puterii fictive este “volt amper reactiv deformant”, *vard*.

- **Puteri electrice în rețele electrice trifazate echilibrate și simetrice**

Deoarece pe fiecare fază, pentru fiecare armonică, defazaajul între curba de tensiune și de curent este același (având în vedere ipoteza unui regim simetric și echilibrat), puterea activă trifazată va rezulta:

$$P_{3f} = P_a + P_b + P_c = 3 \sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} \cdot I_{efn} \cdot \cos \varphi_n = 3 \cdot P_f \quad (2.53)$$

în care s-au notat $P_a = P_b = P_c$ puterile active transmise pe fazele a, b, c dintr-o secțiune a rețelei.

În mod similar, puterea reactivă rezultată din rețea:

$$Q_{3f} = Q_a + Q_b + Q_c = 3 \sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} \cdot I_{efn} \cdot \sin \varphi_n = 3 \cdot Q_f \quad (2.54)$$

Puterea deformantă trifazată rezultă sub forma:

$$D_{3f} = \sqrt{\sum_{\substack{k,l=1 \\ k \neq l}}^{\infty} \left[\left(U_{efk}^a \right)^2 \left(I_{efl}^a \right)^2 + \left(U_{efl}^a \right)^2 \left(I_{efk}^a \right)^2 - 2 U_{efk}^a \cdot U_{efl}^a \cdot I_{efk}^a \cdot I_{efl}^a \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_l) \right]} \cdot \left[1 + 2 \cos(k+l) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (2.55)$$

Dar $D_{3f} < 3 \cdot D_f$.

În cazul particular în care curba de tensiune este sinusoidală sau puțin deformantă ($k_{du} < 20\%$), puterea deformantă trifazată poate fi dedusă din relația aproximativă:

$$D_{3f} \cong U_{ef} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{efk}^2 \left[1 + 2 \cos(k+l) \frac{2\pi}{3} \right]^2} \quad (2.56)$$

sau

$$D_{3f} \cong 3 U_{ef} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{ef(3p-1)}^2} < 3 U_{ef} I_d \quad (2.57)$$

Puterea aparentă trifazată este definită de relația:

$$S_{3f} = \sqrt{P_{3f}^2 + Q_{3f}^2 + D_{3f}^2} < 3 S_f \quad (2.58)$$

Puterea fictivă trifazată rezultă din relația:

$$W_{3f} = \sqrt{S_{3f}^2 - P_{3f}^2} < 3 W_f \quad (2.59)$$

Deși este contestată din ce în ce mai insistent, definiția acad.prof.ing. Constantin Budeanu, ce a fost enunțată în anul 1927, prezintă următoarele avantaje principale:

- permite măsurarea directă a puterilor activă, reactivă și deformantă în rețelele electrice (de exemplu, utilizând aparatele de concepție românească PQD-metru pentru măsurarea de puteri și energii active, reactive și deformante, sau C-metru pentru măsurarea puterilor aparente, active și fictive și în ultima vreme instrumente virtuale specializate);
- verifică principiul de conservare algebrică a puterilor activă, reactivă și deformantă elementare și de conservare vectorială a puterilor deformantă și aparentă;
- asigură corespondența dintre proprietățile de conservare ale puterilor activă, reactivă și cele ale valorilor medii ale puterii [37].

2.2.3. Condiții de determinare a mărimilor caracteristice

În cazul armonicilor quasi-staționare (lent variabile) este posibil să se facă o analiză continuă, fără intervale de timp între măsurătorile succesive. Este de exemplu cazul măsurării curenților armonici constanți sau a observațiilor de lungă durată dacă se neglijează efectul instantaneu al armonicilor.

Armonicile fluctuante reclamă o analiză quasi-continuu în timp real. Este cazul măsurării curenților armonici fluctuanți datorăți acționărilor electrice cu motoare cărora li se modifică viteza sau sensul de rotație sau aparatelor electrocasnice echipate cu regulatoare electronice și de control al etapelor. Aceeași metodă de analiză se aplică la supravegherea tensiunii rețelelor industriale.

Dacă armonicile sunt rapid variabile sau se manifestă sub forma unor trenuri scurte de armonici este absolut obligatorie o tratare în timp real.

Dezvoltarea metodelor respectiv a mijloacelor de determinare a mărimilor caracteristice regimului deformant s-a făcut simultan, astfel încât la ora actuală singurele instrumente capabile să satisfacă necesitățile în acest domeniu, sunt instrumentele digitale. Rezultatele măsurătorilor, datorită naturii lor stochastice, pot varia mult timp, motiv pentru care se impune o analiză statistică a lor ([57], [65]).

În România, reglementările în acest domeniu sunt stabilite de normativul PE 143/1994 ([113]), în care abordarea statistică este în conformitate cu recomandările CIE. Astfel, intervalele de timp recomandate pentru a fi utilizate în prelucrările statistice ale rezultatelor măsurătorilor în regimul deformant, sunt:

- T_{vs} - interval de timp foarte scurt - 3 secunde;
- T_s - interval de timp scurt - 10 minute;
- T_l - interval de timp lung - 1 oră (opțional);
- T_d - interval de timp zilnic - 1 zi;
- T_w - interval de timp săptămânal - 1 săptămână.

a) Intervalul de timp foarte scurt (T_{vs}), corespunzând primului nivel de integrare, este considerat ca fiind o bază statistică a studiului regimului deformant. Pentru fiecare interval de trei secunde se determină valoarea efectivă a tensiunii armonice (valoarea medie pătratică), calculând transformata Fourier pe fiecare armonică, pentru cele N eșantioane:

$$U_{nvs} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_{ni}^2}{N}}, \quad N > 1 \quad (2.60)$$

b) Intervalul de timp scurt reprezintă cel de-al doilea nivel de integrare. Pentru fiecare interval de 10 minute se calculează U_{ns} , pentru fiecare armonică, ca valoarea medie pătratică a celor 200 valori U_{nvs} din interval. Valorile obținute prezintă importanță deoarece dau o estimare asupra efectelor termice ale regimului deformant asupra echipamentelor, pentru fiecare armonică.

c) Intervalul de timp lung (1 oră), reprezentând cel de-al treilea nivel de integrare este opțional. Funcția de probabilitate cumulată, determinată pornind de la procentul calculat pe un interval scurt de timp sau de preferat de la informațiile memorate referitoare la componentele spectrale, poate fi calculată pe acest interval de timp cu probabilitate de 1, 10, 50, 90, 95, 99, 99,9%.

d) Intervalul de timp zilnic este considerat ca esențial pentru prezentarea datelor rezultate din prelucrarea statistică în supravegherea armonicilor tensiunilor astfel:

- dacă sunt esențiale efectele instantanee, trebuie memorate valorile maxime înregistrate pe fiecare interval de timp foarte scurt, T_{vs} , din cursul unei zile. În plus, se va calcula curba probabilității cumulate a tuturor acestor valori maxime înregistrate;
- dacă sunt esențiale efectele pe termen lung (efectele termice), se vor memora pe parcursul unei zile, maximele valorilor efective înregistrate pe durata tuturor intervalelor T_{vs} .

e) Intervalul săptămânal nu prezintă un interes special. Se poate recomanda un interval de câteva zile, incluzând un sfârșit de săptămână.

Prelucrarea statistică a rezultatelor măsurătorilor, folosește un model probabilistic în care valorile aleatoare sunt definite printr-o *cuantilă* a repartiției statistice, adică printr-o valoare numerică ce are indicator explicit probabilitatea de a exista valori mai mici sau mai mari decât acestea.

Astfel cuantila x_p a unei variabile aleatoare X se definește cu probabilitatea P de a exista valori mai mici decât x_p :

$$P(X < x_p) = p \quad (2.61)$$

respectiv, cu probabilitatea $(1-p)$ de a exista valori mai mari:

$$P(X > x_p) = 1-p \quad (2.62)$$

Deci, conform teoriei probabilităților, valoarea unei variabile aleatoare poate fi oricare pe domeniul său de definiție, dar unei valori probabile x_p i se pot indica explicit probabilitățile p și $(1-p)$ de a exista valori ale variabilei mai mici, respectiv mai mari.

Pentru cazul regimului deformant, se definește *probabilitatea cumulată 95%* pe baza măsurătorilor efectuate în intervalul de timp cel mai lung de observație (zilnic, câteva zile sau săptămânal). Acesta reprezintă o valoare, corespunzătoare fiecărei armonici, care nu este depășită pe un număr de intervale de 3 secunde egal cu 95% din numărul total de intervale de 3 secunde al timpului total de observație.

Valorile astfel stabilite pentru probabilitatea cumulată 95% sunt comparate cu nivelurile de compatibilitate admise de norme.

Cei mai importanți parametri rezultați din prelucrarea statistică a măsurătorilor regimului deformant sunt:

$U_{k,vs,max}$ - valoarea maximă a tensiunii pe intervalele T_{vs} ;

$U_{k,s,max}$ - valoarea maximă a tensiunii pe intervalele T_s ;

$U_{k,vs,95\%}$ - valoarea probabilității cumulate 95%.

Ca parametru global este calculat coeficientul de distorsiune corespunzător fiecărui interval T_x care, la rândul lui, este comparat cu nivelul de compatibilitate corespunzător.

2.2.4. Efectele poluării armonice. Niveluri admisibile

Prezența regimului deformant în rețelele electrice se manifestă printr-o multitudine de influențe negative asupra instalațiilor și echipamentelor furnizorilor și utilizatorilor prin faptul că acestea au fost concepute, proiectate și realizate în general în condiții care corespund regimului sinusoidal.

Principalele efecte ale poluării armonice se regăsesc expuse într-o formă prescurtată, în tabelul 2.1., alături de gradele de imunitate, nivelele admise pentru tensiunile armonice și reglementările în care sunt acestea precizate, pe tipuri de echipamente și instalații.

Tabelul 2.1. Efectele poluării armonice și nivelurile admisibile.

Nr. crt.	Echipamentul	Natura inconvenientelor date de tensiunile armonice	Grade de imunitate sau niveluri adm. pentru tensiunile armonice
1.	Mașini sincrone	-Încălziri suplimentare în înfășurările de amortizare. -Cupluri parazite. -Pierderi suplimentare în înfășurările statorice și în cele de amortizare.	$\left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{n} \right)^2 \right]^{1/2} \leq (1,3...2,4)\%$ (după mărimea mașinii și valoarea impedanței inverse, conform CIEI 34-1)
2.	Mașini sincrone	-Încălziri suplimentare, în special în rotoarele bobinate în creștături adânci. -Cupluri pulsatorii. -Pierderi suplimentare în înfășurări. -Reducerea randamentului.	$\left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{n} \right)^2 \right]^{1/2} \leq (1,5...3,5)\%$ (după mărimea mașinii și valoarea impedanței inverse, conform CIEI 34-1)
3.	Transformatoare	-Pierderi suplim. în înfășurări și în fier. -Riscuri de saturație în prezența componentelor continue.	Conform STAS 1703
4.	Condensatoare statice	-Încălziri suplimentare. -Scutirea duratei de viață. -Îmbătrânire prematură	$\left[\sum_{n=2}^{\infty} n^2 \cdot U_n^2 \right]^{1/2} \leq 83\%$
5.	Contoare de energie electrică cu inducție	Leșirea din clasa se precizie.	Neprecizată însă cert, foarte ridicată.
6.	Regulatoare de tensiune	Denaturarea tensiunilor de consemn.	$\frac{U_n}{n} \leq (1,5 - 2)\%$ (n - impar)
7.	Relee de protecție	Declanșări intempestive.	$U_3 \leq 7\%$, $U_4 \leq 1,5\%$, $U_5 \leq 8\%$ (conform CENELEC EN 50006)
8.	Relee de telecomandă	Risc de declanșare intempestivă.	$U_3 \leq 7\%$, $U_4 \leq 1,5\%$, $U_5 \leq 8\%$ (conform CENELEC EN 50006)
9.	Electronica de putere	Dificultăți legate de sistemul de comutație, sincronizare etc.	$\sum_{n=2}^{\infty} U_n \leq 5\%$; $\frac{100}{\sqrt{2}U_{ef}} \left[\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right]^{1/2} \leq 10\%$ (conform NF4 70-100 și VDE 0160/2)
10.	Calculatoare electronice	Perturbații funcționale, de exemplu, cupluri pulsatorii ale motoarelor de antrenare ale suporturilor magnetice.	$\frac{100}{\sqrt{2}U_{ef}} \sum_{n=2}^{\infty} U_n \leq 7\%$; $\frac{100}{\sqrt{2}U_{ef}} \left[\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right]^{1/2} \leq 5\%$ (conform prevederilor firmelor producătoare)
11.	Lămpi cu descărcări în gaze	Risc de pâlpâire datorat armonicii de rang 2.	$\frac{U_1}{U_d} \leq 3\%$
12.	Televizoare	Deformarea imaginii	Conform CIEI 100-3-2 (1995)
13.	Linii electrice aeriene	Pierderi suplimentare	Conform normelor CIEI.
14.	Linii electrice subterane	-Pierderi suplimentare mai ales în cazul cablurilor cu conductor neutru, parcurse de armonicile de rang 3n. -Deteriorări determ. de pierderi diel. crescute dat. distors. curbei de tensiune. -Corodarea cablurilor din aluminiu datorită circulației curenților de rang par și a componente continue.	Conform normelor CIEI.
15.	Linii de telecomunicații	Zgomot de fond.	$I \leq 25$ kA; $TH \leq 20\%$.

Notă: U_{ef} este valoarea efectivă a tensiunii nesinusoidale pe fază

Surse: CIEI-Comission Électrotechnique Internationale; CENELEC-Comité Européen de Coordination des Normes Électrotechniques; NF-Normalisation Française; VDE-Verband Deutschen Electrotechniker.

În abordarea problemei limitelor impuse regimului nesinusoidal se pornește de la constatarea că unele inconveniente corespund unui efect instantaneu sau evasiinstantaneu, iar altele unui efect cumulativ, implicând o anumită durată de existență a fenomenului perturbator. De exemplu, electronica de putere și releistica manifestă sensibilitate la efectele instantanee sau de foarte scurtă durată, în timp ce condensatoarele, mașinile electrice rotative și conductoarele izolate sunt sensibile numai când efectele se cumulează pe durate mai lungi de timp (efecte termice, de pildă).

Fixarea limitelor perturbațiilor date de componentele armonice de tensiune și de curent prin norme cu caracter global, constituie o preocupare continuă pe plan internațional.

În România, normativul PE-143/94, fixează limitele parametrilor regimului deformant în punctele de delimitare dintre rețeaua furnizorului și cea a consumatorilor sau, după caz, în punctele de racord ale acestora. Astfel, coeficientul de distorsiune al tensiunii (δ_u) este limitat la:

- 8% pentru j.t. și m.t.;
- 3% pentru î.t.,

în timp ce nivelurile armonicilor de tensiune sunt limitate la valorile din tabelul 2.2.

Tabelul 2.2. Nivelurile limită de compatibilitate pentru nivelul armonicilor de tensiune individuale pentru rețele de j.t., m.t. și î.t. (în % din fundamentală), conform CIE 1000-2-2/90

Armonici impare nemultiplu de 3			Armonici impare multiplu de 3			Armonici pare		
rang	γ_U [%]		rang	γ_U [%]		rang	γ_U [%]	
n	j.t.-m.t.	î.t.	n	j.t.-m.t.	î.t.	n	j.t.-m.t.	î.t.
5	6	2	3	5	2	2	2	1,5
7	5	2	9	1,5	1	4	1	1
11	3,5	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	3	1,5	21	,2	0,2	8	0,5	0,2
17	2	1	>21	0,2	0,2	10	0,5	0,2
19	1,5	1				12	0,2	0,2
23	1,5	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,5	0,7						
>25	$0,2+1,3 \cdot 25/n$	$0,2+0,5 \cdot 25/n$						

Prin același normativ este limitat regimul deformant din curenți. Valorile maxime ale coeficientului de distorsiune al curenților (δ_I) și ale nivelurilor armonicilor de curent (γ_I) impuse consumatorilor, sunt date în tabelul 2.3.(conform ANSI/IEEE-519/1981).

Tabelul 2.3. Nivelurile limită de compatibilitate pentru armonicile de curent (în% din fundamentală).

I_{sc}/I_s	Ordinul armonicilor n					Coef. de distorsiune γ_I [%]
	<11	11-16	17-22	23-24	≥ 35	
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

I_{sc} - curentul de scurtcircuit în punctul de delimitare dintre furnizor și utilizator;

I_s - curentul nominal la frecvența fundamentală corespunzător sarcinii conectate.

Limitele de imunitate ale echipamentelor sensibile la perturbații nu au fost definite până în prezent, pe plan intern.

În majoritatea prevederilor și recomandărilor acceptate pe plan național și internațional sunt definite distorsiunile maxime admise, cu referire, în special, la doi indicatori cu caracter global, ce nu vizează anumite echipamente sau efecte specifice. Acești indicatori sunt:

- coeficientul (global) de distorsiune a tensiunii;
- nivelul armonicilor de tensiune.

Atunci când apar simultan mai multe armonici, efectul combinat al acestora se exprimă în general printr-o expresie de ponderare, particularizată.

S-a constatat experimental că un raport global de distorsiune de tensiune mai mic de 5% nu provoacă reclamații din partea consumatorilor. Un raport cuprins între (5÷10)% ridică anumite probleme particulare semnalate de consumatori, iar de la 10% în sus au apărut întotdeauna probleme. Este deci necesar ca rapoartele, global și individual de armonice de tensiune într-un punct al unei rețele electrice, rezultând din combinarea mai multor surse de armonice, să fie cuprinse între (5÷10)%. Se estimează că o valoare mai mare de 5% este admisibilă dacă tensiunile armonice generate de fiecare sarcină individuală în punctul său de racord la rețea, nu depășesc valorile:

$\gamma_{U_n} = 1\%$ - dacă ordinul armonicii este impar;

$\gamma_{U_n} = 0,6\%$ - dacă ordinul armonicii este par.

$$\sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} = 1,6\%$$

în care $U_n = Z_n \cdot I_n$ - este tensiunea armonică convențională;

U_1 - tensiunea nominală a rețelei (la 50 Hz);

I_n - curentul armonic de rang n măsurat sau predeterminat în conductorul fazei celei mai defavorizate și care străbate impedanța armonică echivalentă Z_n , din punctul de racord.

Z_n - se calculează cu relații aproximative, în funcție de nivelul de tensiune al rețelei:

$$\text{i.t. } Z_n = n \cdot Z_{i.sc} ; \quad \text{m.t. } Z_n = 3 \cdot n \cdot Z_{i.sc} ; \quad \text{\u0162.t. } Z_{kn} = 2 \cdot n \cdot Z_{i.sc} \quad (2.63)$$

$Z_{i.sc}$ fiind impedanța de scurtcircuit de secvență inversă, la 50 Hz, în punctul de racord al consumatorilor deformanți.

Se poate constata că armonicile pare sunt mai sever limitate decât cele impare.

Aceasta deoarece acestea din urmă sunt foarte deranjante, în special pentru lămpile cu descărcări (chiar pentru valori de amplitudine inferioare lui 1%). Ele sunt adesea însoțite de componente continue, susceptibile de a provoca fenomene de saturație în circuitele magnetice ale mașinilor electrice.

2.2.5. Măsurile pentru prevenirea și limitarea regimului deformant

Pentru prevenirea apariției regimului deformant, caracterizat prin niveluri ale parametrilor caracteristici peste limitele admisibile, se vor studia încă din faza de proiectare soluții general valabile:

- alegerea unor aparate caracterizate printr-un nivel scăzut al curenților armonici generați;
- amplasarea preferențială din punct de vedere al alimentării cu energie electrică, în zone de rețea cu puteri mari de scurtcircuit;

sau soluții specifice:

622.710/3668

- cuptoarelor electrice cu arc:
 - creșterea impedanței de scurtcircuit al rețelei de alimentare (de exemplu prin selectarea sau dedicarea unei linii sau a unui transformator pentru racordarea individuală a consumatorului deformant);
- redresoarelor:
 - creșterea numărului de pulsații;
 - alimentarea prin intermediul unor transformatoare cu tensiuni defazate la 30° (conexiune Δ -Y sau Y-Y).

De asemenea pentru prevenirea apariției sau accentuării regimului deformant se impune ca în faza de proiectare să se facă:

- verificarea regimului deformant ce poate apare prin montarea unei noi instalații de utilizare. Se calculează nivelul tensiunilor armonice (γ_n) și coeficientul de distorsiune al tensiunii (δ_n) cunoscând curenții armonici injectați de instalația respectivă și impedanțele armonice (Z_n) ale rețelei în punctul de racord.
- verificarea posibilității apariției de fenomene de rezonanță. Se face de obicei înainte de instalarea unei baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive. Dacă verificările pun în evidență posibilitatea depășirii limitelor parametrilor regimului deformant sau de apariție a fenomenului de rezonanță, va trebui să se adauge o instalație de filtrare dimensionată corespunzător.

Pentru limitarea regimului deformant, atunci când la rețeaua electrică se racordează un consumator generator de perturbații armonice, se aplică următoarele reguli generale:

- consumatorii de mică putere perturbatoare pot fi racordați la rețea fără rezerve;
- consumatorii de puteri perturbatoare mari vor trebui să compenseze regimul deformant, în general prin montarea de filtre de curenți armonici, astfel încât să reducă nivelul de perturbații;
- dacă mai mulți consumatori racordați într-un punct comun de cuplare au respectat fiecare limitele care i-au fost impuse, însă în nodul de rețea respectiv limita globală de perturbații a fost depășită, furnizorul de energie electrică va trebui să ia măsurile necesare pentru a reduce nivelul acestor perturbații.

Instalarea filtrelor de armonici este, cel puțin deocamdată, principala metodă de atenuare a regimului deformant. Aceste filtre se montează la instalațiile noi, în cazurile în care nivelul tensiunilor armonice și al coeficientului de distorsiune al tensiunii, reieșiți din calcule, nu se încadrează în limitele admisibile prevăzute de reglementările în vigoare, iar la instalațiile existente în cazurile în care măsurătorile efectuate pun în evidență depășirea parametrilor regimului deformant sau existența pericolului apariției fenomenului de rezonanță, pe frecvența unuia dintre armonicile prezente.

Stabilirea caracteristicilor instalațiilor de filtrare se face în funcție de:

- valorile curenților și impedanțelor armonice;
- posibilitatea apariției fenomenului de rezonanță;
- puterea reactivă necesară a fi compensată pe fundamentală.

În legătură cu aceste elemente se pot face următoarele precizări:

- Ca regulă generală, instalațiile de filtrare compensare se amplasează cât mai aproape de instalațiile consumatorului deformant. Dacă se justifică tehnic și economic instalațiile de filtrare pot fi amplasate în punctul comun de cuplare a mai multor consumatori, caz în care ele trebuie să asigure filtrarea și respectiv compensarea puterii reactive pe fundamentală pentru toți consumatorii.
- În cazul în care se depășesc valorile admise pentru parametrii regimului deformant, se vor monta *filtre de absorbție*, acordate pe una sau mai multe armonici ce prezintă un nivel

ridicat, urmărind să se obțină un coeficient de distorsiune a tensiunii sub limitele normate. Atunci când măsura respectivă nu este suficientă, se va prevedea de regulă instalarea suplimentară a unui *filtru de refulare* (de interarmonici) pentru reducerea armonicilor de rang diferit de al celor reduse prin filtrele de absorbție.

Țilrul de refulare mai contribuie la eliminarea pericolului de suprasarcini pentru bateria de condensatoare din cadrul filtrului și de supratensiuni aplicate în general echipamentelor rețelei electrice în cazul apariției rezonanței și de asemenea la reducerea supratensiunilor de comutație ce apar la manevra de conectare a condensatoarelor la bare. Ele însă nu contribuie la ameliorarea coeficientului de distorsiune a tensiunii și nici la reducerea circulației de curenți armonici în rețeaua în care sunt montate. De aceea utilizarea lor este restrânsă la cazurile bateriilor de condensatoare de putere mică și la instalațiile existente, la care adaptarea de dezacordare este mai ușor realizabilă.

Dimensionarea filtrelor de armonici constituie obiectul unei ample teorii ([42], [66], [67], [72], [82], [92], [93], [106]). În figura 2.2. se exemplifică, din multitudinea de soluții existente, cu cea adoptată în cazul unui echipament din categoria electronică de putere.

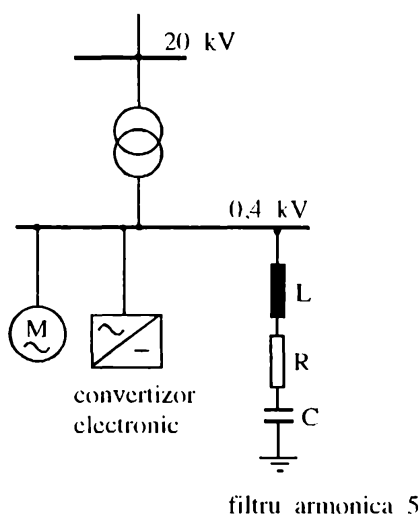


Fig. 2.2. Schema simplificată a alimentării unui consumator deformant și a instalației de filtrare tip FTB 1.

Sistemele moderne de control al nivelului poluării armonice sunt realizate cu filtre pasive, controlate de calculatoare de proces, sau cu filtre active.

A. Sisteme conduse cu calculatoare de proces.

În ultima perioadă au cunoscut o răspândire tot mai largă sistemele moderne de urmărire în timp real a parametrilor de calitate ai energiei electrice (monitorizare). Mai mult decât atât, acestea se pot integra în sisteme cu calculatoare de proces, care, pe baza informațiilor primite, pot comanda sisteme ce includ mijloacele clasice de intervenție pentru încadrarea în limitele admise a parametrilor de calitate ai energiei electrice ([30]).

În ceea ce privește limitarea regimului deformant prin intermediul filtrelor absorbante, conectarea acestora la rețea, în funcție de nivelul armonicilor în curbele tensiunilor, se poate face cu ajutorul întreruptoarelor clasice în cazul unor regimuri staționare sau cu variații lente și cu ajutorul unor întreruptoare statice în cazul unor regimuri cu modificări dese în conținutul de armonici. Aceste sisteme, comandate de calculatorul de proces, fac parte de cele mai multe ori dintr-un ansamblu cu acțiune complexă. În figura 2.3. este indicată schema de principiu a unei instalații destinate rezolvării în mod unitar a menținerii tensiunii în limitele admisibile, a compensării factorului de putere și a limitării regimului deformant într-o instalație industrială.

Schema cuprinde o instalație energetică de reglare ce are prevăzute două baterii de condensatoare, o bobină care permite introducerea unei inductivități variabile și circuite rezonante (filtre de armonici), conectate la rețeaua electrică prin intermediul unor contactoare statice. Contactoarele statice sunt comandate și controlate cu ajutorul unui calculator de proces (C).

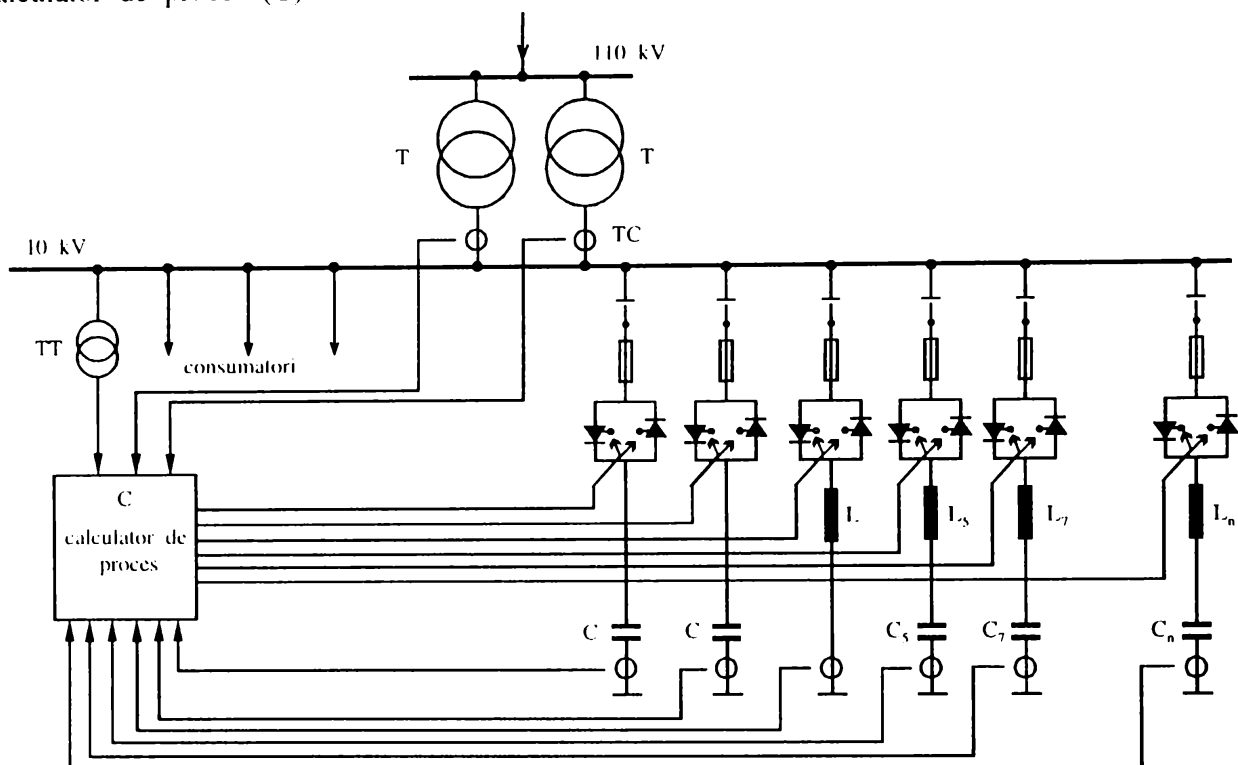


Fig. 2.3. Schema de principiu a unei stații de urmărire a parametrilor de calitate ai energiei electrice pe barele de alimentare ale unui consumator industrial.

În funcție de informațiile obținute din proces (valoarea efectivă a tensiunii pe bare, defazajul între curbele tensiunii și curentului electric total, conținutul în armonici ale curbelor tensiunii și curentului total, coeficientul de distorsiune al curbei tensiunii, etc.), calculatorul transmite o serie de decizii privind configurația instalației de reglare.

Algoritmul de calcul aplicat asigură prioritar aducerea tensiunii în intervalul acceptat prin reglarea puterii reactive de compensare. În cazul în care acest lucru nu este posibil cu mijloacele locale, se transmite solicitarea sistemului ierarhic superior. În secvența următoare, calculatorul de proces urmărește creșterea factorului de putere până la valoarea impusă, prin conectarea circuitelor rezonante, în ordinea crescătoare a rangului armonicii. Dacă factorul de putere, după conectarea tuturor circuitelor rezonante, nu atinge valoarea impusă, sunt conectate și bateriile de condensatoare, în corelare cu bobina de reactanță variabilă.

Sistemele moderne tot mai performante de control al parametrilor de calitate ai energiei electrice permit urmărirea în timp real a nivelului de poluare armonică și adoptarea în fiecare moment a celor mai eficiente mijloace pentru încadrarea nivelului de poluare în limitele acceptabile.

B. Filtre active.

Filtrele active, prin tehnicitatea lor, se află plasate la vârful aplicațiilor electronicii de putere. Prezentăm aici o descriere sumară a principiului lor de funcționare.

Filtrul activ cu sursă de curent (fig. 2.4.a.) asigură un curent i_{Rf} astfel încât curentul i_R absorbit din rețeaua de alimentare să fie sinusoidal. Convertizorul Cv este comandat pe baza informațiilor privind forma curentului electric i_{Rs} absorbit de receptorul neliniar și controlează în mod continuu forma curentului electric i_R . Pentru cazul uzual al unor curenți i_{Rs} de formă dreptunghiulară, în figura 2.4.b. este indicată forma curentului i_{Rf} care trebuie să fie absorbit de filtrul activ.

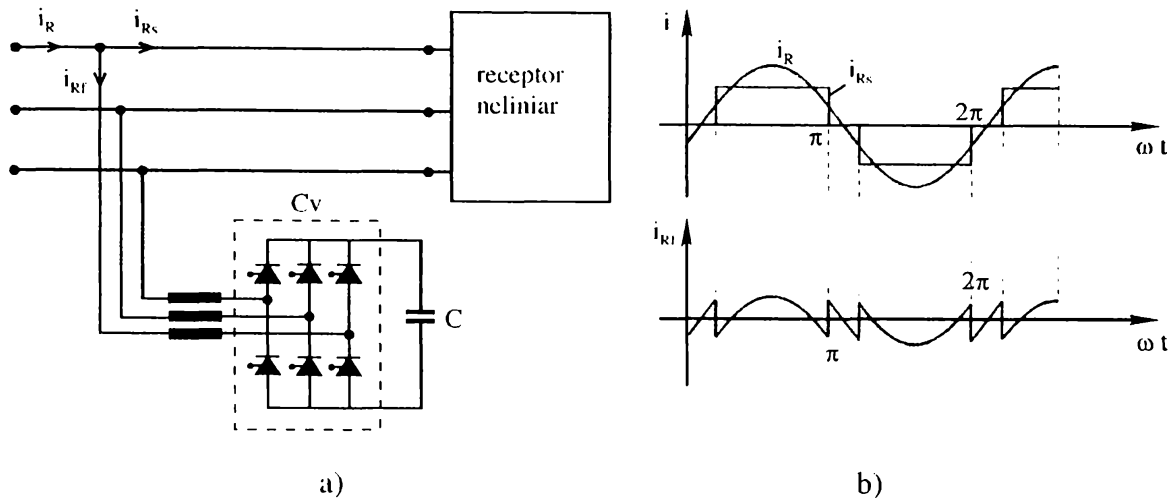


Fig. 2.4. Schema de principiu a filtrului activ cu sursă de curent și formele curentilor electrice din circuit.

Principalul dezavantaj al acestui filtru constă în faptul că trebuie să aibă o putere nominală de circa jumătate din puterea nominală a receptorului neliniar. Acest lucru, în cazul receptoarelor de putere mare conduce la costuri ridicate dar și la un răspuns lent al filtrului la modificări ale spectrului curentului electric absorbit de receptorul deformant.

Filtrul activ cu sursă de tensiune (fig.2.5) se montează în prezența filtrelor pasive (absorbante) F5, F7, F11, etc., care corespund armonicilor celor mai importante din spectrul curentului electric absorbit de receptorul neliniar.

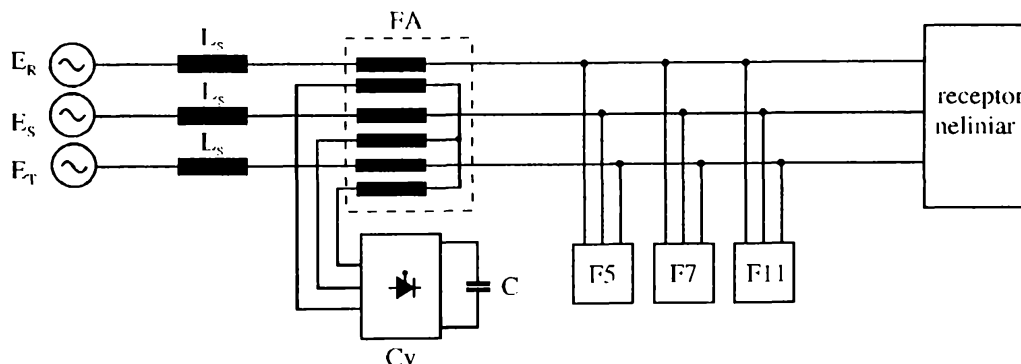


Fig. 2.5. Schema de principiu a filtrului activ cu sursă de tensiune.

Convertizorul Cv este astfel comandat încât să determine, în serie cu sursele sinusoidale ale sistemului de alimentare, tensiuni electromotoare care să compenseze căderile de tensiune determinate în rețeaua electrică de armonicile necompensate de filtrele pasive.

Filtrul activ, în această configurație, are o putere nominală de câteva procente din puterea nominală a receptorului neliniar și deci un timp de răspuns redus la modificări ale spectrului armonic al curentului electric absorbit de receptorul neliniar.

2.3. Regimul permanent dezechilibrat

Dezechilibrele tensiunilor în rețelele electrice pot avea ca origine fie rețeaua însăși, dacă ea nu este construită simetric, fie sarcinile alimentate, dacă ele nu absorb curenți echilibrați pe cele trei faze, considerate simultan.

Consecința cea mai nefavorabilă a dezechilibrului de tensiune este circulația componente suplimentare de curent (componenta de secvență inversă) în mașinile electrice rotative de curent alternativ. Această perturbație are însă multiple alte dezavantaje și cunoaște o amploare tot mai mare, studiile evidențiind faptul că daunele pe care le produce în instalațiile de distribuție și utilizare a energiei electrice, o plasează pe locul doi după cele datorate abaterii valorilor tensiunilor față de limitele admisibile [42].

2.3.1. Originea dezechilibrelor

O primă cauză a dezechilibrelor notabile provine de la rețeaua electrică propriu-zisă: de pildă dispoziția spațială nesimetrică a conductoarelor liniilor electrice aeriene se traduce prin diferențe de impedanțe pentru fazele rețelei, constituind astfel o sursă de dezechilibre. O simplă transpunere din loc în loc a conductoarelor liniilor aeriene, permite reducerea acestui dezechilibru până la nivelul la care el devine neglijabil.

Cauza principală a dezechilibrelor din rețelele electrice provine din alimentarea receptoarelor, ele însele dezechilibrate, în majoritatea cazurilor fiind de tip monofazat, racordată în două faze ale rețelei sau între o fază și nul.

Multe din sarcinile dezechilibrate provin de la consumatori casnici și sociali-edilitari racordați la rețeaua de joasă tensiune și sunt de puteri mici (de la câțiva zeci de watt până la 5 – 10 kW) și care au o utilizare aleatoare.

Aceste sarcini, racordate între o fază și neutru, provoacă o importantă circulație de curenți în rețelele de joasă tensiune.

Cele mai importante dezechilibre le produc însă consumatorii industriali monofazați de puteri mari, racordați la rețelele electrice de medie tensiune sau înaltă tensiune, cum sunt de pildă instalațiile de sudură (de puteri cuprinse între 100 kVA și 3 MVA), cuptoarele electrice monofazate, stațiile de transformare pentru alimentarea tracțiunii feroviare etc. Dezechilibrele provocate de aceste sarcini sunt însoțite de cele mai multe ori și de alte forme de perturbații: armonici, variații mari de tensiune, fluctuații de tensiune, goluri de tensiune etc. ([75], [77]).

2.3.2. Mărimi caracteristice

În studiul matematic al sistemelor trifazate dezechilibrate se utilizează metoda componentelor simetrice. Aceasta se bazează pe descompunerea sistemelor de mărimi trifazate nesimetrice (tensiuni, curenți, impedanțe etc.) în trei sisteme de componente simetrice: de secvență directă (pozitive), de secvență inversă (negative), de secvență homopolară (zero) și pe principiul suprapunerii efectelor. Astfel, calculul unui regim al unei scheme trifazate simetrice se reduce la calculul regimurilor celor trei scheme simetrice rezultate prin descompunerea primului: schemele echivalente de secvență directă, inversă și homopolară.

Această metodă, fundamentată de *teorema componentelor simetrice*, o datorăm contribuțiilor lui A.Blondel, Fortescue și L.G. Stockvis ([39], [83], [95], [100]).

După cum se știe, trecerea de la mărimile naturale ale circuitelor trifazate (tensiuni sau curenți de fază sau linie, impedanțe de fază, longitudinale sau transversale, proprii sau mutuale) la componentele lor simetrice (de secvență), se face cu ajutorul transformării liniare și omogene, numită *transformata Stockvis - Fortescue*. Astfel, fiind dată matricea coloană a unor mărimi trifazate, matricea coloană corespunzătoare componentelor simetrice ale acesteia este dată, de exemplu, pentru tensiuni, de relația:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_d \end{bmatrix} = [\mathbf{a}] \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

în care $\underline{U}_R, \underline{U}_S, \underline{U}_T$ sunt cele trei tensiuni de fază, iar $\underline{U}_h, \underline{U}_i, \underline{U}_d$ componentele de secvență ale acestora. Matricea $[\mathbf{a}]$ este matricea de transformare;

$$[\mathbf{a}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

în care $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ este un fazor (operatorul de rotație în planul complex al reprezentărilor fazoriale ale mărimilor sinusoidale sinerone) denumit *operatorul Stockvis*.

Pentru transformarea inversă, care permite exprimarea mărimilor naturale în funcție de componentele lor simetrice, legătura este:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = [\mathbf{a}]^{-1} \begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

în care:

$$[\mathbf{a}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Calculul puterilor aparente în cele trei scheme echivalente de secvență se face cu relația:

$$\begin{aligned} \underline{S}_h &= 3 \cdot \underline{U}_h \cdot \underline{I}_h^* \\ \underline{S}_d &= 3 \cdot \underline{U}_d \cdot \underline{I}_d^* \\ \underline{S}_i &= 3 \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{I}_i^* \end{aligned} \quad (2.68)$$

Puterea aparentă complexă, exprimată în componentele ei simetrice, se poate scrie sub o formă generală astfel:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \begin{bmatrix} \underline{U}_R & \underline{U}_S & \underline{U}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_R^* \\ \underline{I}_S^* \\ \underline{I}_T^* \end{bmatrix} = \underline{U}_R \underline{I}_R^* + \underline{U}_S \underline{I}_S^* + \underline{U}_T \underline{I}_T^* = \left[\underline{U}_h \underline{I}_h^* + \underline{U}_d \underline{I}_d^* + \underline{U}_i \underline{I}_i^* \right] \\ &= \underline{S}_h + \underline{S}_d + \underline{S}_i \end{aligned} \quad (2.69)$$

Este remarcabil faptul că în expresia secvențială a puterii aparente nu apar termeni încrucișați, fapt care permite efectuarea de bilanțuri de puteri, separat pe fiecare secvență în parte, bilanțuri esențiale pentru înțelegerea circulațiilor de puteri în regimuri nesimetrice.

În literatura de specialitate se întâlnesc mai multe definiții pentru parametrii caracteristici ai unui sistem trifazat simetric:

- **Coeficientul de nesimetrie inversă (negativă)**

$$k_{n,l} = \frac{A_i}{A_d} \quad (2.70)$$

în care notația Λ se poate referi fie la tensiuni, fie la curenți.

• **Coeficientul complex de nesimetrie inversă de tensiune** este definit ca raport al reprezentărilor în complex ale componentelor directe și inverse de tensiuni:

$$\underline{k}_{n,l} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{U}_d} = \frac{U_i}{U_d} e^{j\varphi_i} = k_{n,l} \cdot e^{j\varphi_i} \quad (2.71)$$

unde φ_i este decalajul dintre fazorii \underline{U}_i și \underline{U}_d . O formă similară se aplică și în cazul curenților.

• **Coeficientul de nesimetrie de secvență homopolară (zero)**, scris atât pentru tensiuni cât și pentru curenți:

$$k_{n,l} = \frac{A_h}{A_d} \quad \text{sau în complex} \quad \underline{k}_{n,l} = \frac{\underline{A}_h}{\underline{A}_d} \quad (2.72)$$

- **Coeficientul total de nesimetrie**

$$k_{n,l} = k_{ni,l} + k_{nh,l} \quad \text{sau în complex} \quad \underline{k}_{n,l} = \underline{k}_{ni,l} + \underline{k}_{nh,l} \quad (2.73)$$

- **Raportul de nesimetrie**

$$r_{n,l} = \frac{A_{min}}{A_{max}} \quad (2.74)$$

A_{min} fiind valoarea cea mai mică pe cele trei faze, iar A_{max} valoarea cea mai mare.

- **Raportul diferențial de nesimetrie**

$$r_{dnl} = \frac{A_{max} - A_{min}}{2(A_{max} + A_{min})} = 2 \frac{1 - r_{n,l}}{1 + r_{n,l}} \quad (2.75)$$

Rapoartele $r_{n,l}$ și r_{dnl} satisfac următoarele relații:

$$r_{n,l} \geq \frac{1 - k_{n,l}}{1 + k_{n,l}} \approx 1 - 2k_{n,l} \quad \text{dacă} \quad k_{n,l} \ll 1 \quad (2.76)$$

$$r_{dnl} \leq 2k_{n,l} \approx 1 - r_{n,l} \quad (2.77)$$

Pentru aprecierea efectului de nesimetrie asupra consumului propriu tehnologic introdus suplimentar în rețelele electrice de consumatori dezechilibrați, se poate utiliza chiar mărimea puterii, respectiv a energiei active și reactive debitate în sistemul electroenergetic de către receptorul dezechilibrat, astfel:

$$\underline{S}_{nes} = \underline{S}_i + \underline{S}_h = (P_i + P_h) + j(Q_i + Q_h) = P_{nes} + jQ_{nes} \quad (2.78)$$

\underline{S}_{nes} fiind în esență pozitiv, rezultă că sistemul părții reale a puterii \underline{S}_{nes} poate fi interpretat astfel:

- semnul pozitiv arată că receptorul absoarbe putere de nesimetrie din rețeaua electrică de alimentare;
- semnul negativ arată că receptorul generează putere de nesimetrie.

Se observă că la bornele receptorului se poate defini un coeficient de nesimetrie a puterii aparente sub forma:

$$k_{nS} = k_{nU} \cdot k_{nI} \quad (2.79)$$

în care k_{nU} este coeficientul total de nesimetrie de tensiune de fază, iar k_{nI} este coeficientul total de nesimetrie de curent.

Uneori nesimetria produsă de o sarcină dezechilibrată într-o rețea, poate fi determinată cu o bună aproximație prin aplicarea unor relații simplificate.

Să considerăm de exemplu, o sarcină monofazată racordată între fazele R și S ale unei rețele trifazate. Se notează cu:

\underline{Z} – impedanța sarcinii monofazate;

\underline{Z}_d – impedanța echivalentă de secvență directă a rețelei;

\underline{Z}_i – impedanța echivalentă de secvență inversă a rețelei;

$\underline{U}_R, \underline{U}_S, \underline{U}_T$ - cele trei tensiuni între faze și neutru în punctul de racord al sarcinii (punctul de nesimetrie);

$\underline{U}_n, a^2 \underline{U}_n, a \underline{U}_n$ - cele trei tensiuni electromotoare în conexiunea în Y a sursei de alimentare a rețelei;

$\underline{I}_R, \underline{I}_S, \underline{I}_T$ - cei trei curenți pe fazele rețelei, în punctul de racord al sarcinii.

Sarcina fiind racordată între două faze, indiferent care ar fi acestea, $\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$, deci componentele de secvență homopolară ale curentului și tensiunii sunt nule. Relațiile între mărimile de fază și cele de secvență devin:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \underline{I}_d + \underline{I}_i & \underline{U}_R &= \underline{U}_d + \underline{U}_i \\ \underline{I}_S &= a^2 \underline{I}_d + a \underline{I}_i & \underline{U}_S &= a^2 \underline{U}_d + a \underline{U}_i \\ \underline{I}_T &= a \underline{I}_d + a^2 \underline{I}_i & \underline{U}_T &= a \underline{U}_d + a^2 \underline{U}_i \end{aligned} \quad (2.80)$$

Din schemele echivalente de secvență rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{U}_d &= \underline{U}_n - \underline{Z}_d \underline{I}_d \\ \underline{U}_i &= -\underline{Z}_i \underline{I}_i \\ \underline{U}_h &= -\underline{Z}_h \underline{I}_h = 0 \end{aligned} \quad (2.81)$$

Sarcina fiind caracterizată prin relațiile particulare:

$$\begin{aligned} \underline{I}_T &= 0 \\ \underline{I}_R &= -\underline{I}_S = \underline{I} \\ \underline{I} &= \frac{\underline{U}_R - \underline{U}_S}{\underline{Z}} \end{aligned} \quad (2.82)$$

se obține:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= a^2 \underline{U}_n \frac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}} \\ \underline{U}_d &= \underline{U}_n \frac{\underline{Z}_i + \underline{Z}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}} \\ \underline{I} &= \frac{(1 - a^2) \underline{U}_n}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}} \end{aligned} \quad (2.83)$$

Se constată că cu cât sarcina absoarbe o putere mai importantă (\underline{Z} este mai mic), cu atât \underline{U}_i este mai mare și \underline{U}_d mai mică. Se poate deci obține relația pentru coeficientul

de nesimetrie inversă de tensiune:

$$k_{mit} = \frac{U_i}{U_d} = \left| \frac{Z_i}{Z_i + Z} \right| \quad (2.84)$$

Dacă Z_d este foarte puțin diferit de Z_i și este cu mult mai mic decât Z , U_d devine foarte aproape ca valoare de U_n și se obține:

$$k_{mit} = \frac{U_i}{U_d} \approx \frac{U_i}{U_n} \approx \frac{Z_i}{Z} \approx \frac{S_n}{S_{sc}} \quad (2.85)$$

în care S_n este puterea aparentă nominală a sarcinii monofazate:

S_{sc} – puterea de scurtcircuit trifazată a rețelei în punctul de racord al sarcinii monofazate.

Deci raportul de nesimetrie inversă a tensiunii este cu atât mai scăzut cu cât puterea de scurtcircuit trifazat a rețelei în punctul de racord al sarcinii monofazate este mai mare.

Valoarea găsită pentru k_{mit} prin aplicarea relației (2.85) este cu atât mai apropiată de valoarea adevărată, cu cât punctul de racord al sarcinii monofazate se află mai departe de generatoarele sistemului. Este în general cazul rețelei de medie tensiune, unde impedența de scurtcircuit de secvență inversă este practic egală cu impedența de scurtcircuit de secvență homopolară.

2.3.3. Condiții de determinare a mărimilor caracteristice

Caracterizarea completă a regimului dezechilibrat într-o secțiune oarecare a unei rețele se poate face prin măsurători efectuate cu instrumente specializate, în general de tip digital.

Se măsoară și se înregistrează simultan valorile efective și fazele curenților pe cele trei faze și cele trei tensiuni de fază. Conform normelor ([113]), intervalele de măsură sunt aceleași ca și la regimul deformant:

a) *Intervalul foarte scurt* $T_{vs} = 3$ s;

Se calculează valoarea medie pătratică a coeficienților de nesimetrie inversă a tensiunii pentru cele M eșantioane din intervalul T_{vs} :

$$k_{m(vs)} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M k_{nim}^2}{M}} \quad (2.86)$$

b) *Intervalul scurt* $T_s = 10$ min;

Se calculează valoarea medie pătratică $k_{ni(s)}$ luând în considerare toate valorile k_{nim} înregistrate timp de 10 minute.

c) *Intervalul lung* $T_l = 1$ h; este opțional;

d) *Intervalul zilnic* $T_d = 24$ h, oferă următorii parametri importanți:

$k_{m(fs)max}$ – valoarea medie pătratică maximă corespunzătoare tuturor intervalelor T_{vs} ;

$k_{m(s)max}$ – valoarea medie pătratică maximă corespunzătoare tuturor intervalelor T_s ;

$k_{m(vs)max 95\%}$ – valoarea medie pătratică în intervalul de o zi, corespunzătoare probabilității cumulate de 95% (adică valoarea care este depășită numai în 5% din intervalele T_{vs});

$k_{m(vs)max 99\%}$ – valoarea medie pătratică în intervalul de o zi, corespunzătoare probabilității cumulate de 99% (adică valoarea care este depășită numai în 1% din intervalele T_{vs});

Valoarea $k_{m(vs)max 95\%}$ se compară cu valoarea limită admisibilă.

2.3.4. Efectele dezechilibrelor. Niveluri admisibile

Dezechilibrele din sistemele trifazate de curenți, prin apariția componentelor de secvență inversă și homopolară (în rețelele cu conductor neutru), conduc la creșterea pierderilor longitudinale de putere activă în rețelele respective.

Efectul negativ cel mai important al dezechilibrelor de tensiune în rețelele electrice constă în încălzirile datorate pierderilor suplimentare în mașinile electrice rotative de curent alternativ saturate, în apropiere sau în aval de sarcina dezechilibrată, din cauza unor circulații importante de componente inverse de curent în aceste mașini.

Mărimea acestor pierderi suplimentare este direct legată de valoarea tensiunii de secvență inversă.

Dezechilibrele de tensiune induce de asemenea în mașinile electrice rotative cupluri de pornire parazite și în consecință vibrații, mai ales în cazul dezechilibrelor fluctuante mari. Un alt efect al dezechilibrelor de tensiune se referă la convertoarele alternativ-continuu (punțile redresoare) prin apariția de componente continue în spectrul de armonici.

Funcționarea protecțiilor de distanță este perturbată de prezența tensiunii de secvență inversă și homopolară.

Dacă se consideră că circulația componentelor de secvență inversă de curent în mașinile rotative de curent alternativ se traduce, în principal, prin efecte termice (pierderi suplimentare), rezultă că parametrul cel mai semnificativ de care trebuie să se țină seama la proiectarea unei instalații este *valoarea efectivă a puterii aparente debitate*, care se poate defini prin relația:

$$S = \sqrt{\bar{S}_m^2 + \sigma^2} \quad (2.87)$$

în care \bar{S}_m este puterea aparentă medie absorbită de sarcina monofazată;

σ - dispersia puterii debitate de sarcină.

În plus, pentru toate problemele de dezechilibru este important a se ține seama de sarcinile consumatorilor și în special de mașinile electrice de curent alternativ. Acestea participă în mod semnificativ la valoarea puterii de scurtcircuit inversă, care poate fi definită cu raportul:

$$S_{sc\ i} = \frac{U_n^2}{Z_i} \quad (2.88)$$

în care U_n este tensiunea nominală a rețelei;

Z_i - impedanța echivalentă de secvență inversă a rețelei.

În ceea ce privește nivelurile admisibile ale dezechilibrelor, în normative și reglementări se fac precizări numai la cele referitoare la tensiune.

Astfel, în publicația CIEI 34-1-1983 ([65]) se consideră că o rețea electrică este echilibrată dacă componentele de secvență inversă și homopolară ale tensiunii nu depășesc valoarea de 1%. Aceeași publicație recomandă următoarele limite maxime:

- pentru mașinile electrice rotative:
 - 1% pentru tensiunea de secvență inversă, pentru o perioadă lungă;
 - 1,5% pentru o perioadă scurtă de câteva minute.
- pentru convertizoare:
 - 5% pentru tensiunea de secvență inversă.

În ceea ce privește rețelele publice de distribuție de joasă tensiune, UNIPEDI recomandă ca distribuitorii de energie electrică să se îngrijească să corijeze dezechilibrele de tensiune dacă acestea depășeșse valoarea de 2%, care devine deranjantă.

Dezechilibrul natural de tensiune provenind în rețelele electrice de m.t. și j.t. este în general în jurul lui 1%, măsurat în secundarul transformatoarelor de m.t./j.t. Conform CIEI 1000-2-2/1990, nivelul admisibil pentru dezechilibrul de tensiune inversă în rețelele de joasă tensiune este de 2%.

Contribuția rețelei de înaltă tensiune trebuie să fie limitată la 1%. Pentru aceasta trebuie să se țină seama de următoarele aspecte :

- pot exista mai multe surse de dezechilibru la o rețea de înaltă sau foarte înaltă tensiune (tracțiunea electrică feroviară, cupatoare de inducție, cupatoare electrice cu arc etc.);
- există un dezechilibru propriu al rețelei datorită imperfecțiunii construcției sale.

În România, normativul PE 143/94 ([113]) stabilește valorile limită admise pentru coeficientul de simetrie inversă, denumit *coeficient de disimetrie*, notat:

$$k_{ns2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (2.89)$$

în care: A_2 este componenta de secvență inversă a tensiunii sau curentului;

A_1 este componenta de secvență directă a tensiunii sau curentului.

Pentru coeficientul de nesimetrie homopolară, denumit coeficient de asimetrie, se utilizează relația:

$$k_{ns0} = \frac{A_0}{A_1} \quad (2.90)$$

în care A_0 este componenta de secvență homopolară a tensiunii sau curentului.

Nu sunt precizate în acest normativ decât valorile limită admise pentru coeficientul de disimetrie:

- 2% pentru rețelele de joasă tensiune și medie tensiune;
- 1,5% pentru rețelele de înaltă tensiune.

cu precizarea că în nodul de sistem în care se racordează și o substație de alimentare a tracțiunii electrice feroviare, k_{n2} va fi de maxim 2%.

2.3.5. Măsurile pentru prevenirea și limitarea regimului dezechilibrat

Deoarece nesimetriile de tensiune și curent se datorează în primul rând sarcinilor nesimetrice, acțiunile pentru prevenirea și limitarea regimului dezechilibrat sunt îndreptate în majoritatea lor spre acestea.

Din categoria măsurilor pentru prevenirea regimului dezechilibrat, fac parte cele care realizează o simetrizare naturală a sarcinilor. Se pot aminti aici două metode:

- *repartiția cât mai uniformă a sarcinilor monofazate* între fazele rețelei trifazate de alimentare. Este în special cazul consumatorilor casnici și edilitari și în general al celor monofazați alimentați la joasă tensiune;

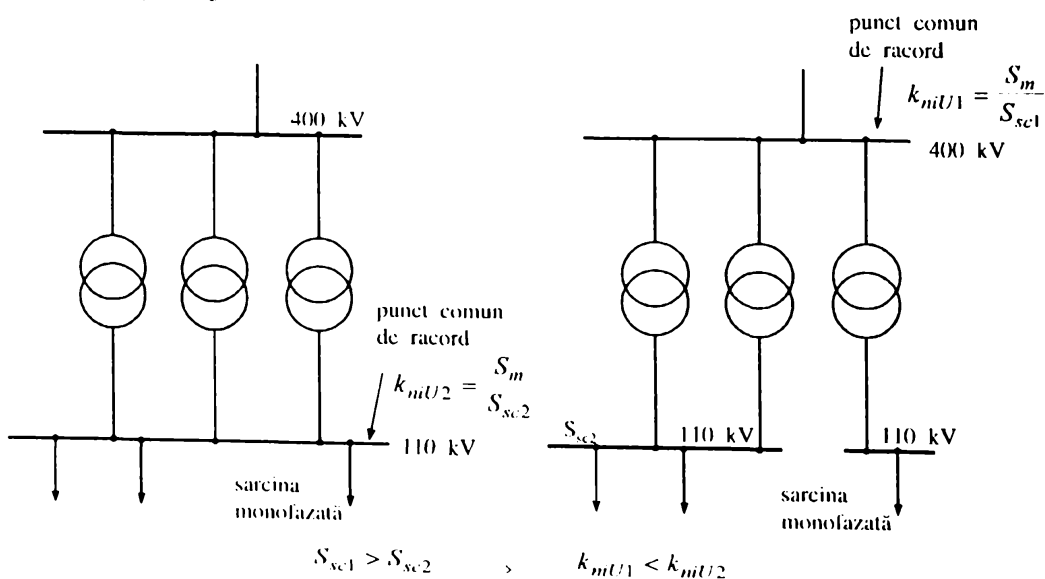


Fig. 2.6 Micșorarea simetriei produse de o sarcină monofazată prin alimentarea separată de la un nivel de tensiune superior.

- *racordarea consumatorilor dezechilibrați la un nivel de tensiune superior, ceea ce în general corespunde soluției de creștere a puterii de scurtcircuit la bornele acestora. Este cazul consumatorilor industriali, de puteri mari (câțiva MVA sau zeci de MVA – cuptoare cu inducție, echipamente de sudură, tracțiune electrică etc.) la care alimentarea se face prin transformatoare proprii, altele decât cele ale celorlalți consumatori cuplați în același punct. Conform relației (2.85) coeficientul de disimetrie al tensiunii va scădea proporțional cu creșterea puterii de scurtcircuit (fig. 2.6).*

Din categoria măsurilor pentru limitarea regimului dezechilibrat fac parte ([58]):

- schemele de simetrizare cu transformatoare monofazate;
- schemele de simetrizare prin compensare (montajul Steinmetz);

Din prima categorie fac parte *montajele Scott și montajul în V.*

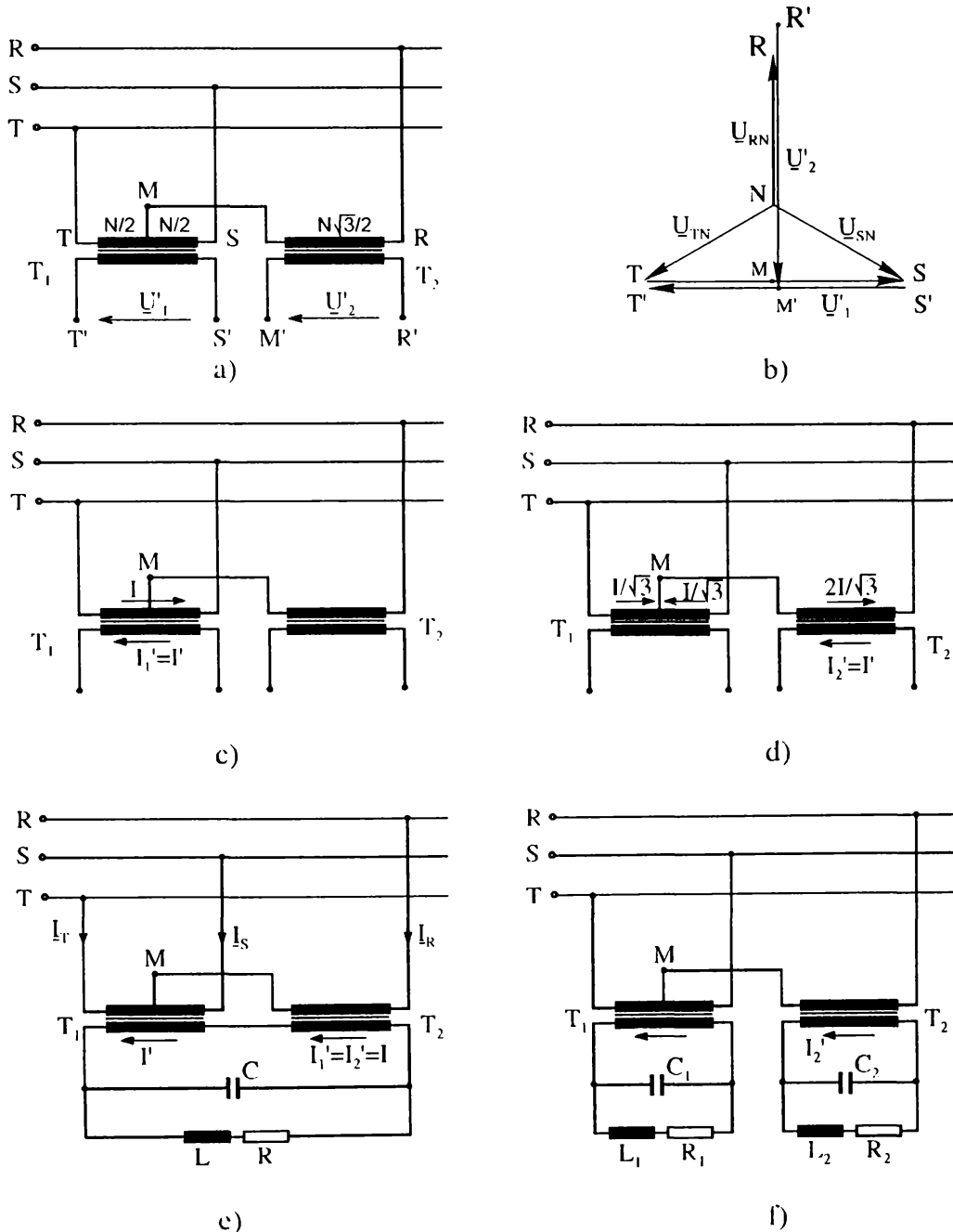


Fig. 2.7. Montajul Scott pentru alimentarea echipamentelor monofazate.

Schema Scott de conectare a două transformatoare monofazate (fig. 2.7.a), asigură obținerea în secundarele acestora a două tensiuni \underline{U}_1 și \underline{U}_2 de amplitudine egală dar defazate cu $\pi/2$ între ele (fig. 2.7.b). Cele două transformatoare au secundarele identice, dar primarele cu un număr diferit de spire. Dacă consumatorul este conectat numai la bornele secundare ale transformatorului T_1 , rețeaua electrică trifazată este încărcată numai pe două faze: S și T în exemplul din figura 2.7.c., iar dacă consumatorul este conectat numai la secundarul transformatorului T_2 , sunt încărcate inegal toate cele trei faze ale rețelei de alimentare (fig. 2.7.d).

În cazurile practice, schema Scott este utilizată pentru alimentarea unui singur echipament (fig. 2.7.e) sau pentru alimentarea a două echipamente (fig. 2.7.f). Schemele echivalente ale acestora sunt reprezentate prin impedanța echivalentă serie $\underline{Z} = R + j\omega L$, iar în paralel cu aceasta este conectată latura de condensatoare de capacitate C, pentru îmbunătățirea factorului de putere.

În cazul unui singur echipament monofazat, curenții electrici absorbiți din rețeaua trifazată de alimentare, obținuți prin suprapunerea curenților din figurile 2.7.c și 2.7.d, rezultă:

$$I_R = \frac{2}{\sqrt{3}}I \quad I_S = \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)I \quad \text{și} \quad I_T = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)I \quad (2.91)$$

În cazul a două echipamente (fig. 2.7.f), dacă se consideră că se asigură compensarea integrală a consumului de putere reactivă (fazorii I_1' și I_2' sunt perpendiculari) iar raportul $I_2'/I_1' = \beta$, rezultă:

$$\underline{I}_R = \frac{2}{\sqrt{3}}\underline{I}_2 \quad \underline{I}_S = -\underline{I}_1 - \underline{I}_2 \quad \text{și} \quad \underline{I}_T = \underline{I}_1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\underline{I}_2 \quad (2.92)$$

sau, în valori absolute,

$$I_R = \frac{2}{\sqrt{3}}\beta I_1 \quad I_S = I_1 \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{3}} \quad \text{și} \quad I_T = I_1 \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{3}} \quad (2.93)$$

Conectarea în V a două transformatoare monofazate identice (fig. 2.8) și alimentarea echipamentelor monofazate cu o tensiune obținută prin înserierea înfășurărilor secundare, permite încărcarea tuturor celor trei faze ale rețelei electrice de alimentare.

Valorile curenților pe cele trei faze sunt:

$$\underline{I}_R = \underline{I} \quad \underline{I}_S = -2 \cdot \underline{I} \quad \text{și} \quad \underline{I}_T = \underline{I} \quad (2.94)$$

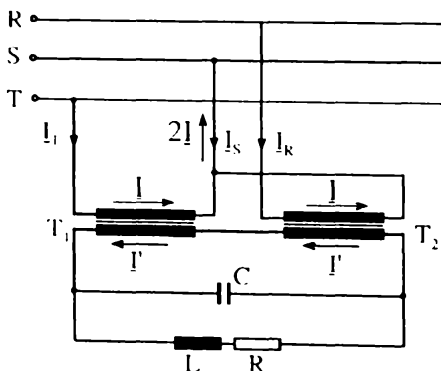


Fig. 2.8. Schema în V pentru alimentarea echipamentelor monofazate.

Utilizarea schemelor cu transformatoare monofazate, deși nu determină încărcarea egală a rețelei trifazate, permite în multe cazuri limitarea nesimetriilor până la valorile acceptate.

Echilibrarea sarcinilor prin compensarea puterii reactive, are la bază *montajul lui Steinmetz* (fig.2.9). Se consideră că transformatorul T, conectat între fazele R și T, asigură procesului tehnologic o putere activă P la un factor de putere inductiv. În paralel cu înfășurarea primară a transformatorului T care alimentează receptorul monofazat (de exemplu un echipament de sudare electrică sau un cuptor de inducție electromagnetică) este

conectată bateria de condensatoare C_1 , dimensionată astfel încât să realizeze un factor de putere unitar (I_{TR} în fază cu \underline{U}_{TR}).

Schema de simetrizare (fig. 2.9) cuprinde bateria de condensatoare C_2 și bobina L_2 . Aceste elemente se dimensionează astfel încât cei trei curenți I_R , I_S și I_T să realizeze un sistem simetric (module egale și defazaj de $2\pi/3$ între fazori) și să fie în fază cu tensiunile de fază corespunzătoare (caracter pur activ).

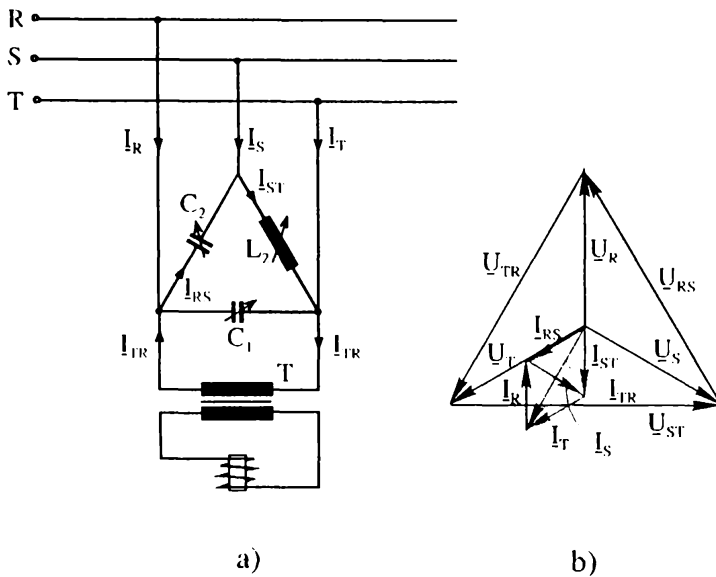


Fig. 2.9. Simetrizarea încărcării unei rețele trifazate ce alimentează un receptor trifazat, prin compensarea puterii reactive - montajul Steinmetz.

Dacă se consideră că sistemul tensiunilor de fază este simetric, având valoarea efectivă a tensiunilor între faze

$$U_{RS} = U_{ST} = U_{TR} = \sqrt{3}U$$

(U valoarea tensiunilor de fază față de un neutru artificial aflat în centrul triunghiului format din fazorii $\underline{U}_{RS}, \underline{U}_{ST}, \underline{U}_{TR}$, pentru schema din figura 2.9.a., se poate construi diagrama fazorială din figura 2.9.b.

Pentru ca cei trei curenți absorbiți de pe fazele din rețea I_R, I_S, I_T să formeze un sistem simetric se impune:

$$I_R = I_S = I_T = I_{RS} = I_{ST} = I_{TR}/3 \quad (2.95)$$

scriind :

$$I_{RS} = \frac{\sqrt{3}U}{X_{C2}} \quad I_{ST} = \frac{\sqrt{3}U}{X_{L2}} \quad \text{și} \quad I_{TR} = \frac{P}{\sqrt{3}U} \quad (2.96)$$

rezultă:

$$\frac{U}{X_{C2}} = \frac{U}{X_{L2}} = \frac{P}{U\sqrt{3}} \quad (2.97)$$

în care s-au notat: X_{C2} - reactanța capacitivă a condensatorului C_2 ;

X_{L2} - reactanța inductivă a bobinei L_2 .

Se obțin:

$$\frac{1}{\omega L_2} = \frac{P}{\sqrt{3}U^2} \quad \text{și} \quad \omega C_2 = \frac{P}{U^2\sqrt{3}} \quad (2.98)$$

sau:

$$B_L = \frac{1}{\sqrt{3}}G \quad \text{și} \quad B_C = -\frac{1}{\sqrt{3}}G \quad (2.99)$$

în care G, B_L și B_C sunt admitanțele corespunzătoare impedanțelor R, X_{L2}, X_{C2} (cu convenția $B > 0$ pentru caracter inductiv, respectiv $B < 0$ pentru caracter capacitiv).

Valoarea capacității C_1 necesară pentru aducerea factorului de putere al sarcinii la valoarea 1 este:

$$C_1 = \frac{P \cdot \operatorname{tg}\varphi}{3 \cdot \omega \cdot U^2} \quad (2.100)$$

de unde:
$$B_{C1} = -\frac{1}{3} B_{L, sarcina} \quad (2.101)$$

în care $\operatorname{tg} \varphi$ corespunde factorului de putere natural al receptorului monofazat.

În cazurile reale, puterea activă P este variabilă în funcție de condițiile specifice procesului tehnologic. Pentru asigurarea simetrizării adaptive a sarcinii monofazate, bateriile de condensatoare având capacitățile C_1 și C_2 și bobina de inductivitate L_2 trebuie să permită reglarea valorilor respective în concordanță cu variația sarcinii.

Aplicarea montajului Steinmetz conduce la o simetrizare perfectă a sarcinii pe cele trei faze. El prezintă însă următoarele inconveniente:

- la frecvența de 50 Hz, ansamblul consumator – compensator se poate echivala cu o impedanță perfect echilibrată însă pe alte frecvențe, respectiv ale armonicilor superioare ce pot fi generate de același consumator sau consumatori apropiați, el provoacă un puternic dezechilibru. În plus, dimensionarea compensatorului trebuie făcută ținând cont de restricția evitării rezonanțelor cu rețeaua, pe frecvențele armonicilor prezente în regimul normal de funcționare;
- un reglaj manual sau automat în trepte a valorilor C_1 , C_2 , L_2 , conduce la o creștere a numărului de variații de tensiune în rețea, datorită comutațiilor.

Soluția: realizarea reglajului cu ajutorul susceptanțelor variabile, pe bază de comutație statică. Performanțele ridicate ale acestora, în ceea ce privește rapiditatea, ușurința și finețea reglajului, le fac ideale ca elemente de execuție ale unui sistem de reglare automată, on-line.

Modelul matematic pentru dimensionarea unor astfel de compensatoare, pentru explicarea mecanismului compensării și construirea legilor de comandă ale sistemului de reglaj, constituie subiect al lucrării de față.

2.4. Sistem de achiziție și prelucrare a datelor pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale rețelelor electrice

2.4.1. Metode și mijloace pentru determinarea mărimilor caracteristice regimurilor deformante și dezechilibrate

Determinarea indicatorilor enumerați în subcapitolele anterioare este foarte utilă, atât la aprecierea gradului de deformare și de dezechilibru a regimului periodic cât și la stabilirea măsurilor de diminuare a perturbațiilor din instalațiile electrice și de reducere a pierderilor de putere și energie electrică.

În ceea ce privește regimul deformant, această determinare are la bază analiza armonică și se poate efectua cu metode și mijloace diverse, descrise pe scurt în continuare:

a) *Analizoarele de armonici*. Sunt aparate de măsură specializate, care pot determina o parte din mărimile enumerate mai sus. Principiul lor de funcționare se bazează pe fenomenul de rezonanță a unui circuit L, C care, conectat corespunzător în circuitul de măsură, permite selectarea diferitelor armonici.

b) *Prelucrarea grafo-analitică* a oscilogramelor undelor deformate, înregistrate pe film sau hârtie fotografică, cu ajutorul unor aparate specifice (oscilografe, osciloscop). Metodele utilizate pentru prelucrarea grafo-analitică folosesc anumite aproximații și particularități ale formei mărimilor periodice nesinusoidale. Printre cele mai cunoscute se enumeră:

- metoda discontinuităților sau a incidențelor geometrice (Lalescu-Abason-Eagle);
- metoda Cebîșev;
- metoda ordonatelor echidistante (Thomson-Runge).

Cea mai răspândită este fără îndoială aceasta din urmă, care constă în principiu în transformarea integralelor ce intervin la calculul coeficienților seriei Fourier atașate funcției

periodice (*transformata Fourier discretă*), în numere finite.

c) *Sistemele informatice* pentru achiziția și prelucrarea semnalelor care au înlocuit practic în ultima perioadă mijloacele “tradiționale”. În principiu, ele folosesc tot metoda Thomson-Runge, aplicată de data aceasta însă mărimilor achiziționate prin eșantionarea, la o anumită rată, a semnalelor de interes. De cele mai multe ori, cu același sistem se poate face și analiza regimurilor dezechilibrate. Avantajele acestor sisteme sunt net superioare în planul preciziei și al vitezei de calcul, performanțelor îmbunătățindu-se permanent în ceea ce privește frecvența de eșantionare, numărul de semnale achiziționate simultan etc.

Un astfel de sistem există și în cadrul laboratorului de rețele electrice al Facultății de Electrotehnică din Timișoara, la care autorul lucrării de față a contribuit cu realizarea programelor pentru prelucrarea numerică a semnalelor. Sistemul a fost folosit în numeroase determinări experimentale [24], [25], [26], [27], validându-și astfel performanțele.

2.4.2. Structura principală

Explozia din ultima vreme din domeniul produselor hard și soft destinate achiziției de date cu performanțe ridicate, a făcut ca și în activitatea de urmărire, analiză și conducere a proceselor electroenergetice, utilizarea lor să fie tot mai frecvent întâlnită, cu atât mai mult cu cât ele devin mai accesibile.

Prin modul de structurare, un sistem de achiziții de date conține elemente care trebuie să îndeplinească trei funcții fundamentale ([9], [98]):

- conversia mărimilor caracteristice procesului fizic într-un semnal ce poate fi măsurat;
- măsurarea semnalelor de ieșire ale unor senzori sau traductori pentru a permite extragerea informațiilor;
- prelucrarea datelor și prezentarea lor sub o formă care să permită analiza procesului.

Produsele hard și soft pentru achiziție de date au fost concepute bineînțeles astfel încât să fie compatibile cu sistemele de calcul existente în care au fost apoi înglobate. De aceea cele mai multe din sistemele moderne de achiziție de date utilizează un PC pe post de controler ajungându-se astfel la o structură aproape tipizată, care conține în principal următoarele componente:

- senzori sau traductori care convertește mărimea fizică de studiat corespunzătoare fenomenului fizic într-un semnal electric pe care îl transmit fie unui circuit de adaptare, fie direct plăcii de achiziție de date;
- circuite de adaptare a semnalului (astfel încât acesta să fie compatibil cu circuitele de intrare ale convertoarelor analog-digitale) ce realizează izolarea, convertirea, filtrarea și/sau amplificarea semnalului provenit de la traductor;
- un subsistem de achiziție de date (placa de achiziție) care include multiplexoare, convertoare analog-digitale, etc.;
- un sistem de calcul;
- soft pentru achiziție și prelucrare de date.

Pornind de la necesitatea unei precizii sporite în identificarea și analiza regimurilor permanente nesinusoidale și nesimetrice ale rețelelor electrice, am realizat un sistem de achiziții de date ieftin și performant care se prezintă în cele ce urmează.

2.4.3. Descrierea elementelor componente

Plecând de la structura prezentată în capitolul introductiv, sistemul de achiziție și prelucrare realizat, are o configurație ale cărei elemente principale sunt prezentate în figura 2.10. În cele ce urmează se descriu pe scurt caracteristicile funcționale și principalii parametri pentru elementele componente.

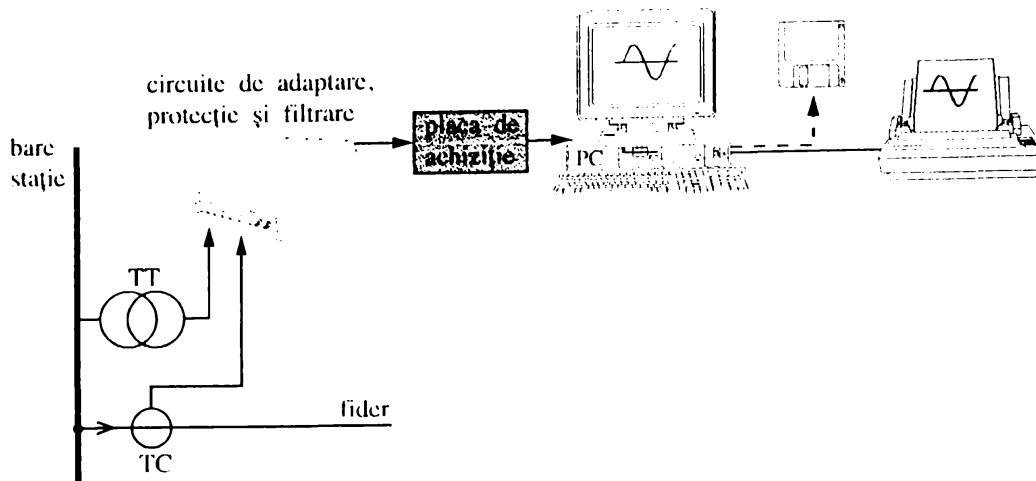


Fig. 2.10. Schema bloc a sistemului de prelucrare și achiziție a datelor.

◆ *Sistemul de calcul.*

S-a folosit un calculator PC-486, 100 MHz, 16 MB-RAM, HDD 0,54+1.08 GB, etc..

◆ *Placă de achiziție.*

A fost folosită o placă de achiziție de tip PC-LPM-16 produsă de firma National Instruments Corporation (SUA), liderul mondial în producția de periferice de achiziție de semnal și control procese și software de instrumentație.

Având un cost redus și posibilitatea de a se conecta într-un slot de 8 sau 16 biți în orice calculator PC-IBM compatibil, această placă de achiziție este foarte practică.

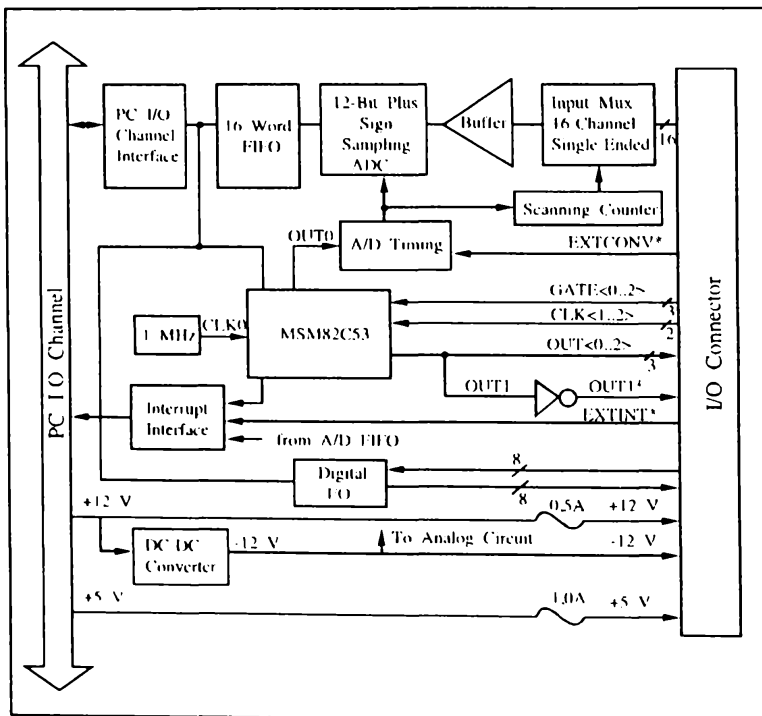


Fig. 2.11. Schema bloc a plăcii de achiziție PC-LPM-16

domeniile 0÷10 V și ± 5 V ([115]).

Îea conține un CAN de 12 biți plus semn cu aproximații succesive și cu autocalibrare, având 16 intrări analogice, 8 linii de nivel TTL digitale de intrare și 8 linii de nivel TTL digitale de ieșire. De asemenea mai conține două circuite de numărare temporizare cu 16 canale fiecare, pentru temporizarea I/O.

Domeniile de variație ale mărimilor de intrare pot fi: 0÷5 V, 0÷10 V, ±2,5 V, ±5 V și se pot alege prin configurare hardware.

Achiziția pe 12 biți permite ca semnalul de intrare să fie reprezentat prin $2^{12} = 4096$ puncte și obținerea astfel a unei **precizii de măsurare de 0,04875 %**. Rezultă deci o rezoluție de 1,22 mV pentru domeniile 0÷5 V și ± 2,5V respectiv 2,44 mV pentru

Achiziția de date se poate face pe un singur canal sau pe canale multiple prin scanare. Ambele variante de achiziție pot folosi transferul de date în mod buffer dublu.

Temporizarea achiziției de date este realizată printr-un counter/timer încorporat în placă, având 3 canale, fiecare cu rezoluția de 16 biți, sau se poate asigura din exterior. Ceasul de bază are frecvența de 1 MHz și o precizie de $\pm 0,01\%$.

Rata maximă de achiziție atât pentru achiziție pe un canal cât și pe canale multiple este 50000 eșantioane/sec. rezultând un interval de eșantionare de 20 μ sec.

Schema bloc a plăcii de achiziție este prezentată în figura 2.11.

◆ *Circuitele de adaptare.*

Procesele electroenergetice pot fi descrise în totalitate dacă se achiziționează numai două tipuri de mărimi electrice: tensiuni de fază și/sau de linie și curenți pe fazele rețelelor în puncte bine determinate ale acestora. Cum racordul sistemelor de achiziție se face în general în circuitele secundare de măsură ale stațiilor electrice și propunându-ne studiul regimurilor permanente de funcționare, domeniile de variație ale tensiunilor respectiv curenților sunt cele din secundarele transformatoarelor de măsură $0\div 100$ V respectiv $0\div 5$ A. Pentru realizarea adaptării la aceste circuite a sistemului de achiziție s-au folosit traductoare fabricate de firma LEM (Elveția) de tip LA 25-NP pentru canalele de curent și LV 25-P pentru canalele de tensiune. Acestea îndeplinesc cu succes principalele condiții impuse de o funcționare corectă a legăturii de culegere și transmitere a informației între circuitele de putere (“de curenți tari”) și circuitele electronice de achiziție (“de curenți slabi”), în condițiile poluării armonice a rețelei de alimentare :

- transmiterea unei imagini fidele a mărimii din proces (curent sau tensiune), sub forma unui curent sau a unei tensiuni la nivel compatibil cu electronica de prelucrare;
- asigurarea unei izolații galvanice între circuitele de “curenți tari” și cele de “curenți slabi”;
- imunitatea totală față de fluctuațiile condițiilor din mediul ambiant și a fluctuațiilor de mod comun;
- capacitatea de a suporta suprasarcinile generate de curenții de scurtcircuit din circuitele de “curent tare”.

Traductoarele LEM includ o aplicație a efectului Hall și funcționează pe principiul compensării magnetice (metoda fluxului magnetic nul) [57]. Iată principalele lor caracteristici tehnice ([116]) :

LA 25-NP

- curentul nominal	5(-6-8-12-25) A
- domeniul de măsură	0 la ± 36 A
- curentul nominal analogic de ieșire	25 mA
- precizia la + 25°C	$\pm 0,5$ % la I_n
- tensiunea de alimentare a circuitului de compensare	± 15 V (± 5 %)
- izolația între primar și secundar	2,5 kV/ 50 Hz/ 1 min
- liniaritate	$< \pm 0,2$ %
- constanta de timp la 90 % din curentul primar maxim	< 1 μ s
- banda de frecvență	$0\div 150$ kHz

LV 25-P

- curent nominal	10 mA
- domeniul de măsură	0 la ± 14 mA
- curentul nominal analogic de ieșire	25 mA
- precizia la + 25°C	$\pm 0,8$ % la I_n
- tensiunea de alimentare a circuitului de compensare	± 15 V ($\pm 5\%$)
- izolația între primar și secundar	2,5 kV /50 Hz/1 min.
- liniaritate	$< 0,2$ %
- constanta de timp	40 μ s

Ambele traductoare au la ieșire un curent proporțional cu curentul respectiv tensiunea primară. Transformarea curentului de ieșire într-o tensiune proporțională cu mărimea primară se face prin colectarea unei căderi de tensiune de pe un rezistor de precizie ridicată (cu peliculă de tantal).

Folosind acest tip de traductoare se rezolvă în același timp o formă de adaptare care conferă importante avantaje: izolarea intrării în circuitele sistemului de achiziție. Prin aceasta se asigură protejarea calculatorului față de efectele devastatoare ale tensiunii ridicate ce ar putea apărea accidental pe intrările de măsură, fiind în același timp o metodă foarte bună de eliminare a bulelor de masă.

◆ *Circuitele de protecție și filtrare.*

Deoarece placa de achiziție nu suportă pe circuitele de intrare analogică tensiuni mai mari de ± 45 V, pentru a nu periclita integritatea circuitelor sale și ale calculatorului în cazul unei supratensiuni accidentale care pot apărea în timpul achiziției, între circuitele de intrare analogică ale plăcii și circuitele de adaptare s-au interpus circuite de protecție.

Acestea au o structură clasică în electronică fiind alcătuite în principiu din diode, polarizate pentru ambele alternanțe, plasate între circuitul de intrare și masă, care intră în conducție în momentul atingerii unui prag prestabilit (14 V în cazul nostru), șuntând circuitele și asigurând astfel protecția acestora.

În timpul achiziției, în conductoarele circuitelor de măsurare se pot induce tensiuni parazite care cresc erorile în prelucrarea semnelor achiziționate. Pentru eliminarea paraziților și trecerea neatenuată a semnalelor utile, pe fiecare canal s-a plasat un filtru trece-jos pasiv, dimensionat pentru o bandă de trecere de 0 ± 20 kHz.

◆ *Soft-ul pentru achiziție și prelucrare*

Placa PC-LPM-16, s-a livrat însoțită de un pachet de programe numit NI-DAQ Software pentru DOS/Windows/LabWindows. NI-DAQ are o colecție de funcții care pot fi apelate din mediile de programare pentru aplicații. Aceste funcții includ rutine pentru citiri analogice (conversie A/D), generare semnale de diferite forme, I/O digitale, numărări/temporizări, SCXI, RTSI și autocalibrări. NI-DAQ este însoțită de interfețe de limbaj pentru: Professional BASIC, Turbo Pascal, Turbo C, Turbo C++, Borland C++, Microsoft C pentru DOS și Visual Basic, Turbo Pascal, Microsoft C cu SDK, Borland C++ pentru Windows.

De asemenea ca software opțional se folosește LabVIEW pentru Windows sau LabWindows pentru DOS. Acestea reprezintă pachete software de dezvoltare a programelor pentru achiziții de date și aplicații de control. LabVIEW folosește programarea grafică iar LabWindows utilizează Microsoft C sau Quick BASIC. Ambele pachete includ biblioteci extinse pentru achiziții de date, instrumente de control, analize de date și prezentări grafice de date.

Având în vedere scopul urmărit și anume analiza armonică a undelor de tensiune și curent pentru fiecare fază a rețelei de transport sau distribuție a energiei electrice, deci șase canale, până la armonica 40 și folosind minim 100 puncte achiziționate pe o perioadă și canal, prelucrarea datelor achiziționate s-a făcut out-line. S-a folosit un program pentru achiziție pe canale multiple, ce se află în NI-DAQ Software iar prelucrarea s-a făcut ulterior *folosind un program scris în Turbo Pascal, de concepție proprie.*

◎ *Programul pentru achiziție.*

În NI-DAQ Software este inclus și pachetul de programe DAQWare pentru DOS, conceput pentru monitorizarea și controlul plăcilor multifuncționale de achiziție fabricate de NI.

După configurarea plăcii cu DAQconf.exe se lansează DAQWare.exe din meniul căruia se selectează "Instruments" și apoi "Strip Chart Data Logger". Avem la îndemână în

acest fel un instrument virtual foarte performant ale cărui comenzi se pot da simplu de pe un panou de control astfel:

- setarea canalului (canalelor) pe care se va face achiziția, fiecăruia putându-i-se asocia un nume (maxim 14 caractere; de ex.: "tensiune R-N 110 kV");
- monitorizarea procesului prin vizualizarea semnalelor (osciloscop virtual);
- alegerea canalelor vizualizate simultan (reprezentate în culori diferite);
- stabilirea ratei de eșantionare care, corelată cu numărul de canale va putea realiza o achiziție cu un număr variabil de puncte pe o perioadă;
- salvarea datelor achiziționate în fișiere, stabilind anterior numărul de eșantioane pe canal astfel încât, în funcție de numărul de puncte pe o perioadă se poate stabili numărul de perioade consecutive pe care se face achiziția;
- alegerea formatului fișierelor în care se păstrează datele achiziționate: binar sau convertite în format ASCII sau Lotus 1-2-3.

Dacă fișierul este format ASCII el poate avea și un header în care se stochează informații despre: data, ora și locul achiziției, rata de eșantionare și rata de scanare, denumirile mărimilor achiziționate pe fiecare canal.

În ANEXA 1 se prezintă instrumentul virtual descris în acest subcapitol și un exemplu de fișier de date achiziționat cu ajutorul acestuia.

⊙ Programul pentru prelucrare.

Prelucrarea, care constă într-un volum imens de calcule, s-a făcut cu un program scris în Turbo-Pascal. Acesta utilizează o multitudine de proceduri specializate pentru:

- citirea datelor dintr-un fișier;
- determinarea numărului de puncte corespunzător unei perioade;
- determinarea valorilor momentane minime și maxime achiziționate;
- vizualizarea header-ului;
- calculul mărimilor caracteristice regimului deformant utilizând transformata Fourier discretă, plecând de la relațiile de calcul prezentate în paragraful 2.2.2.:
 - pentru fiecare armonică:
 - coeficienții A și B ai transformatei Fourier;
 - A_m - amplitudinea;
 - V_e - valoarea efectivă;
 - φ - faza armonicii;
 - Nivel - nivelul armonicii;
 - pentru fiecare semnal:
 - V_{Med} - valoarea medie;
 - V_{Ef} - valoarea efectivă;
 - $F_{Vîrf}$ - factorul de vîrf;
 - V_{MRed} - valoarea medie redresată;
 - F_{Forma} - factorul de formă;
 - F_{Dist} - factorul de distorsiune;
 - C_{Def} - coeficientul de deformare;
 - C_{Fundam} - conținutul în fundamentală;
 - R_d - reziduul deformant;
 - calculul puterilor active și reactive pentru fiecare armonică și apoi $P, Q, S, \Sigma P_k, \Sigma Q_k$ (sumele puterilor pe armonicile superioare) pentru fiecare fază;
- calculul mărimilor pentru caracterizarea regimului nesimetric cu relațiile clasice din electrotehnică și cu cele prezentate în paragraful 2.3.2.:

- tensiunile simple și înlănțuite în valoare efectivă și fază respectiv defazaj față de axa reală (considerată cu direcția și sensul tensiunii pe faza R) : $\underline{U}_R; \underline{U}_S; \underline{U}_T; \underline{U}_{RS}; \underline{U}_{ST}; \underline{U}_{TR}; \underline{U}_R'; \underline{U}_S'; \underline{U}_T'$;
- componentele simetrice ale sistemului trifazat de tensiuni simple, în valoare efectivă și fază : $\underline{U}_d; \underline{U}_i; \underline{U}_h$;
- curenții pe cele trei faze în valoare efectivă și fază respectiv defazaj față de axa reală; de asemenea componentele active și reactive ale acestor curenți, determinate prin raportare la tensiunile de fază corespondente : $\underline{I}_R; \underline{I}_S; \underline{I}_T; \underline{I}_R^*; \underline{I}_S^*; \underline{I}_T^*$;
- componentele simetrice ale sistemului trifazat de curenți, în valoare efectivă și fază, dar și prin componentele active și reactive : $\underline{I}_d; \underline{I}_i; \underline{I}_h$;
- puterile active și reactive pe fiecare fază și pe ansamblul celor trei faze, în secțiunea în care se face achiziția : $P_R; P_S; P_T; P_{tot}; Q_R; Q_S; Q_T; Q_{tot}$;
- puterile active și reactive de secvență $P_d; P_i; P_h; Q_d; Q_i; Q_h$;
- coeficienții:
 - de disimetrie : $k_{ns2u}; k_{ns2i}$;
 - de asimetrie : $k_{ns0u}; k_{ns0i}$;
 - de nesimetrie : $k_{nsu}; k_{nsi}$;
- raportul de nesimetrie : $r_{nu}; r_{ni}$;
- reprezentarea grafică a semnalelor achiziționate;
- salvarea în fișiere a rezultatelor prelucrării.

Din păcate, procedura de calificare metrologică a unui astfel de sistem de achiziție (de fapt un instrument complex de măsură), este extrem de anevoioasă și costisitoare. Pentru a se obține o determinare a nivelului erorilor de măsură, s-a făcut o calibrare a circuitelor de adaptare, urmată de o comparație cu rezultatele unor instalații de măsură de mare precizie, din laboratoarele metrologice ale AEM S.A. Timișoara. Pentru mărimi sinusoidale, atât pentru canalele de tensiune cât și pentru cele de curent, s-au obținut erori sub 1%. Pentru regimuri deformante, erorile, determinate prin comparație cu sisteme similare, au condus la același nivel al erorilor. Pe fiecare canal s-a stabilit un raport de conversie, care a fost apoi folosit în programul de prelucrare.

În ANEXA 2 se prezintă în detaliu programul cu care s-a făcut prelucrarea fișierelor achiziționate (de fapt unit-ul principal). În aceeași anexă, dar și în ANEXELE 11÷14 sunt prezentate rezultate ale unor determinări experimentale efectuate cu sistemul de achiziție și prelucrare a datelor descris în subcapitolul de față.

2.4.4. Modul de lucru

Pentru ca rata de eșantionare pe fiecare canal din cele x scanate să fie maximă, (ceea ce conduce în mod evident la precizia maximă a prelucrării numerice a semnalelor) acestea au fost conectate la circuitele pentru intrări analogice ale plăcii, pe primele x poziții consecutive. Astfel pentru o achiziție făcută pe 6 canale (3 tensiuni + 3 curenți) se obține o rată de eșantionare maximă de 50.000/6 ceea ce permite, la frecvență industrială de 50 Hz obținerea a aproximativ 160 puncte pe o perioadă.

Conform *teoremei eșantionării a lui Shannon* [98], un sistem de achiziție de date trebuie să eșantioneze cu o frecvență de cel puțin două ori mai mare decât frecvența armonicii de rangul cel mai mare ce se dorește a fi evidențiată în semnalul de intrare.

Dacă se consideră că analiza armonică pentru semnalele de tensiune și curenți este suficient de edificatoare dacă se limitează la armonica 40 (2000 Hz) (conform [113]), condiția enunțată mai sus este îndeplinită și pentru achiziția a 8 semnale plasate pe primele

poziții consecutive. Afirmația este valabilă pentru regimul normal de funcționare al rețelei în care se face achiziția.

Sistemul de achiziție prezentat, conceput pentru achiziția în regimuri permanente de funcționare ale rețelelor de transport și distribuție a energiei electrice, prezintă performanțe foarte bune, ce corespund cerințelor actuale în ceea ce privește identificarea și analiza regimurilor nesinusoidale și nesimetrice. Datorită prețului relativ scăzut al plăcii de achiziție (care se livrează cu un software foarte performant) ce poate fi instalată într-un PC existent și de asemenea datorită simplității circuitelor de adaptare, protecție și filtrare, rezultă o soluție optimă din punct de vedere tehnico-economic. Într-o dezvoltare viitoare, ne propunem realizarea unui soft care să permită și prelucrarea statistică a rezultatelor și care să fie inclus într-un sistem de monitorizare a regimurilor de funcționare ale rețelelor electrice. (folosind de pildă mediul de dezvoltare LabVIEW).

2.5. Determinări experimentale

În cadrul acestui paragraf se prezintă foarte succint câteva dintre rezultatele determinărilor experimentale efectuate de autor cu scopul identificării și analizei regimurilor nesimetrice și nesinusoidale în rețelele electrice de la toate nivelele de tensiune.

Se exemplifică cu o secvență din sinteza rezultatelor determinărilor efectuate în stația de transformare 110/27,5 kV, pentru alimentarea tracțiunii electrice feroviare (stația CFR Palas-Constanța [25]). În figura 2.12. este reprezentată schema electrică monofilară simplificată de încadrare în sistemul electroenergetic a stației amintite.

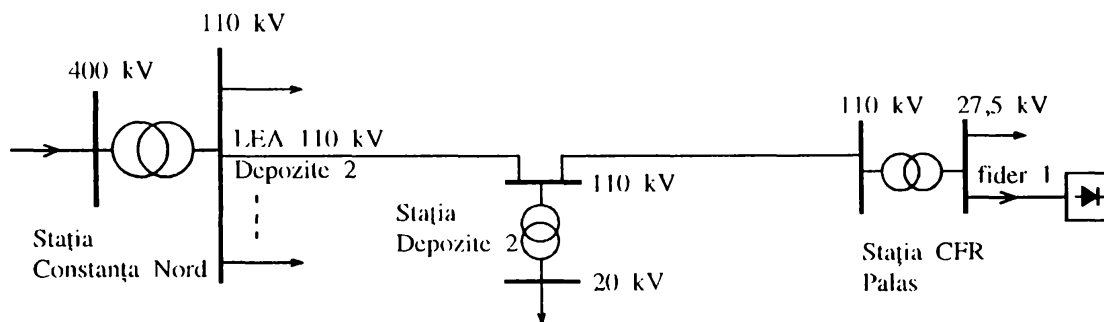


Fig. 2.12. Schema electrică monofilară simplificată de încadrare în SEE a stației CFR Palas

• Observații privind regimul deformant

Consumatorul tracțiune feroviară analizat, este un receptor puternic neliniar ce produce un pronunțat regim deformant, atât în curenți cât și în tensiuni. Astfel, valorile medii pătratice ale coeficienților de distorsiune corespunzătoare intervalelor studiate sunt $\delta_{I27} = 34\%$ respectiv $\delta_{U27} = 12,3\%$. Deși nu se poate stabili o corelație fermă (stabilă) între nivelul distorsiunii și mărimea sarcinii, se poate aprecia însă că mărimea coeficientului de distorsiune în curent este invers proporțională cu mărimea sarcinii, valoarea sa minimă atingându-se pentru cazurile valorilor maxime ale sarcinii. Pentru unda de tensiune situația este toemai inversă : tensiunea prezintă coeficientul de distorsiune maxim la sarcină maximă.

La nivelul de 110 kV distorsiunea este mult atenuată în tensiune și mult mai puțin în curent. La tensiunea dintre faze U_{RT} se poate constata o reducere a distorsiunii de circa

4 ori, ajungându-se la un coeficient de distorsiune mediu maxim de 4,9 %, iar în unda tensiunii de fază, U_{RN} , de 1,84 %. În ceea ce privește nivelul armonicilor în unda U_{RT} , acesta este depășit doar pentru armonica a 3-a, dar, constant pentru toate fișierele înregistrate $\gamma_{3URT} = 4,21$ %.

Curentul pe partea de 110 kV prezintă distorsiuni asemănătoare cu cele de la nivelul de 27 kV, în situații de sarcină minimă distorsiunile lui fiind mai mari decât cele ale curentului de pe partea de 27 kV ($\delta_{I\ 110} = 34,7$ % valoarea medie pătratică fiind de 33 %).

• *Observații privind regimul nesimetric*

Pe LLEA 110 kV ce alimentează stația CFR Palas s-au găsit coeficienți de disimetrie și respectiv asimetrie în curenți foarte mari : $k_{ns0i\ max} = 10,78$ %, respectiv $k_{ns2i\ max} = 61,77$ %, foarte mult peste limita admisă. Această nesimetrie, cum era și de așteptat de altfel, este mult diminuată la sursă (transformatorul 400/110 kV din stația Constanța Nord) : $k_{ns0i} = 8,7\%$, respectiv $k_{ns2i} = 8,52$ %.

Evident, modificarea sarcinii influențează mult valoarea acestor coeficienți. Valorile de mai sus pentru LLEA 110 kV corespund sarcinii maxime din intervalul considerat (cca. 60A). Într-un al doilea regim, corespunzător unei încărcări de 20 %, coeficienții de disimetrie și asimetrie au rezultat mult mai mici : $k_{ns0i} = 4,22$ %, $k_{ns2i} = 24,63$ %.

În ceea ce privește nesimetria în tensiuni, coeficienții k_{ns0u} și k_{ns2u} au fost sub limita maximă admisă de 2% : $k_{ns0u} = (0,22 \pm 0,92)\%$ și $k_{ns2u} = (0,34 \pm 0,8)$.

Acest lucru este explicabil dacă se are în vedere puterea de scurtcircuit a sistemului în punctul de alimentare al stației CFR Palas (foarte aproape din punct de vedere electric de rețeaua de 400 kV), cu mult mai mare decât puterea consumatorului nesimetric considerat. Ca urmare, nu prezintă interes calculul valorilor medii ale coeficienților de disimetrie și de asimetrie.

Valorile raportului de nesimetrie pentru tensiuni r_{nn} sunt în general constante (în medie $r_{nn} = 0,98$), ceea ce este explicabil dacă se are în vedere absența nesimetriei în tensiuni.

În ANEXA 2 sunt incluse o parte din rezultatele prelucrării a două dintre fișierele achiziționate în stațiile de transformare Constanța Nord și CFR Palas ([25]).

Capitolul 3

ELEMENTE DE CALCUL PENTRU ECHILIBRAREA REȚELELOR ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE CU TREI CONDUCTOARE PRIN COMPENSAREA TRANSVERSALĂ A SARCINILOR DEZECHILIBRATE

3.1. Introducere

În rețelele electrice de distribuție trifazate, dezechilibrele se manifestă atât în sistemele trifazate de tensiuni de linie și/sau de fază cât și în sistemele trifazate de curenți. Cauzele acestor dezechilibre sunt sarcinile asimetrice, atât cele de mică putere pentru care reprezentativ este consumatorul casnic, cât mai ales cele de mare putere, cum ar fi tracțiunea electrică feroviară sau urbană, cuptoarele electrice, instalațiile de sudură, etc.. Producându-se dezechilibrele curenților pe fazele rețelei de alimentare, rezultă căderi diferite de tensiune pe faze, ceea ce va avea drept consecință dezechilibrarea sistemelor tensiunilor. În felul acesta sunt afectați și consumatorii echilibrați alimentați din aceeași rețea de distribuție și aflați mai mult sau mai puțin îndepărtați, din punct de vedere electric, de sursele de dezechilibru.

Problema atenuării dezechilibrelor de tensiune sau curenți face parte integrantă din problema complexă a optimizării funcționării rețelelor electrice de distribuție. Din acest motiv rezolvarea sa nu poate fi făcută decât în corelație cu celelalte subprobleme ce se referă la : reglajul tensiunii, reducerea circulației de putere reactivă (îmbunătățirea factorului de putere), limitarea regimului deformant, etc.

Una dintre metodele de soluționare a problemei dezechilibrelor constă într-o acțiune asupra cauzelor acestora : receptorii dezechilibrați. Este vorba despre echilibrarea artificială a sarcinilor (sau sarcinilor echivalente) dezechilibrate, prin adăugarea în punctul de racord la rețea al acestora, mai exact în aceea secțiune a rețelei în care se dorește echilibrarea, a unei scheme de compensare ce conține numai elemente reactive de circuit. Dimensionarea acestora și calculul circulației de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator - compensator, constituie subiectele capitolelor 3 respectiv 4 ale prezentei lucrări, cu referire la cazurile particulare ale rețelelor cu trei respectiv patru conductoare.

Orice element reactiv ce intervine într-o rețea trifazată are însă inevitabil repercursiuni, datorită modificării produse în circulația puterilor reactive, asupra nivelului tensiunilor și factorului de putere. De aceea, criteriile de dimensionare ale compensatoarelor pentru echilibrare, se referă și la cele două aspecte conexe. Evident că există repercursiuni și în ceea ce privește regimul deformant prezent în rețea. Pentru început se neglijează însă această dependență, în cele două capitole folosindu-se ca ipoteză de calcul existența în rețea numai a unor receptoare și elemente de rețea liniare. De asemenea tensiunile de alimentare ale rețelei se consideră perfect sinusoidale.

Deși existența unui dezechilibru în curent presupune imediat și dezechilibrul sistemului de tensiuni de fază și/sau de linie, calculele au fost efectuate în ipoteza echilibrului perfect al sistemului trifazat al tensiunilor de la bornele consumatorului (echivalent) dezechilibrat. Cum acțiunea compensatorului are rol de feed-back în cadrul unui posibil sistem de reglare automată a compensării, având ca rezultat atenuarea (anularea) dezechilibrului tensiunii, această ipoteză de calcul este pe deplin justificată.

3.2. Stabilirea elementelor schemei de compensare

Problema rezolvată în cadrul acestui capitol se situează în contextul problemelor clasice din electrotehnică, referitoare la rețelele electrice trifazate funcționând în regim permanent sinusoidal dezechilibrat (ANEXA 3).

În cele ce urmează ne propunem să determinăm analitic relațiile care trebuie să existe între elementele schemei echivalente a unei sarcini astfel încât să îi fie asigurată simetria totală pe cele 3 faze, relații din care să se deducă apoi elementele unei scheme de compensare transversală care, instalată la bornele unui receptor oarecare, să îl transforme în unul perfect echilibrat. Aceste elemente vor stabili apoi valorile și caracterul curenților de compensare necesari pe fiecare fază.

Se consideră o sarcină electrică trifazată oarecare, racordată la o rețea electrică cu trei conductoare și alimentată cu un sistem trifazat echilibrat de tensiuni de linie.

În astfel de situații de obicei se pot cunoaște numai valorile curenților pe faze și ale tensiunilor dintre faze, neutrul rețelei neexistând sau nefiind accesibil.

Sistemul trifazat al tensiunilor de linie fiind simetric, de obicei pentru schema echivalentă a consumatorului se adoptă cea în conexiune Δ ale cărei elemente, din rațiuni practice, se introduce sub formă de admitanțe (fig.3.1a).

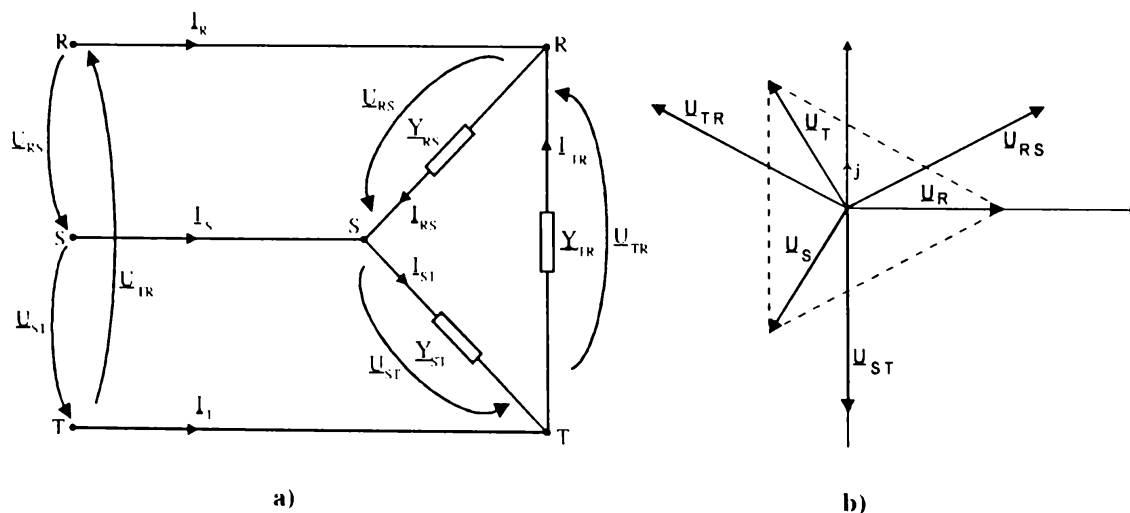


Fig. 3.1. Schema echivalentă în Δ cu admitanțe a unui consumator trifazat oarecare

- a) - definirea mărimilor electrice
b) - diagrama fazorială a tensiunilor

Pentru rețeaua din figura 3.1.a vom avea deci următoarele seturi de relații :

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{RS} &= \underline{U}_{RS} \cdot \underline{Y}_{RS} & \underline{Y}_{RS} &= G_{RS} - j B_{RS} & \underline{I}_R &= \underline{I}_{RS} - \underline{I}_{TR} \\
 \underline{I}_{ST} &= \underline{U}_{ST} \cdot \underline{Y}_{ST} & \underline{Y}_{ST} &= G_{ST} - j B_{ST} & \underline{I}_S &= \underline{I}_{ST} - \underline{I}_{RS} \\
 \underline{I}_{TR} &= \underline{U}_{TR} \cdot \underline{Y}_{TR} & \underline{Y}_{TR} &= G_{TR} - j B_{TR} & \underline{I}_T &= \underline{I}_{TR} - \underline{I}_{ST}
 \end{aligned} \quad (3.1) \quad (3.2) \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}
\underline{U}_R &= U & \underline{U}_{RS} &= \underline{U}_R - \underline{U}_S = U \cdot (1 - a^2) \\
\underline{U}_S &= a^2 \cdot \underline{U}_R = a^2 \cdot U & \underline{U}_{ST} &= \underline{U}_S - \underline{U}_T = U \cdot (a^2 - a) \\
\underline{U}_T &= a \cdot \underline{U}_R = a \cdot U & \underline{U}_{TR} &= \underline{U}_T - \underline{U}_R = U \cdot (a - 1)
\end{aligned}
\tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{RS} &= \underline{U}_R - \underline{U}_S = U \cdot (1 - a^2) \\
\underline{U}_{ST} &= \underline{U}_S - \underline{U}_T = U \cdot (a^2 - a) \\
\underline{U}_{TR} &= \underline{U}_T - \underline{U}_R = U \cdot (a - 1)
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

În care \underline{U}_R , \underline{U}_S și \underline{U}_T constituie un sistem trifazat simetric de tensiuni de fază fictiv, ce corespunde sistemului trifazat de tensiuni de linie cunoscut. Se observă de asemenea că *admitanțele au fost scrise conform convenției care le conferă caracter capacitiv dacă $B < 0$ și respectiv caracter inductiv dacă $B > 0$.*

Modul în care se determină susceptanțele echivalente pentru schema în Δ pornind de la curenții pe faze și tensiunile dintre faze (mărimi ce se pot măsura pentru un astfel de consumator), este prezentat în ANEXA 4.

Cu ajutorul relațiilor (3.1) ÷ (3.5) se obțin :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R &= U \cdot \left[\left(\frac{3}{2} \cdot G_{RS} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS} + \frac{3}{2} \cdot G_{TR} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \right) + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS} - \frac{3}{2} \cdot B_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} - \frac{3}{2} \cdot B_{TR} \right) \right] \\
\underline{I}_S &= U \cdot \left[\left(-\frac{3}{2} \cdot G_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS} - \sqrt{3} \cdot B_{ST} \right) + j \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS} + \frac{3}{2} \cdot B_{RS} - \sqrt{3} \cdot G_{ST} \right) \right] \\
\underline{I}_T &= U \cdot \left[\left(\sqrt{3} \cdot B_{ST} - \frac{3}{2} \cdot G_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \right) + j \left(\sqrt{3} \cdot G_{RS} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} + \frac{3}{2} \cdot B_{TR} \right) \right]
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

Condiția necesară și suficientă pentru ca cei 3 curenți de fază să se constituie într-un sistem echilibrat, este anularea componentei de secvență inversă a curentului:

$$\underline{I}_i = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + a^2 \cdot \underline{I}_S + a \cdot \underline{I}_T) = 0
\tag{3.7}$$

Punând condițiile de anulare a părții reale respectiv a celei imaginare ale \underline{I}_i obținut prin înlocuirea relațiilor (3.6) în relația (3.7) se obțin :

$$\begin{cases}
-G_{RS} + 2 \cdot G_{ST} - G_{TR} + \sqrt{3} \cdot (B_{TR} - B_{RS}) = 0 \\
\sqrt{3} \cdot (G_{TR} - G_{RS}) + B_{RS} - 2 \cdot B_{ST} + B_{TR} = 0
\end{cases}
\tag{3.8}$$

Acest sistem de ecuații definește legăturile care trebuie să existe între cele 6 elemente ale schemei echivalente în Δ a unui consumator, astfel încât acesta, din punctul de vedere al rețelei, să apară ca un consumator perfect echilibrat ($\underline{I}_i = 0$).

De aici ideea de corecție (modificare, compensare) a lor cu ajutorul unei scheme de compensare paralel, tot în conexiune Δ , astfel încât parametrii echivalenței, de data aceasta ai ansamblului consumator - compensator să satisfacă ecuațiile (3.8) [63]. (fig. 3.2).

Problema constă deci în determinarea elementelor schemei de compensare, astfel încât, fiind cunoscute elementele schemei echivalente a consumatorului, să se obțină un ansamblu care din punct de vedere al rețelei este perfect echilibrat ($\underline{I}_R^c = a \cdot \underline{I}_S^c = a^2 \cdot \underline{I}_T^c$).

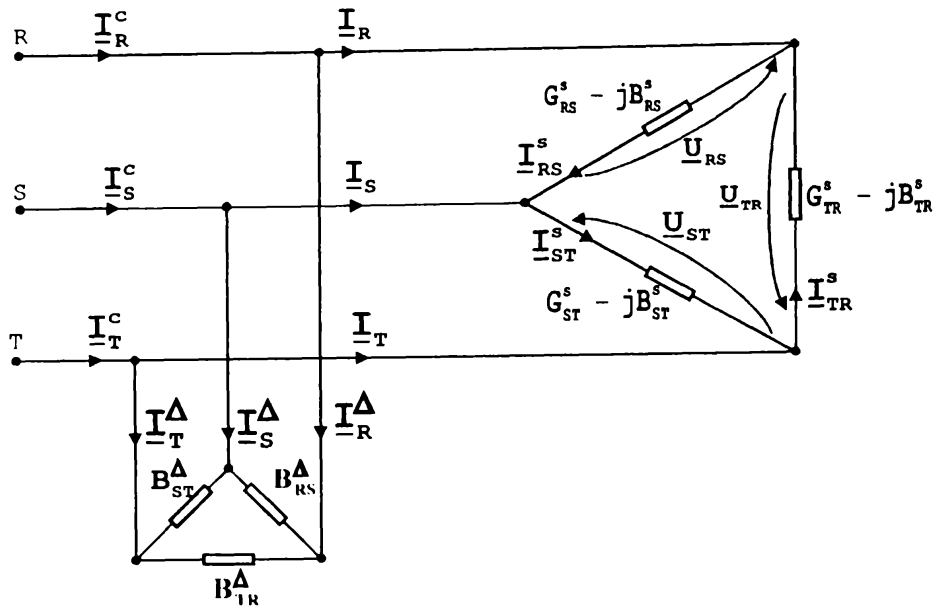


Fig. 3.2. Ansamblu consumator dezechilibrat-compensator șunt

Bineînțeles că schema de compensare nu va produce modificări asupra puterii active totale absorbite din rețea (ceea ce ar însemna pierderi suplimentare) și deci nu va conține decât elemente reactive ($G_{RS}^{\Delta} = G_{ST}^{\Delta} = G_{TR}^{\Delta} = 0$).

În relațiile (3.8) se vor înlocui deci :

$$\begin{aligned} G_{RS} &= G_{RS}^s & G_{ST} &= G_{ST}^s & G_{TR} &= G_{TR}^s \\ B_{RS} &= (B_{RS}^s + B_{RS}^{\Delta}) & B_{ST} &= (B_{ST}^s + B_{ST}^{\Delta}) & B_{TR} &= (B_{TR}^s + B_{TR}^{\Delta}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Rezultă sistemul de ecuații :

$$\begin{cases} B_{RS}^{\Delta} - B_{TR}^{\Delta} = A \\ B_{RS}^{\Delta} - 2 \cdot B_{ST}^{\Delta} + B_{TR}^{\Delta} = B \end{cases} \quad (3.10)$$

în care :

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{RS}^s - B_{RS}^s + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^s - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^s + B_{TR}^s \\ B &= \sqrt{3} \cdot G_{RS}^s - B_{RS}^s + 2 \cdot B_{ST}^s - \sqrt{3} \cdot G_{TR}^s - B_{TR}^s \end{aligned} \quad (3.11)$$

Necunoscutele sunt așadar : B_{RS}^{Δ} , B_{ST}^{Δ} și B_{TR}^{Δ} .

Având 2 ecuații și 3 necunoscute avem de-a face cu o nedeterminare. O a treia ecuație, independentă de primele două, care să exprime o relație între cele 3 necunoscute, va rezulta impunând una dintre condițiile următoare :

- a - compensarea totală a puterii reactive absorbite din rețea ;*
- b - compensarea parțială a puterii reactive absorbite, până la un factor de putere impus ;*
- c - reglarea tensiunii pe barele consumatorului ;*
- d - instalarea unei puteri reactive minime în compensator ;*
- e - minimizarea pierderilor de putere activă în rețeaua de alimentare .*

3.3. Criteriul a. Compensarea totală a puterii reactive ($\cos \varphi_d = 1$)

3.3.1. Stabilirea valorilor elementelor schemei de compensare

În acest prim caz, în afară de echilibrarea sarcinii, compensarea trebuie să conducă și la anularea puterii reactive absorbite din rețea ($\cos \varphi_d = 1$).

Acest lucru se obține punând condiția suplimentară :

$$\text{Im}(\underline{I}_d^c) = 0 \quad (3.12)$$

\underline{I}_d^c - fiind componenta de secvență directă corespunzătoare curentului de sarcină al ansamblului consumator - compensator. Dar

$$\underline{I}_d^c = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R^c + a \cdot \underline{I}_S^c + a^2 \cdot \underline{I}_T^c) = \underline{I}_R^c \quad (3.13)$$

pentru că $\underline{I}_R^c = a \cdot \underline{I}_S^c = a^2 \cdot \underline{I}_T^c$ în care \underline{I}_R^c , \underline{I}_S^c și \underline{I}_T^c sunt curenții absorbiți de rețea după compensare, constituiți într-un sistem simetric. Astfel încât condiția suplimentară va fi :

$$\text{Im}(\underline{I}_R^c = 0) \quad (3.14)$$

adică :

$$G_{RS} - G_{TR} - \sqrt{3}(B_{RS} + B_{TR}) = 0 \quad (3.15)$$

Asociind acum relațiile (3.8) și (3.15) se obține sistemul :

$$\begin{bmatrix} -1 & -\sqrt{3} & 2 & 0 & -1 & \sqrt{3} \\ -\sqrt{3} & 1 & 0 & -2 & \sqrt{3} & 1 \\ 1 & -\sqrt{3} & 0 & 0 & -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{RS} \\ B_{RS} \\ G_{ST} \\ B_{ST} \\ G_{TR} \\ B_{TR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

care, scris astfel încât să permită evidențierea necunoscutelor, are forma :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{RS}^\wedge \\ B_{ST}^\wedge \\ B_{TR}^\wedge \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

în care :

$$C = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{RS}^s - \sqrt{3} \cdot B_{RS}^s - G_{TR}^s - \sqrt{3} \cdot B_{TR}^s) \quad (3.18)$$

Rezolvarea sistemului (3.17) conduce la următoarele soluții :

$$\begin{aligned} B_{RS}^\wedge &= \frac{1}{2} \cdot (A + C) \\ B_{ST}^\wedge &= \frac{1}{2} \cdot (B + C) \\ B_{TR}^\wedge &= \frac{1}{2} \cdot (-A + C) \end{aligned} \quad (3.19) \text{ - mai precis : } \begin{cases} B_{RS}^\wedge = -B_{RS}^s + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ST}^s - G_{TR}^s) \\ B_{ST}^\wedge = -B_{ST}^s + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{TR}^s - G_{RS}^s) \\ B_{TR}^\wedge = -B_{TR}^s + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{RS}^s - G_{ST}^s) \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\text{Se observă că } B_{RS}^{\Delta} + B_{ST}^{\Delta} + B_{TR}^{\Delta} = -(B_{RS}^S + B_{ST}^S + B_{TR}^S). \quad (3.21)$$

Deci în compensator trebuie instalată o putere reactivă egală și de sens contrar cu cea consumată.

Ansamblul sarcină-instalație de compensare va putea fi reprezentat deci printr-o schemă echivalentă în Δ , având parametrii transversali echivalenți :

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{RS}^c &= G_{RS}^S - jB_{RS}^c & B_{RS}^c &= B_{RS}^S + B_{RS}^{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^S - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^S \\ \underline{Y}_{ST}^c &= G_{ST}^S - jB_{ST}^c & \text{în care : } B_{ST}^c &= B_{ST}^S + B_{ST}^{\Delta} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{RS}^S + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^S \\ \underline{Y}_{TR}^c &= G_{TR}^S - jB_{TR}^c & B_{TR}^c &= B_{TR}^S + B_{TR}^{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{RS}^S - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^S \end{aligned} \quad (3.22)$$

Folosind acum relațiile de trecere la schema echivalentă în conexiunea Y a acestui ansamblu ($\Delta 4.9$), se obține :

$$\begin{aligned} G_R &= G_S = G_T = G_{RS}^S + G_{ST}^S + G_{TR}^S = G \\ B_R &= B_S = B_T = 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Aceste echivalențe sunt ilustrate în figura 3.3

Relația (3.24) confirmă și egalitatea puterilor active absorbite din sistem înainte și după compensare, respectiv pentru schemele echivalente în Δ și Y, deoarece :

$$G_{RS} + G_{ST} + G_{TR} = \frac{1}{3} \cdot (G_R + G_S + G_T) \quad (3.25)$$

așa cum a rezultat și în ANEXA 4.

O particularizare a acestui caz este problema pusă de C.P. Steinmetz ([58]), care își propunea echilibrarea unei rețele trifazate în care se considera un consumator simplu, de tip rezistiv, cuplat între 2 faze. De exemplu :

$$\underline{Y}_{RS} = G_{RS} = G \quad (\underline{Y}_{ST} = 0, \underline{Y}_{TR} = 0) \quad (3.26)$$

Dacă în relațiile (3.20) se pun : $B_{RS}^S = 0, G_{ST}^S = 0, B_{ST}^S = 0, G_{TR}^S = 0$ și $B_{TR}^S = 0$ se obțin tocmai relațiile lui Steinmetz, adică :

$$B_{RS}^{\Delta} = 0 \quad B_{ST}^{\Delta} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G \quad B_{TR}^{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G \quad (3.27)$$

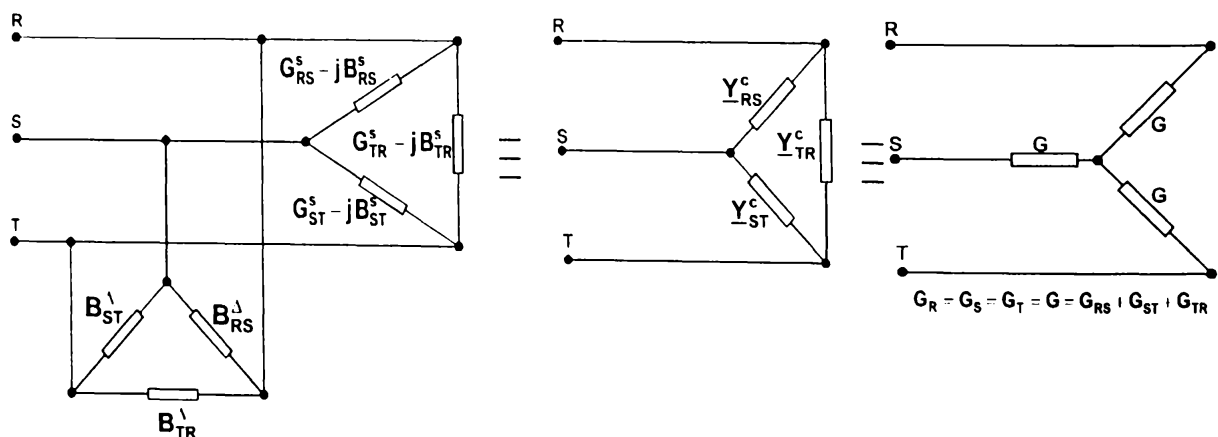


Fig. 3.3. Echivalența ansamblului sarcină-compensator cu o sarcină activă echilibrată.

B_{ST}^{Δ} va fi deci o susceptanță capacitivă iar B_{TR}^{Δ} o susceptanță inductivă, egală în valoare absolută cu B_{ST}^{Δ} , valorile lor depinzând de sarcina activă ce trebuie compensată. Montajului din figura 3.4a îi va corespunde deci schema echivalentă din figura 3.4b.

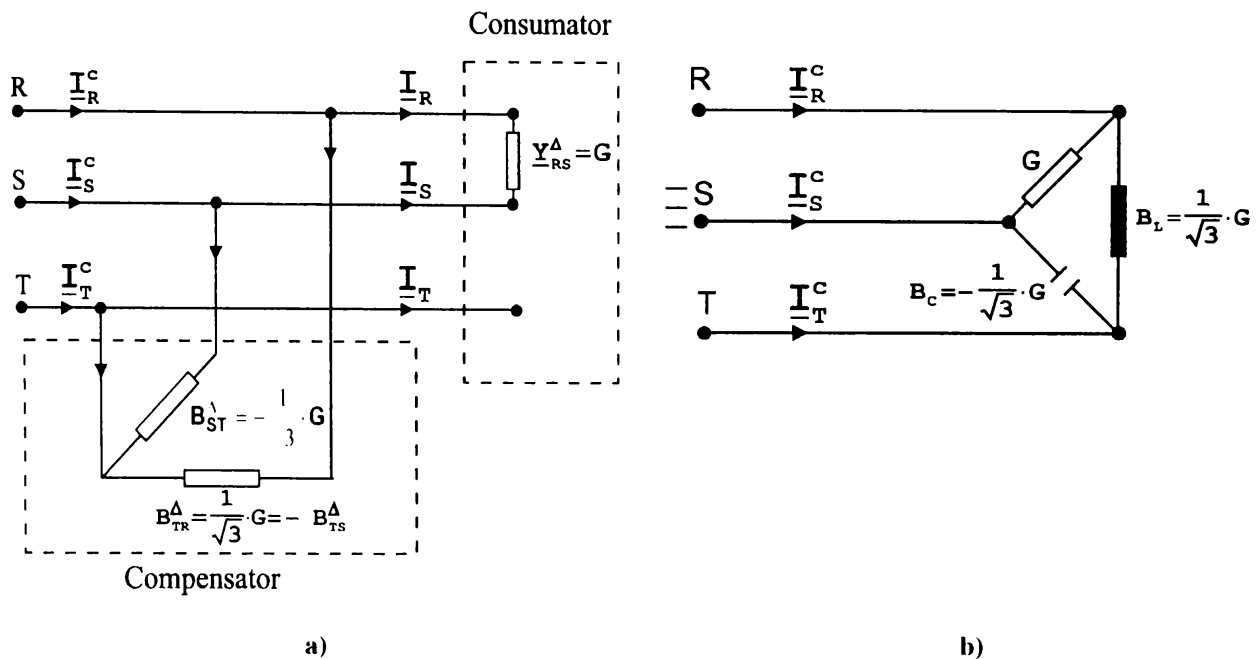


Fig. 3.4. Compensarea pentru simetrizare a unei sarcini rezistive conectate între 2 faze, a) montajul sarcină-compensator; b) schema echivalentă.

Folosind relațiile (A4.9) de trecere de la schema echivalentă în Δ la cea în Y pentru un consumator oarecare, reprezentat prin admitanțe, în care se fac particularizările conform rezultatului prezentat în figura 3.4b, adică :

$$\begin{aligned} G_{RS} &= G & G_{ST} &= G_{TR} = 0 \\ B_{RS} &= 0 & B_{ST} &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G & B_{TR} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G \end{aligned} \quad (3.28)$$

se obține : $G_R = G_S = G_T = G$ și $B_R = B_S = B_T = 0$

Cu alte cuvinte, compensarea ne conduce la o schemă perfect simetrică (Fig.3.5b) în care, în plus, așa cum ne-am propus de altfel, nu se absoarbe putere reactivă din rețea ($\cos\varphi = 1$).

Se obține un lucru “spectaculos” cel puțin la prima vedere : **se poate face echilibrarea sarcinii active cu ajutorul unor sarcini reactive.**

Se constată ușor că puterea activă totală absorbită din rețea înainte de compensare nu se modifică după compensare :

$$P = U_{RS}^2 \cdot G_{RS} = (\sqrt{3} \cdot U)^2 \cdot G_{RS} = 3 \cdot U^2 \cdot G, \quad (3.29)$$

$$P^c = U_R^2 \cdot G_R + U_S^2 \cdot G_S + U_T^2 \cdot G_T = 3 \cdot U^2 \cdot G$$

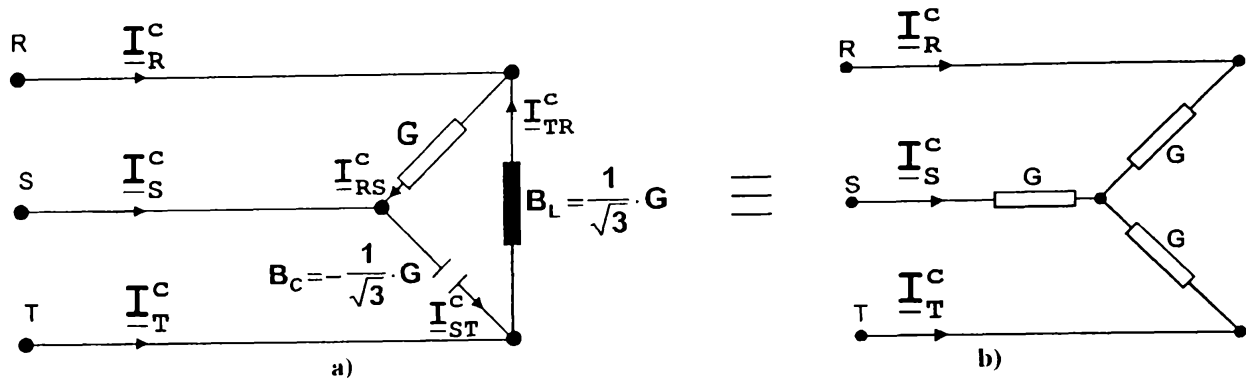


Fig. 3.5. Echivalența $\Delta - Y$ după compensare .

Mecanismul compensării sarcinii active monofazate este descris în figura 3.6. Considerând tensiunea fazei R în axa reală, fazorii tensiunilor sunt :

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_R &= U_R = U & \underline{U}_{RS} &= \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \\
 \underline{U}_S &= a^2 \cdot U & \underline{U}_{ST} &= \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} \\
 \underline{U}_T &= a \cdot U & \underline{U}_{TR} &= \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{j\frac{5\pi}{6}}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Curenții prin elementele schemei echivalente în Δ după compensare (fig.3.6a) devin:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{RS} &= \underline{U}_{RS} \cdot \underline{Y}_{RS} = \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot G = \sqrt{3} \cdot U \cdot G \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \\
 \underline{I}_{ST} &= \underline{U}_{ST} \cdot \underline{Y}_{ST} = \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} \cdot j \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G = U \cdot G \\
 \underline{I}_{TR} &= \underline{U}_{TR} \cdot \underline{Y}_{TR} = \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{j\frac{5\pi}{6}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} = U \cdot G \cdot e^{j\frac{\pi}{3}}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

iar curenții pe fazele liniei de alimentare (egali cu cei prin elementele schemei echivalente în Y) :

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_R^c &= \underline{I}_{RS}^c - \underline{I}_{TR}^c = U \cdot G = \underline{U}_R \cdot G \\
 \underline{I}_S^c &= \underline{I}_{ST}^c - \underline{I}_{TR}^c = U \cdot G \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} = \underline{U}_S \cdot G \\
 \underline{I}_T^c &= \underline{I}_{TR}^c - \underline{I}_{ST}^c = U \cdot G \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} = \underline{U}_T \cdot G
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Curenții pe faze sunt deci egali ca valoare efectivă și în fază cu tensiunile fazelor respective. S-a obținut deci o sarcină echivalentă pur rezistivă și echilibrată .

3.3.2. Semnificația fizică a relațiilor pentru calculul susceptanțelor de compensare

Problema compensării va consta deci în a găsi o rețea de admitanțe reactive (susceptanțe) care, combinate cu admitanțele sarcinii va conduce la imaginea unei sarcini rezistive și echilibrate, racordate la rețeaua de distribuție.

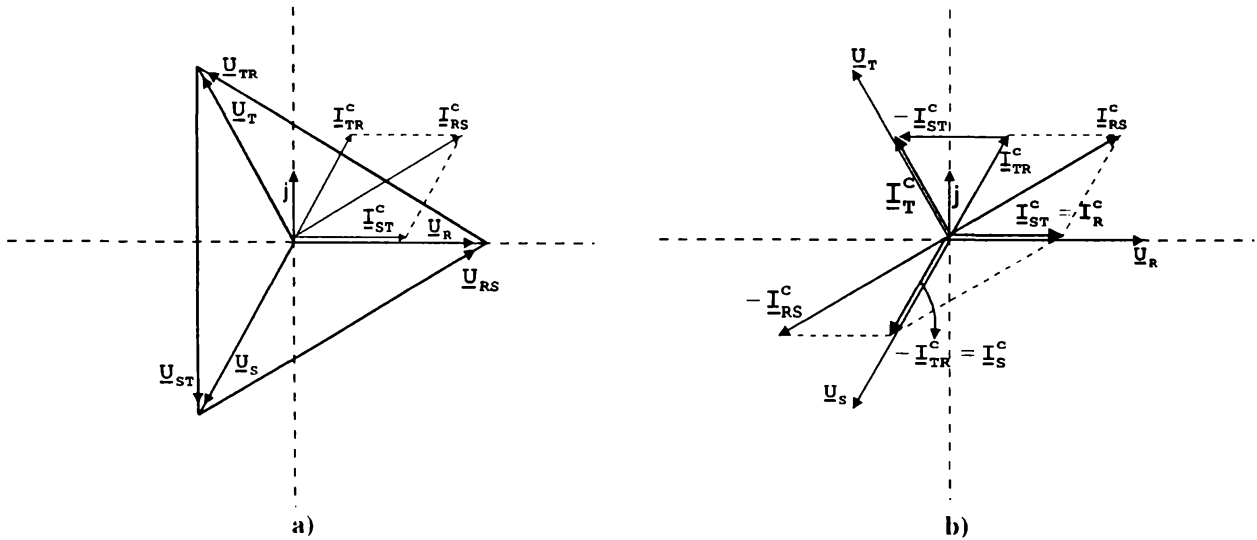


Fig. 3.6. Diagrammele fazoriale pentru evidențierea relațiilor între curenți și a mecanismului compensării sarcinii rezistive monofazate

Cele 3 admitanțe echivalente ale sarcinii din schema în Δ (fig. 3.1a) pot fi compensate separat, ca și cum ar fi 3 sarcini monofazate.

Să considerăm de exemplu o sarcină monofazată, cuplată între fazele R și S, $Y_{RS}^s = G_{RS}^s - jB_{RS}^s$. La primul pas al compensării se va anula componenta reactivă a acestei admitanțe, conectând în paralel cu Y_{RS}^s o susceptanță de compensare $-B_{RS}$ (fig. 3.7).

La un al doilea pas al compensării, admitanței G_{RS}^s trebuie să i se adauge două susceptanțe: una capacitivă $B_{ST}^{c1} = -1/\sqrt{3} \cdot G_{RS}^s$ și cealaltă inductivă $B_{RT}^{c1} = 1/\sqrt{3} \cdot G_{RS}^s$ (conform relațiilor lui Steinmetz), care vor face ca sarcina "văzută" de rețeaua de alimentare, să devină echilibrată și pur activă (fig. 3.8)

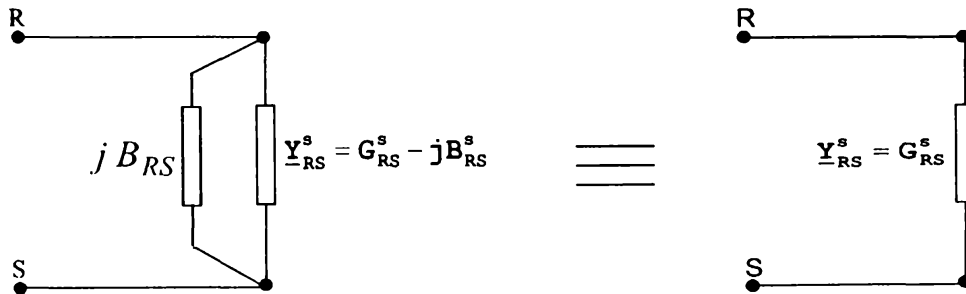


Fig. 3.7. Compensarea părții reactive B_{RS} a admitanței Y_{RS} prin intermediul susceptanței $-B_{RS}$

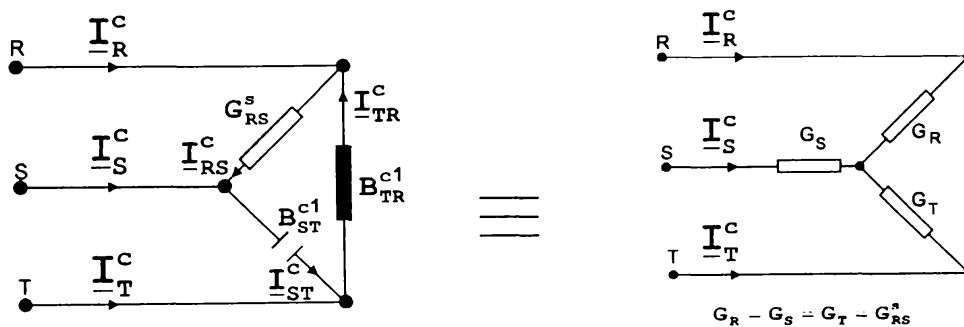


Fig. 3.8. Compensarea pentru echilibrare a componentei active (G_{RS}) a sarcinii

O procedură similară celei prezentate mai sus poate fi urmată pentru compensarea celorlalte elemente ale sarcinii trifazate \underline{Y}_{ST} și \underline{Y}_{TR} (figurile 3.9 și 3.10).

Mai întâi se anulează susceptanțele B_{ST}^s și B_{TR}^s prin două susceptanțe de compensare de semn opus $-B_{ST}^s$ și respectiv $-B_{TR}^s$, apoi se echilibrează conductanțele G_{ST}^s și G_{TR}^s prin două perechi de susceptanțe :

$$B_{TR}^{c2} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^s \quad B_{RS}^{c1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^s \quad (3.33)$$

respectiv, $B_{RS}^{c2} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^s \quad B_{ST}^{c1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^s \quad (3.34)$

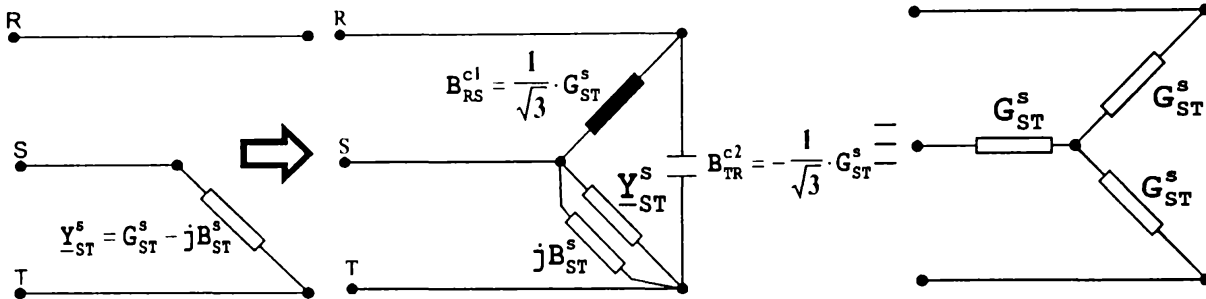


Fig. 3.9. Compensarea sarcinii monofazate \underline{Y}_{ST}^s prin susceptanțele $-B_{ST}^s$, B_{RS}^c și B_{TR}^c

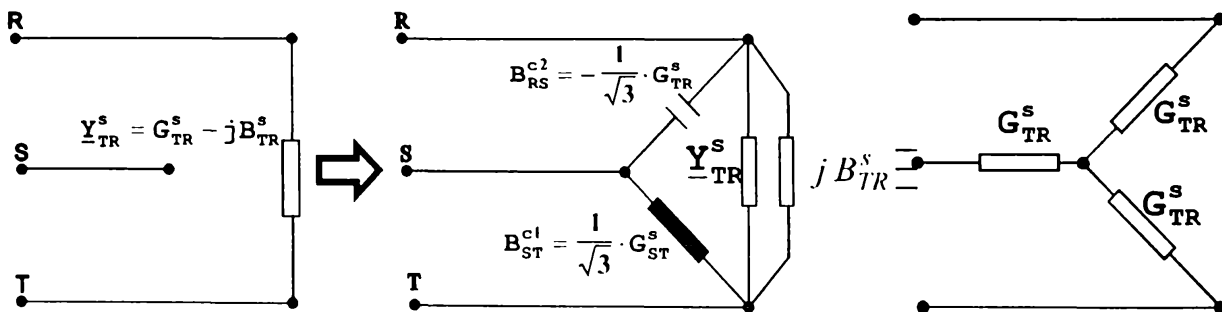


Fig. 3.10. Compensarea sarcinii monofazate \underline{Y}_{TR}^s prin susceptanțele $-B_{TR}^s$, B_{RS}^c și B_{ST}^c

Suprapunând cele 3 rezultate ale compensării monofazate se obține rezultatul compensării trifazate (fig. 3.11). Astfel susceptanțele de compensare rezultante, care vor constitui elementele schemei de compensare în Δ vor fi :

$$\begin{aligned} B_{RS}^{\lambda} &= -B_{RS}^s + B_{RS}^{c1} + B_{RS}^{c2} = -B_{RS}^s + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^s - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^s \\ B_{ST}^{\lambda} &= -B_{ST}^s + B_{ST}^{c1} + B_{ST}^{c2} = -B_{ST}^s - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{RS}^s + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{TR}^s \\ B_{TR}^{\lambda} &= -B_{TR}^s + B_{TR}^{c1} + B_{TR}^{c2} = -B_{TR}^s + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{RS}^s - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_{ST}^s \end{aligned} \quad (3.35)$$

deci ecuații identice cu (3.20).

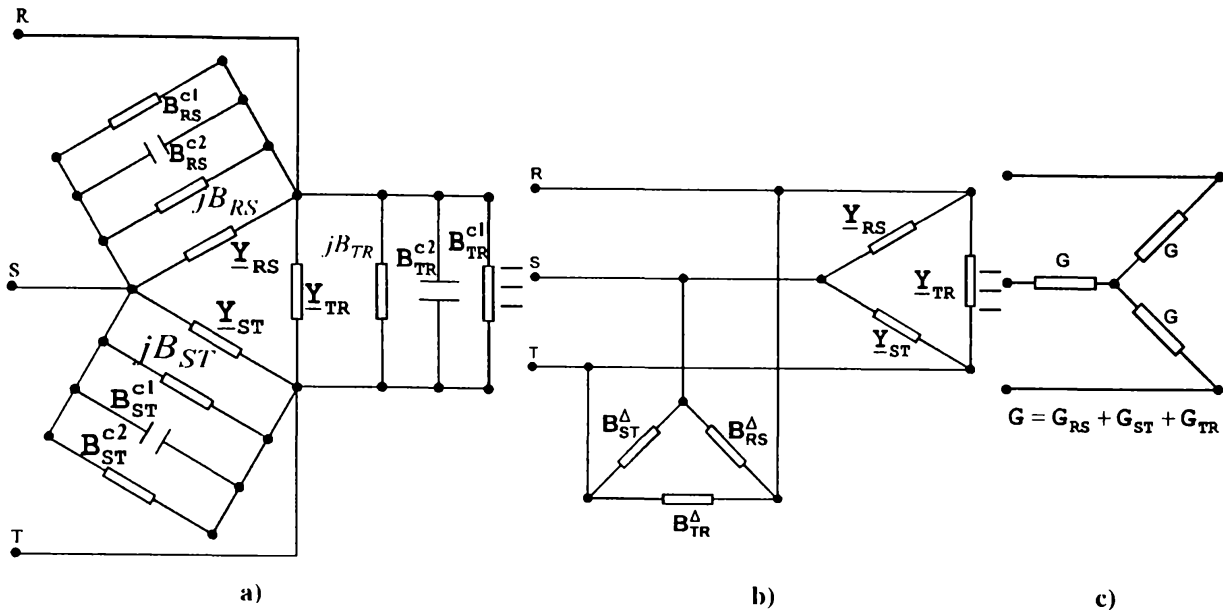


Fig.3.11. Aplicarea principiului compensării unei sarcini monofazate la o sarcină trifazată dezechilibrată

Primul termen din ecuațiile (3.35) reprezintă componenta reactivă a sarcinii pentru elementul respectiv al schemei echivalente în Δ , pe când al doilea și al treilea termen reprezintă necesarul de reactiv pentru echilibrarea componentei active a celorlalte două elemente ale schemei echivalente în Δ .

Se observă ușor că :

$$B_{RS}^{\Delta} + B_{ST}^{\Delta} + B_{TR}^{\Delta} = -(B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s) \quad (3.36)$$

ceea ce înseamnă că puterea reactivă totală în elementul de compensare este egală și de sens contrar cu puterea reactivă totală absorbită din rețea de către sarcină, obținându-se în fapt compensarea integrală a acesteia ($\cos\varphi = 1$).

Compensarea puterii reactive se realizează nesimetric, după o lege bine determinată (3.35), care conduce la obținerea unei scheme echivalente pur active și simetrice.

Se poate observa de asemenea că dacă partea reală a sarcinii este echilibrată, adică $G_{RS} = G_{ST} = G_{TR}$, problema compensării se reduce la anularea părții reactive a sarcinii pentru fiecare element echivalent corespunzător schemei în Δ , pentru că elementele instalației de compensare devin :

$$B_{RS}^{\Delta} = -B_{RS}^s, \quad B_{ST}^{\Delta} = -B_{ST}^s, \quad B_{TR}^{\Delta} = -B_{TR}^s \quad (3.37)$$

Se poate generaliza deci că o sarcină trifazată dezechilibrată liniară oarecare se poate transforma folosind susceptanțe de compensare corespunzător alese într-o sarcină echivalentă activă, echilibrată, care poate fi reprezentată cu ajutorul a 3 rezistențe conectate în Y, fiecare corespunzând unei conductanțe care este suma conductanțelor sarcinii propriu-zise în reprezentare Δ :

$$G = G_{RS} + G_{ST} + G_{TR} \quad (3.38)$$

3.3.3. Elementele schemei de compensare exprimate cu ajutorul componentelor de secvență ale curenților de sarcină

Exprimarea elementelor schemei de compensare prin folosirea componentelor de secvență ale curenților de sarcină va permite o interpretare completă a mecanismului compensării puterii reactive în cazul consumatorilor dezechilibrați.

Să considerăm deci din nou sarcina generală trifazată dezechilibrată, alimentată de la o sursă echilibrată trifazată, fără conductor neutru, reprezentată prin schema echivalentă în Δ , ca în figura 3.2.

Cei 3 curenți absorbiți de sarcină vor fi :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \underline{I}_{RS}^s - \underline{I}_{TR}^s = \underline{Y}_{RS}^s \cdot \underline{U}_{RS} - \underline{Y}_{TR}^s \cdot \underline{U}_{TR} = U \cdot \left[\underline{Y}_{RS}^s \cdot (1 - a^2) - \underline{Y}_{TR}^s \cdot (a - 1) \right] \\ \underline{I}_S &= \underline{I}_{ST}^s - \underline{I}_{RS}^s = \underline{Y}_{ST}^s \cdot \underline{U}_{ST} - \underline{Y}_{RS}^s \cdot \underline{U}_{RS} = U \cdot \left[\underline{Y}_{ST}^s \cdot (a^2 - a) - \underline{Y}_{RS}^s \cdot (1 - a^2) \right] \\ \underline{I}_T &= \underline{I}_{TR}^s - \underline{I}_{ST}^s = \underline{Y}_{TR}^s \cdot \underline{U}_{TR} - \underline{Y}_{ST}^s \cdot \underline{U}_{ST} = U \cdot \left[\underline{Y}_{TR}^s \cdot (a - 1) - \underline{Y}_{ST}^s \cdot (a^2 - a) \right] \end{aligned} \quad (3.39)$$

Scriem din nou relațiile de legătură între curenții de fază ai sarcinii și componentele lor de secvență :

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^s &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + a \cdot \underline{I}_S + a^2 \cdot \underline{I}_T) \\ \underline{I}_i^s &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + a^2 \cdot \underline{I}_S + a \cdot \underline{I}_T) \\ \underline{I}_h^s &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) \end{aligned} \quad (3.40) \quad \begin{cases} \underline{I}_R = \underline{I}_h^s + \underline{I}_d^s + \underline{I}_i^s \\ \underline{I}_S = \underline{I}_h^s + a^2 \cdot \underline{I}_d^s + a \cdot \underline{I}_i^s \\ \underline{I}_T = \underline{I}_h^s + a \cdot \underline{I}_d^s + a^2 \cdot \underline{I}_i^s \end{cases} \quad (3.41)$$

în care \underline{I}_d^s , \underline{I}_i^s și \underline{I}_h^s sunt componentele de secvență directă, inversă și homopolară de referință (corespunzătoare fazei R). Substituind ecuațiile (3.39) în ecuațiile (3.40) se obțin componentele simetrice în funcție de admitanțele sarcinii :

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^s &= U \cdot (\underline{Y}_{RS}^s + \underline{Y}_{ST}^s + \underline{Y}_{TR}^s) \\ \underline{I}_i^s &= -U \cdot (a^2 \cdot \underline{Y}_{RS}^s + \underline{Y}_{ST}^s + a \cdot \underline{Y}_{TR}^s) \\ \underline{I}_h^s &= 0 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Scopurile compensării puterii reactive în cazul unui consumator dezechilibrat, pot fi exprimate prin folosirea componentelor simetrice ale curenților de fază, în modul următor :

1. Eliminarea componentelor reală și imaginară a curentului de secvență inversă, pentru obținerea echilibrării ,
2. Eliminarea (sau reducerea) componentei imaginare (reactive) a curentului de secvență directă, pentru corecția factorului de putere.

Considerând aceeași schemă de compensare din figura 3.2, în conexiune Δ , formată din elemente reactive (susceptanțe inductive și/sau capacitive), ne propunem să stabilim relațiile dintre mărimile acestora și componentele simetrice ale curenților de sarcină.

Pentru aceasta se scriu mai întâi componentele simetrice ale curenților corespunzător instalației de compensare. Schema de conexiune fiind tot Δ , se vor obține relații asemănătoare cu ecuațiile (3.42) :

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^\lambda &= -j \left(B_{RS}^\lambda + B_{ST}^\lambda + B_{TR}^\lambda \right) \cdot U \\ \underline{I}_i^\lambda &= j \left(a^2 \cdot B_{RS}^\lambda + B_{ST}^\lambda + a \cdot B_{TR}^\lambda \right) \cdot U = \\ &= U \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(B_{TR}^\lambda - B_{RS}^\lambda \right) + j \cdot U \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(B_{RS}^\lambda - 2 \cdot B_{ST}^\lambda + B_{TR}^\lambda \right) \\ \underline{I}_h^\lambda &= 0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

Componentele simetrice ale curenților de fază absorbiți din rețea de către ansamblul consumator-compensator vor fi deci :

$$\begin{aligned}\underline{I}_d^c &= \underline{I}_d^s + \underline{I}_d^\Delta \\ \underline{I}_i^c &= \underline{I}_i^s + \underline{I}_i^\Delta \\ \underline{I}_h^c &= 0\end{aligned}\tag{3.44}$$

Echilibrarea sarcinii și corecția factorului de putere ($\cos\varphi = 1$) se vor obține, așa cum s-a precizat, dacă :

$$\begin{cases} \text{Im}(\underline{I}_d^c) = 0 \\ \text{Re}(\underline{I}_i^c) = 0 \\ \text{Im}(\underline{I}_i^c) = 0 \end{cases}\tag{3.45}$$

sau dezvoltând :

$$\begin{cases} \text{Im}(\underline{I}_d^s) - U \cdot (B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta + B_{TR}^\Delta) = 0 \\ \text{Re}(\underline{I}_i^s) - U \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} (B_{TR}^\Delta - B_{RS}^\Delta) = 0 \\ \text{Im}(\underline{I}_i^s) - U \cdot \frac{1}{2} (B_{RS}^\Delta - 2B_{ST}^\Delta + B_{TR}^\Delta) = 0 \end{cases}\tag{3.46}$$

Rezolvarea acestui sistem de ecuații în care necunoscutele sunt elementele instalației de compensare, conduce la obținerea următoarelor soluții :

$$\begin{aligned}B_{RS}^\Delta &= -\frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) + \text{Re}(\underline{I}_i^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \right] \\ B_{ST}^\Delta &= -\frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \text{Re}(\underline{I}_i^s) \right] \\ B_{TR}^\Delta &= -\frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) - \text{Re}(\underline{I}_i^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \right]\end{aligned}\tag{3.47}$$

Ecuațiile (3.47) exprimă deci elementele instalației de compensare în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină. Se poate observa că cele 3 susceptanțe de compensare depind în aceeași măsură de partea imaginară a componentei de secvență directă

Cum circulația curenților de secvență directă și cea a curenților de secvență inversă se pot considera independente, Δ de compensare se poate descompune de asemenea în două Δ independente.

Astfel un Δ echilibrat va produce compensarea (anularea) componentei reactive a curentului de secvență directă a sarcinii iar celălalt Δ , dezechilibrat, va anula curentul de secvență inversă al sarcinii.

Acest mecanism al compensării componentelor de secvență ale curenților de sarcină este ilustrat în figura 3.12 .

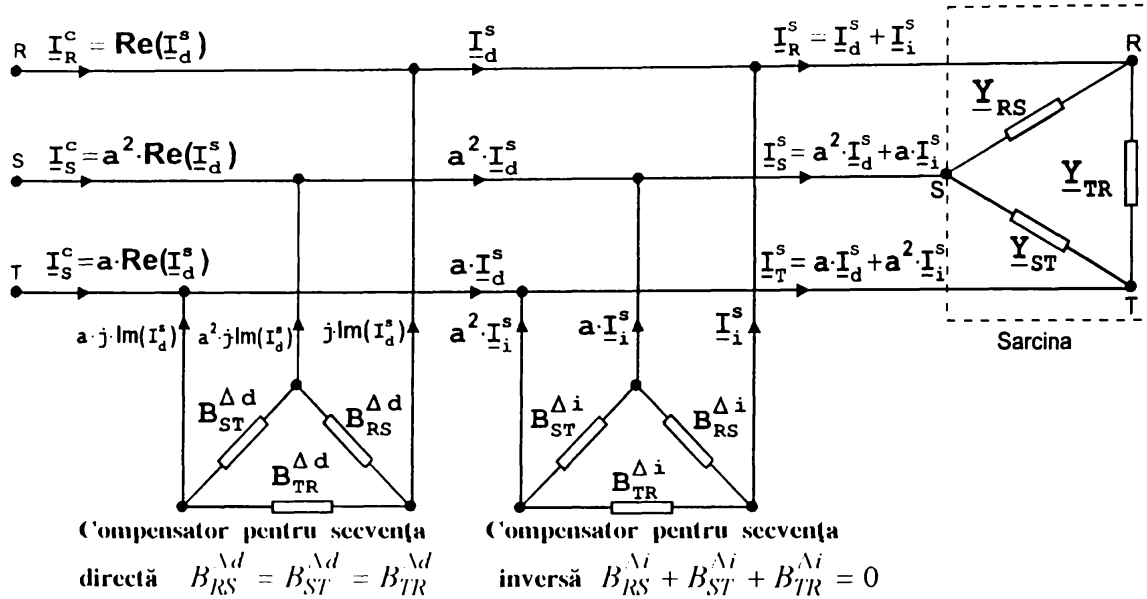


Fig. 3.12. Reprezentarea compensatorului cu ajutorul a două compensatoare independente : unul pentru compensare pe secvența directă și celălalt pentru compensare pe secvența inversă a curentului de sarcină

Elementele celor două compensatoare vor fi :

$$\begin{aligned}
 B_{RS}^{\Delta d} &= B_{ST}^{\Delta d} = B_{TR}^{\Delta d} = \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \text{Im}(I_d^s) \\
 B_{RS}^{\Delta i} &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \text{Re}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \text{Im}(I_i^s) \\
 B_{ST}^{\Delta i} &= -\frac{2}{3 \cdot U} \cdot \text{Im}(I_i^s) \\
 B_{TR}^{\Delta i} &= \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \text{Re}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \text{Im}(I_i^s)
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

sau, exprimând părțile reale și imaginare ale componentelor simetrice cu expresiile lor în funcție de elementele schemei echivalente a sarcinii, adică :

$$\begin{aligned}
 \text{Im}(I_d^s) &= -(B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s) \cdot U \\
 \text{Re}(I_i^s) &= \left(\frac{1}{2} \cdot G_{RS}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} B_{RS}^s - G_{ST}^s + \frac{1}{2} \cdot G_{TR}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR}^s \right) \cdot U \\
 \text{Im}(I_i^s) &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS}^s - \frac{1}{2} B_{RS}^s + B_{ST}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR}^s - \frac{1}{2} \cdot B_{TR}^s \right) \cdot U
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

se obțin :

$$\begin{aligned}
 B_{RS}^{\Delta d} &= B_{ST}^{\Delta d} = B_{TR}^{\Delta d} = -\frac{1}{3} \cdot (B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s) \\
 B_{RS}^{\Delta i} &= \frac{2}{3} \cdot B_{RS}^s - \frac{1}{3} \cdot B_{ST}^s - \frac{1}{3} \cdot B_{TR}^s + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{TR}^s - G_{ST}^s) \\
 B_{ST}^{\Delta i} &= -\frac{1}{3} \cdot B_{RS}^s + \frac{2}{3} \cdot B_{ST}^s - \frac{1}{3} \cdot B_{TR}^s + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{RS}^s - G_{TR}^s) \\
 B_{TR}^{\Delta i} &= -\frac{1}{3} \cdot B_{RS}^s - \frac{1}{3} \cdot B_{ST}^s + \frac{2}{3} \cdot B_{TR}^s + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{ST}^s - G_{RS}^s)
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Se observă că suma elementelor din Δ pentru compensarea secvenței inverse a curentului de sarcină este nulă .

$$B_{RS}^{\Delta i} + B_{ST}^{\Delta i} + B_{TR}^{\Delta i} = 0 \quad (3.51)$$

La același rezultat se poate ajunge și prin scrierea unor relații de forma (3.43) pentru acest Δ , punând condiția ca aceasta să nu conțină în curenții pe fază componenta de secvență directă :

$$\underline{I}_d^{\Delta i} = 0 \quad (3.52)$$

În schimb suma elementelor componente ale Δ pentru compensarea pe secvența directă a curenților de sarcină va fi de semn opus sumei elementelor reactive ale sarcinii.

Se poate observa de asemenea că prin însumarea elementelor reactive din cele două Δ , se verifică expresiile (3.20) .

3.3.4. Curenții de compensare exprimați în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină

Relațiile (3.47) se pot transforma ușor în relații între curenții de compensare (de pe laturile Δ de compensare) și componentele de secvență de referință, ale curenților de sarcină.

$$\underline{I}_{RS}^{\Delta} = \underline{U}_{RS} \cdot \underline{Y}_{RS}^{\Delta} = \underline{U}_{RS} \cdot (-jB_{RS}^{\Delta}) \quad (3.52)$$

$$I_{RS}^{\Delta} = \sqrt{3} \cdot U \cdot B_{RS}^{\Delta} \quad (3.53)$$

Conform convenției, dacă $B_{RS}^{\Delta} < 0 \Rightarrow I_{RS}^{\Delta} < 0$, având deci caracter pur capacitiv și pentru $B_{RS}^{\Delta} > 0 \Rightarrow I_{RS}^{\Delta} > 0$ caracter pur inductiv. Relațiile (3.47) se pot scrie deci sub forma :

$$\begin{aligned} I_{RS}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) - \text{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \\ I_{ST}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \\ I_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) + \text{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \end{aligned} \quad (3.54)$$

3.3.5. Circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată cu ajutorul componentelor simetrice

Se pot astfel determina curenții pe laturile celor două compensatoare fictive Δd și Δi :

$$\begin{aligned} I_{RS}^{\Delta d} &= I_{ST}^{\Delta d} = I_{TR}^{\Delta d} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) \\ I_{RS}^{\Delta i} &= -\text{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \\ I_{ST}^{\Delta i} &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \\ I_{TR}^{\Delta i} &= \text{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s) \end{aligned} \quad (3.55)$$

Cu aceste relații se pot determina curenții pe fiecare fază a celor două compensatoare fictive și apoi circulația de curenți, în componente simetrice, în interiorul ansamblului consumator-compensator. Pentru aceasta se utilizează relațiile de legătură între curenții pe faze și cei de pe laturile unui Δ (relația A6.23) :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{M,i} &= \frac{1}{2} \cdot (\underline{I}_{RS}^{M,i} - \underline{I}_{TR}^{M,i}) + j \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{I}_{RS}^{M,i} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{I}_{TR}^{M,i} \right) \\ \underline{I}_S^{M,i} &= -\frac{1}{2} \cdot (\underline{I}_{RS}^{M,i} + 2 \cdot \underline{I}_{ST}^{M,i}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{I}_{RS}^{M,i} \\ \underline{I}_T^{M,i} &= \frac{1}{2} \cdot (\underline{I}_{TR}^{M,i} + 2 \cdot \underline{I}_{ST}^{M,i}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{I}_{TR}^{M,i} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Se obțin :

- pe faza R :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{M} &= -j \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \\ \underline{I}_R^N &= -\operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) - j \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) = -\underline{I}_i^s \end{aligned} \quad (3.57)$$

ceea ce înseamnă că compensatorul Δd compensează componenta reactivă a curentului de secvență directă iar compensatorul Δi compensează componentele activă și reactivă ale curentului de secvență inversă .

De altfel, același mecanism se regăsește și pe celelalte două faze :

- pe faza S :

$$\begin{aligned} \underline{I}_S^{M} &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + j \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) = -a^2 \cdot j \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \\ \underline{I}_S^N &= \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) + j \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right] = -a \cdot \underline{I}_i^s \end{aligned} \quad (3.58)$$

- pe faza T :

$$\begin{aligned} \underline{I}_T^{M} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + j \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) = -a \cdot j \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \\ \underline{I}_T^N &= \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) + j \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right] = -a^2 \cdot \underline{I}_i^s \end{aligned} \quad (3.59)$$

Se observă că compensatorul Δd produce un sistem trifazat de curenți de secvență directă, care pe fiecare fază compensează componenta reactivă a curentului de secvență directă al sarcinii :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{M} &= -j \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \\ \underline{I}_S^{M} &= a^2 \cdot \left[-j \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \right] \\ \underline{I}_T^{M} &= a \cdot \left[-j \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \right] \end{aligned} \quad (3.60)$$

iar compensatorul Δi produce un sistem trifazat de curenți de secvență inversă, care compensează pe fiecare fază curentul de secvență inversă al sarcinii (atât componenta activă cât și cea reactivă) :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{Ni} &= -\underline{I}_i^s \\
\underline{I}_S^{Ni} &= a \cdot (-\underline{I}_i^s) \\
\underline{I}_T^{Ni} &= a^2 \cdot (-\underline{I}_i^s)
\end{aligned} \tag{3.61}$$

Curenții pe fazele sarcinii sunt :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^s &= \underline{I}_d^s + \underline{I}_i^s \\
\underline{I}_S^s &= a^2 \cdot \underline{I}_d^s + a \cdot \underline{I}_i^s \\
\underline{I}_T^s &= a \cdot \underline{I}_d^s + a^2 \cdot \underline{I}_i^s
\end{aligned} \tag{3.62}$$

Prin compensare rezultă :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^c &= \underline{I}_R^s + \underline{I}_R^{Nd} + \underline{I}_R^{Ni} = \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) \\
\underline{I}_S^c &= \underline{I}_S^s + \underline{I}_S^{Nd} + \underline{I}_S^{Ni} = a^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) \\
\underline{I}_T^c &= \underline{I}_T^s + \underline{I}_T^{Nd} + \underline{I}_T^{Ni} = a \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s)
\end{aligned} \tag{3.63}$$

Deci curenții pe cele trei faze după compensare se constituie într-un sistem echilibrat, de secvență directă și conțin numai componenta activă (sunt în fază cu tensiunile de fază corespondente), egală cu componenta activă a curentului de secvență directă a sarcinii ($\operatorname{Re}(\underline{I}_d^s)$). În figura 3.13 s-a reprezentat diagrama fazorială a mecanismului compensării componentelor simetrice ale curentului de sarcină.

Mai întâi s-au reprezentat cei 3 curenți dezzechilibrați ai sarcinii care verifică condiția $\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0$ (originea comună în centrul de greutate al triunghiului format de vârfurile fazorilor) și s-au determinat grafic fazorii componentelor simetrice de referință (corespunzătoare fazei R ; a se vedea și ANEXA 7) (figura 3.13.a). Aceștia vor permite determinarea grafică a fazorilor \underline{I}_R^{Nd} și \underline{I}_R^{Ni} pentru că :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{Nd} &= -\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \\
\underline{I}_R^{Ni} &= -\underline{I}_i^s
\end{aligned} \tag{3.64}$$

Se obțin apoi curenții absorbiți pe faze de către ansamblul consumator-compensator, mai întâi prin compensarea pe secvența inversă (figura 3.13.b) și apoi prin compensarea pe secvența directă (figura 3.13.c), realizate pe baza relațiilor :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^c &= \underline{I}_R^s + \underline{I}_R^{Nd} + \underline{I}_R^{Ni} \\
\underline{I}_S^c &= \underline{I}_S^s + a^2 \cdot \underline{I}_R^{Nd} + a \cdot \underline{I}_R^{Ni} \\
\underline{I}_T^c &= \underline{I}_T^s + a \cdot \underline{I}_R^{Nd} + a^2 \cdot \underline{I}_R^{Ni}
\end{aligned} \tag{3.65}$$

Evident că în aplicații practice nu este economică folosirea a două Δ de compensare diferite. Un singur Δ având susceptanțele reglabile va fi suficient pentru a produce atât compensarea pe secvența directă cât și pe secvența inversă a curenților de sarcină .

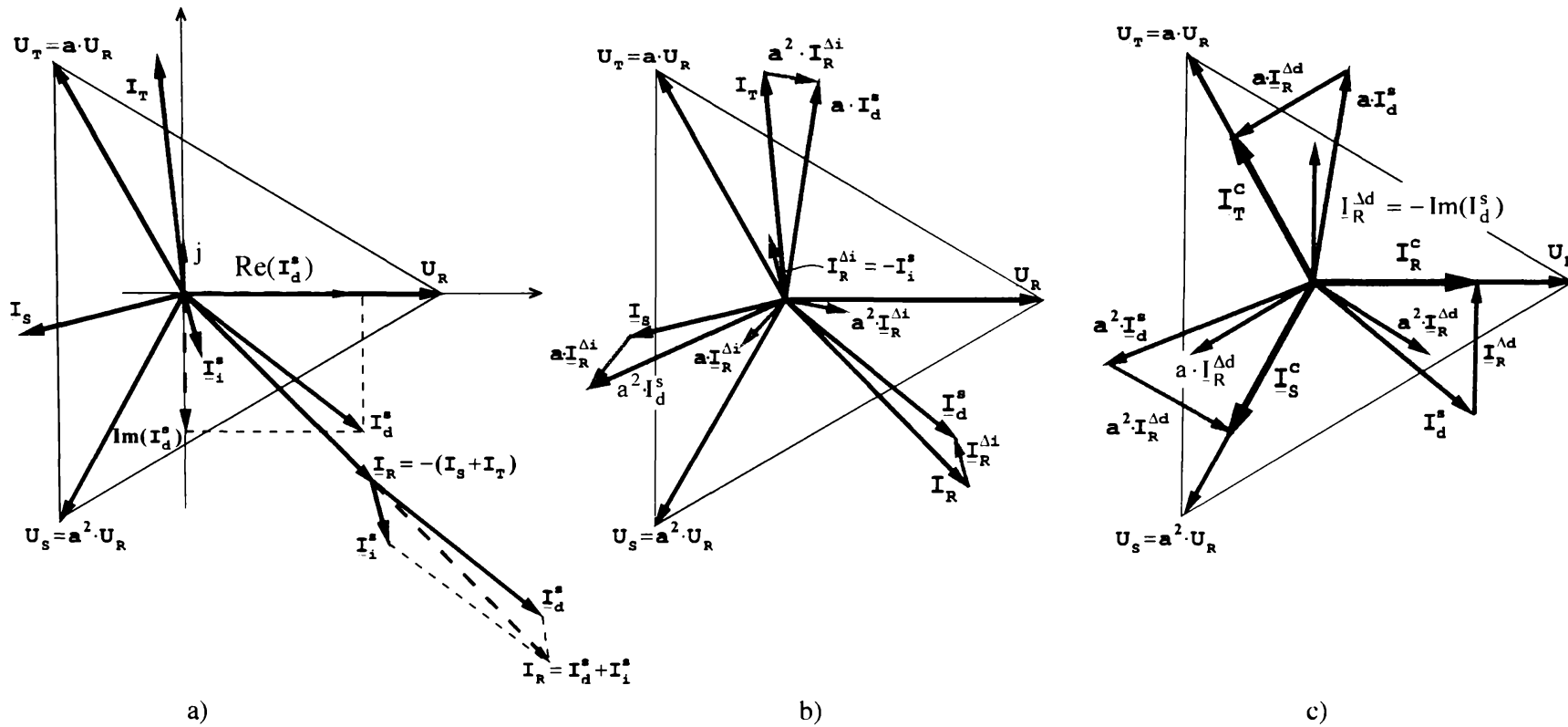


Fig. 3.13. Diagrama fazorială ce ilustrează mecanismul compensării componentelor simetrice ale curentului de sarcină.
 a) - determinarea componentelor simetrice de referință;
 b) - compensarea componentei de secvență inversă;
 c) - compensarea părții imaginare a componentei de secvență directă.

3.3.6. Curenții și elementele schemei de compensare exprimate cu ajutorul curenților de sarcină

Folosind exprimarea curenților de sarcină sub forma componentelor active și reactive și considerându-i cu caracter inductiv, adică :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^s &= I_{Ra} - jI_{Rr} \\ \underline{I}_S^s &= a^2 \cdot (I_{Sa} - jI_{Sr}) \\ \underline{I}_T^s &= a \cdot (I_{Ta} - jI_{Tr}) \end{aligned} \quad (3.66)$$

și înlocuind în expresiile curenților de secvență (3.40) rezultă :

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^s &= \frac{1}{3} \cdot (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) - j \frac{1}{3} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\ \underline{I}_i^s &= \frac{1}{3} \cdot \left(I_{Ra} - \frac{1}{2} I_{Sa} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Sr} - \frac{1}{2} I_{Ta} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Tr} \right) + j \frac{1}{3} \cdot \left(-I_{Rr} + \frac{1}{2} I_{Sr} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Sa} + \frac{1}{2} I_{Tr} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Ta} \right) \end{aligned} \quad (3.67)$$

Prin dezvoltarea relațiilor (3.54), se vor obține acum curenții de pe laturile Δ de compensare și componentele active și reactive ale curenților sarcinii :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RS}^\Delta &= \frac{1}{3} \cdot (I_{Sa} - I_{Ra}) - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot I_{Rr} + 2 \cdot I_{Sr} - I_{Tr}) \\ \underline{I}_{ST}^\Delta &= \frac{1}{3} \cdot (I_{Ta} - I_{Sa}) - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (-I_{Rr} + 2 \cdot I_{Sr} + 2 \cdot I_{Tr}) \\ \underline{I}_{TR}^\Delta &= \frac{1}{3} \cdot (I_{Ra} - I_{Ta}) - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot I_{Rr} - I_{Sr} + 2 \cdot I_{Tr}) \end{aligned} \quad (3.68)$$

respectiv :

$$\begin{aligned} B_{RS}^\Delta &= \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[(I_{Sa} - I_{Ra}) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{Tr} - 2 \cdot I_{Rr} - 2 \cdot I_{Sr}) \right] \\ B_{ST}^\Delta &= \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[(I_{Ta} - I_{Sa}) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{Rr} - 2 \cdot I_{Sr} - 2 \cdot I_{Tr}) \right] \\ B_{TR}^\Delta &= \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[(I_{Ra} - I_{Ta}) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{Sr} - 2 \cdot I_{Rr} - 2 \cdot I_{Tr}) \right] \end{aligned} \quad (3.69)$$

iar pentru compensatoarele fictive Δd și Δi , ținând cont de relațiile (3.55) se obțin :

$$\begin{aligned} I_{RS}^{\Delta d} &= I_{ST}^{\Delta d} = I_{TR}^{\Delta d} = -\frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\ I_{RS}^{\Delta i} &= \frac{1}{3} \cdot (-I_{Ra} + I_{Sa}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (-I_{Rr} - I_{Sr} + 2 \cdot I_{Tr}) \\ I_{ST}^{\Delta i} &= \frac{1}{3} \cdot (-I_{Sa} + I_{Ta}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr}) \\ I_{TR}^{\Delta i} &= \frac{1}{3} \cdot (-I_{Ta} + I_{Ra}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot (-I_{Rr} + 2 \cdot I_{Sr} - I_{Tr}) \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned}
B_{RS}^M &= B_{ST}^M = B_{TR}^M = -\frac{1}{9 \cdot U} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
B_{RS}^M &= \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[-I_{Ra} + I_{Sa} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (-I_{Rr} - I_{Sr} + 2 \cdot I_{Tr}) \right] \\
B_{ST}^M &= \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[-I_{Sa} + I_{Ta} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr}) \right] \\
B_{TR}^M &= \frac{1}{3\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left[-I_{Ta} + I_{Ra} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (-I_{Rr} + 2 \cdot I_{Sr} - I_{Tr}) \right]
\end{aligned} \tag{3.71}$$

Caracterul curenților din ecuațiile (3.68) se determină prin raportare la tensiunile de fază sau între faze, aferente fiecăruia.

Dacă tensiunile de fază nu sunt accesibile, se vor determina pe baza tensiunilor înălțuite (vezi ANEXA 4).

3.3.7. Circulația de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată în componente de fază

Exprimarea circulației de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator este utilă pentru efectuarea unor calcule de dimensionare sau pentru verificarea în instalații reale a corectitudinii compensării.

În acest scop se vor folosi relațiile (A6.23) referitoare la curenții pe fază absorbiți de compensatorul Δ , identice ca formă pentru Δd și Δi .

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{M,i} &= \frac{1}{2} \cdot (I_{RS}^{M,i} - I_{TR}^{M,i}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (I_{RS}^{M,i} + I_{TR}^{M,i}) \\
\underline{I}_S^{M,i} &= -\frac{1}{2} \cdot (I_{RS}^{M,i} + 2 \cdot I_{ST}^{M,i}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{RS}^{M,i} \\
\underline{I}_T^{M,i} &= \frac{1}{2} \cdot (I_{TR}^{M,i} + 2 \cdot I_{ST}^{M,i}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{TR}^{M,i}
\end{aligned} \tag{3.72}$$

Deoarece relațiile (3.72) sunt scrise față de planul complex aferent fazei R, pentru a determina expresiile curenților $\underline{I}_S^{M,i}$ respectiv $\underline{I}_T^{M,i}$ scrise în planuri complexe raportate la tensiunile de fază corespunzătoare (notați $\underline{I}_S^{M,i*}$ respectiv $\underline{I}_T^{M,i*}$) se calculează :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_S^{M,i*} &= a \cdot \underline{I}_S^{M,i} \\
\underline{I}_T^{M,i*} &= a^2 \cdot \underline{I}_T^{M,i}
\end{aligned} \tag{3.73}$$

Se obțin :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{M,i*} &= \frac{1}{2} \cdot (I_{RS}^{M,i} - I_{TR}^{M,i}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (I_{RS}^{M,i} + I_{TR}^{M,i}) \\
\underline{I}_S^{M,i*} &= \frac{1}{2} \cdot (I_{ST}^{M,i} - I_{RS}^{M,i}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (I_{RS}^{M,i} + I_{ST}^{M,i}) \\
\underline{I}_T^{M,i*} &= \frac{1}{2} \cdot (I_{TR}^{M,i} - I_{ST}^{M,i}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (I_{TR}^{M,i} + I_{ST}^{M,i})
\end{aligned} \tag{3.74}$$

Relațiile (3.74) permit extragerea următoarelor observații :

- * compensatorul (prin componente fictive Δd și Δi) intervine pe fiecare fază nu numai asupra circulației de putere reactivă ci și asupra circulației de putere activă (curenții pe fazele compensatorului au și componente active) ;
- * în funcție de valorile curenților de compensare (datorați susceptanțelor de pe laturile Δ , inductive sau capacitive), curenți rezultați în funcție de curenții de sarcină, pe unele faze compensatorul absoarbe iar pe altele debitează putere activă.

Aceasta este motivul pentru care se poate face afirmația că el realizează “o compensare a puterii active “. Mai precis, el produce o redistribuire a puterii active între cele trei faze, realizând echilibrarea sarcinii.

Cele trei puteri active pe fazele compensatorului sunt :

$$\begin{aligned} P_R^{\Delta d,i} &= U_R \cdot I_{Ra}^{\Delta d,i} = \frac{1}{2} \cdot U \cdot (I_{RS}^{\Delta d,i} - I_{TR}^{\Delta d,i}) \\ P_S^{\Delta d,i} &= U_S \cdot I_{Sa}^{\Delta d,i} = \frac{1}{2} \cdot U \cdot (I_{ST}^{\Delta d,i} - I_{RS}^{\Delta d,i}) \\ P_T^{\Delta d,i} &= U_T \cdot I_{Ta}^{\Delta d,i} = \frac{1}{2} \cdot U \cdot (I_{TR}^{\Delta d,i} - I_{ST}^{\Delta d,i}) \end{aligned} \quad (3.75)$$

Se poate observa, un lucru valabil de altfel pentru orice Δ format din susceptanțe ([108]) și anume faptul că :

$$\sum_{f=R,S,T} P_f^{\Delta d,i} = \sum_{f=R,S,T} U_f \cdot \operatorname{Re} \left(\underline{I}_f^{\Delta d,i} \right) = 0 \quad (3.76)$$

Deci compensatorul Δ nu modifică circulația de putere activă pe ansamblul celor trei faze ale rețelei ci doar pe fiecare fază în parte, așa cum s-a precizat mai sus .

Exprimarea curenților pe fiecare fază a compensatorului în funcție de componentele active și reactive ale curenților de sarcină se face simplu, înlocuind expresiile (3.68) în relațiile (3.74). Rezultă :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{\Delta*} &= \frac{1}{6} \cdot \left\{ -2 \cdot I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Tr} - I_{Sr}) - j \left[\sqrt{3} \cdot (I_{Sa} - I_{Ta}) - (4 \cdot I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \right] \right\} \\ \underline{I}_S^{\Delta*} &= \frac{1}{6} \cdot \left\{ I_{Ra} - 2 \cdot I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Rr} - I_{Tr}) - j \left[\sqrt{3} \cdot (I_{Ta} - I_{Ra}) - (I_{Rr} + 4 \cdot I_{Sr} + I_{Tr}) \right] \right\} \\ \underline{I}_T^{\Delta*} &= \frac{1}{6} \cdot \left\{ I_{Ra} + I_{Sa} - 2 \cdot I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Sr} - I_{Rr}) - j \left[\sqrt{3} \cdot (I_{Ra} - I_{Sa}) - (I_{Rr} + I_{Sr} + 4 \cdot I_{Tr}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.77)$$

Combinând acum relațiile (3.70) cu (3.74) se obțin expresiile pentru curenții pe fazele Δd și Δi :

$$\underline{I}_R^{\Delta d*} = \underline{I}_S^{\Delta d*} = \underline{I}_T^{\Delta d*} = j \frac{1}{3} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = -j \operatorname{Im} \{ \underline{I}_d^s \} \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{\Delta i*} &= \frac{1}{6} \cdot \left\{ -2 \cdot I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Tr} - I_{Sr}) - j \left[\sqrt{3} \cdot (I_{Sa} - I_{Ta}) - 2 \cdot I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr} \right] \right\} = -\underline{I}_i^s \\ \underline{I}_S^{\Delta i*} &= \frac{1}{6} \cdot \left\{ I_{Ra} - 2 \cdot I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Rr} - I_{Tr}) - j \left[\sqrt{3} \cdot (I_{Ta} - I_{Ra}) + I_{Rr} - 2 \cdot I_{Sr} + I_{Tr} \right] \right\} = \bar{a}^2 \cdot \underline{I}_i^s \end{aligned} \quad (3.79)$$

$$\underline{I}_T^{\Delta i*} = \frac{1}{6} \cdot \left\{ I_{Ra} + I_{Sa} - 2 \cdot I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Sr} - I_{Rr}) - j \left[\sqrt{3} \cdot (I_{Ra} - I_{Sa}) + I_{Rr} + I_{Sr} - 2 \cdot I_{Tr} \right] \right\} = \bar{a} \cdot \underline{I}_i^s$$

Relațiile (3.79) se pot simplifica dacă se au în vedere relațiile (A.5.8). Se obțin :

$$\underline{I}_i^s = \frac{1}{\sqrt{3}} [I_{Sr} - I_{Tr} + j(I_{Sa} - I_{Ta})] = \frac{1}{3} [2 \cdot I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + j(-2 \cdot I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})] \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{N*} &= \frac{1}{3} [-2 \cdot I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} + j(2 \cdot I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr})] = -\underline{I}_i^s \\ \underline{I}_S^{N*} &= \frac{1}{3} [-2 \cdot I_{Sa} + I_{Ta} + I_{Ra} + j(2 \cdot I_{Sr} - I_{Tr} - I_{Rr})] = -a^2 \cdot \underline{I}_i^s \\ \underline{I}_T^{N*} &= \frac{1}{3} [-2 \cdot I_{Ta} + I_{Ra} + I_{Sa} + j(2 \cdot I_{Tr} - I_{Rr} - I_{Sr})] = -a \cdot \underline{I}_i^s \end{aligned} \quad (3.81)$$

Utilizând acum relațiile (3.78) și (3.81) se obțin pentru curenții pe fazele compensatorului relații de calcul mult mai simple și în același timp mai clocvente :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{A*} &= \underline{I}_R^{M*} + \underline{I}_R^{N*} = \frac{1}{3} (-2 \cdot I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) + jI_{Rr} \\ \underline{I}_S^{A*} &= \underline{I}_S^{M*} + \underline{I}_S^{N*} = \frac{1}{3} (I_{Ra} - 2 \cdot I_{Sa} + I_{Ta}) + jI_{Sr} \\ \underline{I}_T^{A*} &= \underline{I}_T^{M*} + \underline{I}_T^{N*} = \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} - 2 \cdot I_{Ta}) + jI_{Tr} \end{aligned} \quad (3.82)$$

Se vede clar că compensatorul furnizează pe fiecare fază un curent a cărui componentă reactivă este egală și de sens contrar cu componenta reactivă a curentului de sarcină .

Cât privește componentele active ale curenților de compensare ele sunt pozitive sau negative, fiind chiar diferența dintre componenta activă a curentului de secvență directă (care constituie încărcarea pe fiecare fază a rețelei după compensare) și componenta activă a fiecărui curent de sarcină în parte .

$$\underline{I}_R^{C*} = \underline{I}_R^{S*} + \underline{I}_R^{A*} = \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) = \underline{I}_S^{S*} = \underline{I}_T^{S*} = \text{Re}(\underline{I}_d^s) \quad (3.83)$$

(cu * s-au notat curenții raportați la planul complex corespunzător fiecărei faze)

Se pot acum calcula curenții absorbiți pe fiecare fază de către ansamblul consumator-compensator (fig.3.14).

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{C*} &= \underline{I}_R^{S*} + \underline{I}_R^{M*} + \underline{I}_R^{N*} & \underline{I}_R^{S*} &= I_{Ra} - jI_{Rr} \\ \underline{I}_S^{C*} &= \underline{I}_S^{S*} + \underline{I}_S^{M*} + \underline{I}_S^{N*} & \underline{I}_S^{S*} &= I_{Sa} - jI_{Sr} \\ \underline{I}_T^{C*} &= \underline{I}_T^{S*} + \underline{I}_T^{M*} + \underline{I}_T^{N*} & \underline{I}_T^{S*} &= I_{Ta} - jI_{Tr} \end{aligned} \quad (3.84) \quad \text{unde} \quad (3.85)$$

Se obține :

$$\underline{I}_R^{C*} = \underline{I}_S^{C*} = \underline{I}_T^{C*} = \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) = \text{Re}(\underline{I}_d^s) \quad (3.86)$$

Se ajunge la aceleași rezultate :

- după compensare, sistemul trifazat al curenților absorbiți din rețea devine simetric și echilibrat.
- pe fiecare fază curentul este în fază cu tensiunea (are numai componenta activă), valoarea sa efectivă fiind aceeași cu media aritmetică a celor trei curenți activi ai sarcinii.
- s-au anulat curenții de secvență inversă și componenta reactivă a curentului de secvență directă .

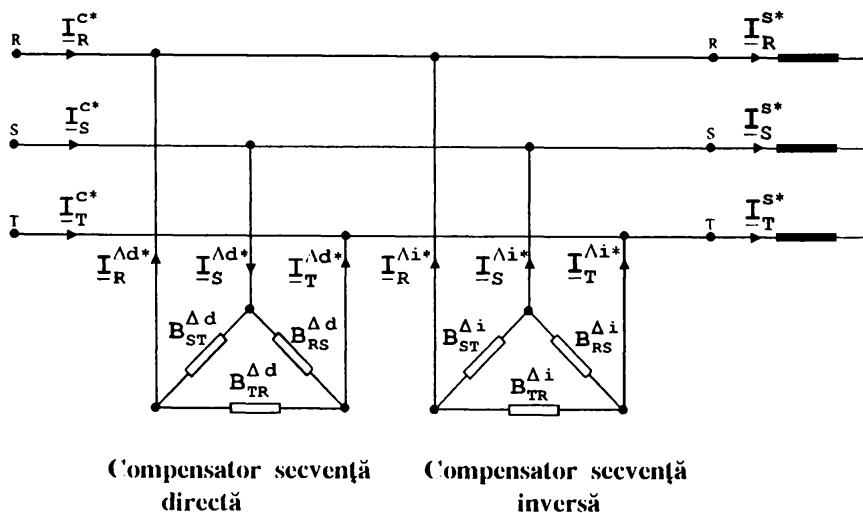


Fig. 3.14. Cîrculația curenților pe fază în interiorul ansamblului consumator-compensator

Se mai observă că :

$$I_{fr}^{\Delta d*} + I_{fr}^{\Delta i*} = -I_{fr} \quad f = R, S, T \quad (3.85)$$

Se pot acum calcula ușor puterile active și reactive pe cele trei faze ale compensatorului :

$$\begin{aligned} P_R^{\Delta} &= U_R \cdot I_{Ra}^{\Delta*} = U \cdot \frac{1}{6} \cdot [-2 \cdot I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Tr} - I_{Sr})] = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (-2 \cdot I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \\ P_S^{\Delta} &= U_S \cdot I_{Sa}^{\Delta*} = U \cdot \frac{1}{6} \cdot [I_{Ra} - 2 \cdot I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Rr} - I_{Tr})] = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Ra} - 2 \cdot I_{Sa} + I_{Ta}) \\ P_T^{\Delta} &= U_T \cdot I_{Ta}^{\Delta*} = U \cdot \frac{1}{6} \cdot [I_{Ra} + I_{Sa} - 2 \cdot I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot (I_{Sr} - I_{Rr})] = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Ra} + I_{Sa} - 2 \cdot I_{Ta}) \end{aligned} \quad (3.86)$$

$$P_R^{\Delta d} = P_S^{\Delta d} = P_T^{\Delta d} = 0 \quad (3.87)$$

$$\begin{aligned} P_R^{\Delta i} &= P_R^{\Delta} \\ P_S^{\Delta i} &= P_S^{\Delta} \\ P_T^{\Delta i} &= P_T^{\Delta} \end{aligned} \quad (3.88)$$

- Deci compensatorul de secvență directă nu intervine decât asupra circulației de putere reactivă iar compensatorul de secvență inversă, deși modifică puterea activă pe fiecare fază a rețelei compensate, pe ansamblul celor trei faze nu schimbă bilanțul puterilor active deoarece :

$$P_R^{\Delta i} + P_S^{\Delta i} + P_T^{\Delta i} = 0 \quad (3.89)$$

- Ceea ce înseamnă că pe unele faze compensatorul absoarbe putere activă iar pe celelalte debitează putere activă așa cum de altfel s-a arătat deja.
- Se produce o redistribuire a puterii active între faze.

După compensare :

$$P_R^c = P_S^c = P_T^c = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \quad (3.90)$$

și deci :

$$\sum_{f=R,S,T} P_f^c = \sum_{f=R,S,T} P_f^s = U \cdot (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \quad (3.91)$$

Puterile reactive :

$$Q_R^\lambda = U \cdot \frac{1}{6} \cdot [-4 \cdot I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr} + \sqrt{3} \cdot (I_{Sa} - I_{Ta})]$$

$$Q_S^\lambda = U \cdot \frac{1}{6} \cdot [-I_{Rr} - 4 \cdot I_{Sr} - I_{Tr} + \sqrt{3} \cdot (I_{Ta} - I_{Ra})] \quad (3.92)$$

$$Q_T^\lambda = U \cdot \frac{1}{6} \cdot [-I_{Rr} - I_{Sr} - 4 \cdot I_{Tr} + \sqrt{3} \cdot (I_{Ra} - I_{Sa})]$$

$$Q_R^{\lambda d} = Q_S^{\lambda d} = Q_T^{\lambda d} = -U \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = -U \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) \quad (3.93)$$

$$Q_R^{\lambda i} = U_{Rr} \cdot I_{Rr}^{\lambda i} \cdot U \cdot \frac{1}{6} \cdot [-2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr} + \sqrt{3} \cdot (I_{Sa} - I_{Ta})] = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (-2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = -U \cdot \text{Im}(\underline{I}_i^s)$$

$$Q_S^{\lambda i} = U_{Sr} \cdot I_{Sr}^{\lambda i} \cdot U \cdot \frac{1}{6} \cdot [I_{Rr} - 2I_{Sr} + I_{Tr} + \sqrt{3} \cdot (I_{Ta} - I_{Ra})] = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Rr} - 2I_{Sr} + I_{Tr}) = -U \cdot \text{Im}(\alpha^2 \underline{I}_i^s) \quad (3.94)$$

$$Q_T^{\lambda i} = U_{Tr} \cdot I_{Tr}^{\lambda i} \cdot U \cdot \frac{1}{6} \cdot [I_{Rr} + I_{Sr} - 2I_{Tr} + \sqrt{3} \cdot (I_{Ra} - I_{Sa})] = U \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} - 2I_{Tr}) = -U \cdot \text{Im}(\alpha \underline{I}_i^s)$$

$$Q_R^c = Q_R^s + Q_R^{\lambda d} + Q_R^{\lambda i} = 0$$

$$Q_R^{\lambda d} + Q_R^{\lambda i} = -Q_R^s$$

$$Q_S^c = Q_S^s + Q_S^{\lambda d} + Q_S^{\lambda i} = 0 \quad (3.95)$$

$$Q_S^{\lambda d} + Q_S^{\lambda i} = -Q_S^s \quad (3.96)$$

$$Q_T^c = Q_T^s + Q_T^{\lambda d} + Q_T^{\lambda i} = 0$$

$$Q_T^{\lambda d} + Q_T^{\lambda i} = -Q_T^s$$

- Pe fiecare fază compensatorul Δd compensează puterea reactivă corespunzătoare componentei de secvență directă a curenților de sarcină iar compensatorul Δi puterea reactivă corespunzătoare componentei de secvență inversă a curenților de sarcină.
- Pe fiecare fază compensatorul produce un curent reactiv egal și de semn contrar curentului reactiv al sarcinii .
- Compensatorul Δd este simetric și realizează compensarea totală a puterii reactive a sarcinii .

$$\sum_{f=R,S,T} Q_f^\lambda = - \sum_{f=R,S,T} Q_f^s \quad (3.97)$$

- Compensatorul Δi este nesimetric, nesimetric dependentă de nesimetria sarcinii .
- Pe fiecare fază Δi intervine cu altă putere reactivă, absorbită sau debitată, dar pe ansamblul celor trei faze el nu afectează circulația de putere reactivă, deoarece :

$$\sum_{f=R,S,T} Q_f^{\lambda i} = 0 \quad (3.98)$$

- Se poate spune deci că compensatorul Δi realizează o **redistribuire a puterii reactive între fazele rețelei compensate**

3.4. Criteriul b. Compensarea puterii reactive până la un factor de putere impus

Utilizarea de echipamente performante pentru compensarea on-line, face posibilă introducerea factorului de putere până la care se face compensarea, ca parametru esențial al reglajului. Acest lucru este atât în avantajul consumatorilor cât și al furnizorilor de energie electrică, utilizatori ai unor astfel de echipamente.

Din acest motiv devine necesară dezvoltarea modelului matematic corespunzător dimensionării și circulației de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator, în funcție de factorul de putere impus.

Rezolvarea acestei probleme este foarte simplă dacă se pleacă de la rezultatele obținute prin aplicarea criteriului a.

Astfel, dacă un consumator echivalent cu o structură oarecare, se poate transforma în unul perfect echilibrat și pur activ, având într-o schemă echivalentă Y:

$$G_R = G_S = G_T = G = G_{RS} + G_{ST} + G_{TR} \quad , \quad (3.99)$$

se poate concluziona imediat că factorul de putere al sarcinii rezultante ("văzute" dinspre rețea), poate fi modificat față de unitate, la orice valoare, dacă la fiecare dintre susceptanțele de pe laturile compensatorului Δ (calculate conform criteriului a) i se adaugă o aceeași susceptanță, a cărei valoare este determinată de valoarea impusă pentru factorul de putere:

$$\operatorname{tg}\varphi_i = \operatorname{tg}(\arccos\varphi_i) = \frac{B_i}{G} \quad (3.100)$$

în care:

- $\cos\varphi_i$ - factorul de putere impus pentru ansamblul consumator-compensator.

$$(\varphi_i = \varphi_{Li} - \varphi_I)$$

- B_i - susceptanța echivalentă, aceeași pe fiecare fază a schemei echivalente Y a ansamblului consumator-compensator, corespunzătoare $\cos\varphi_i$.

Deci elementele schemei de compensare conform acestui criteriu vor avea valorile calculate cu relațiile:

$$\begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= B_{RS(a)}^{\Delta} + B_{RSi} \\ B_{ST}^{\Delta} &= B_{ST(a)}^{\Delta} + B_{STi} \\ B_{TR}^{\Delta} &= B_{TR(a)}^{\Delta} + B_{TRi} \end{aligned} \quad (3.101)$$

unde:

- $B_{RS(a)}^{\Delta}, B_{ST(a)}^{\Delta}, B_{TR(a)}^{\Delta}$ - sunt susceptanțele rezultate prin aplicarea criteriului a (echilibrare + compensarea totală a puterii reactive)
- $B_{RSi}, B_{STi}, B_{TRi}$ - susceptanțele (fictive) suplimentare de pe laturile compensatorului, necesare pentru obținerea $\cos\varphi_i$.

Conform relațiilor (A4.11) se obține:

$$B_{RSi} = B_{STi} = B_{TRi} = B_i^{\Delta} = \frac{1}{3} B_i \quad (3.102)$$

Folosind acum relația (3.26) rezultă:

$$B_i^{\Delta} = \frac{1}{3} (G_{RS}^s + G_{ST}^s + G_{TR}^s) \operatorname{tg}\varphi_i \quad (3.103)$$

sau, folosind din nou relațiile (A4.11) :

$$B_i^\lambda = \frac{1}{9} \left(G_R^s + G_S^s + G_T^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \quad (3.104)$$

Combinând acum relațiile (3.101) și (3.20) se obțin:

$$\begin{aligned} B_{RS}^\lambda &= -B_{RS}^\lambda + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(G_{ST}^s - G_{TR}^s \right) + \frac{1}{3} \left(G_{RS}^s + G_{ST}^s + G_{TR}^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \\ B_{ST}^\lambda &= -B_{ST}^\lambda + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(G_{TR}^s - G_{RS}^s \right) + \frac{1}{3} \left(G_{RS}^s + G_{ST}^s + G_{TR}^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \\ B_{TR}^\lambda &= -B_{TR}^\lambda + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(G_{RS}^s - G_{ST}^s \right) + \frac{1}{3} \left(G_{RS}^s + G_{ST}^s + G_{TR}^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \end{aligned} \quad (3.105)$$

Iar din combinația relațiilor (3.101) cu (3.69) și cu (3.104) rezultă:

$$\begin{aligned} B_{RS}^\lambda &= \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(-G_R^s + G_S^s \right) + \frac{1}{9} \left(-2B_R^s - 2B_S^s + B_T^s \right) + \frac{1}{9} \left(G_R^s + G_S^s + G_T^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \\ B_{ST}^\lambda &= \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(-G_S^s + G_T^s \right) + \frac{1}{9} \left(-2B_S^s - 2B_T^s + B_R^s \right) + \frac{1}{9} \left(G_R^s + G_S^s + G_T^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \\ B_{TR}^\lambda &= \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(-G_T^s + G_R^s \right) + \frac{1}{9} \left(-2B_T^s - 2B_R^s + B_S^s \right) + \frac{1}{9} \left(G_R^s + G_S^s + G_T^s \right) \operatorname{tg} \varphi_i \end{aligned} \quad (3.106)$$

Curenții pe laturile compensatorului, obținuți bineînțeles în ipoteza simetriei totale a tensiunilor, se vor determina cu relațiile:

$$\begin{aligned} I_{RS}^\lambda &= \frac{1}{3} \left(-I_{Ra} + I_{Sa} \right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(-2I_{Rr} - 2I_{Sr} + I_{Tr} \right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) \operatorname{tg} \varphi_i \\ I_{ST}^\lambda &= \frac{1}{3} \left(I_{Ta} - I_{Sa} \right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(I_{Rr} - 2I_{Sr} - 2I_{Tr} \right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) \operatorname{tg} \varphi_i \\ I_{TR}^\lambda &= \frac{1}{3} \left(I_{Ra} - I_{Sa} \right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(-2I_{Rr} + I_{Sr} - 2I_{Tr} \right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) \operatorname{tg} \varphi_i \end{aligned} \quad (3.107)$$

Utilizând acum relațiile (A6.28) se pot determina curenții pe fazele compensatorului:

$$\begin{aligned} I_R^{\lambda*} &= \frac{1}{3} \left(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) + j \left[I_{Rr} - \frac{1}{3} \left(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) \operatorname{tg} \varphi_i \right] \\ I_S^{\lambda*} &= \frac{1}{3} \left(I_{Ra} - 2I_{Sa} + I_{Ta} \right) + j \left[I_{Sr} - \frac{1}{3} \left(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) \operatorname{tg} \varphi_i \right] \\ I_T^{\lambda*} &= \frac{1}{3} \left(I_{Ra} + I_{Sa} - 2I_{Ta} \right) + j \left[I_{Tr} - \frac{1}{3} \left(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} \right) \operatorname{tg} \varphi_i \right] \end{aligned} \quad (3.108)$$

Dacă se impune compensarea integrală a puterii reactive pe secvența directă, $\cos \varphi_i = 1$, $\operatorname{tg} \varphi_i = 0$, relațiile sunt identice cu cele de la criteriul **a**.

Criteriul a este de fapt un caz particular al criteriului b.

3.5. Criteriul c. Reglarea tensiunii pe barele consumatorului

3.5.1. Punerea problemei

Reglarea circulației de putere reactivă într-o rețea, afectează indirect valorile tensiunilor nodurilor de compensare și ale celor din amonte, prin modificarea căderilor de tensiune pe elementele de rețea. De aceea, atunci când se realizează compensarea puterii reactive, valorile tensiunilor nodurilor afectate apar fie ca restricții (de exemplu pentru respectarea unei benzi admisibile) fie ca scop al compensării.

Din aceste motive, în acest paragraf se va aborda problema dimensionării compensatorului de putere reactivă punând condiția ca pe lângă simetrizare (anularea componentelor reală și imaginară ale curentului de secvență inversă) să se obțină și anularea componentei longitudinale a căderii de tensiune pe linia electrică ce alimentează consumatorul. Altfel spus, astfel încât tensiunea la bornele consumatorului să fie (aproximativ) aceeași cu cea de la bornele sursei (fig.3.15).

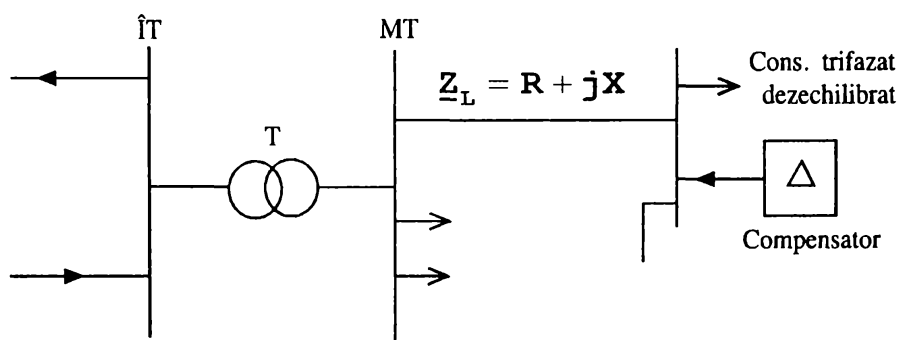


Fig. 3.15. Schema de alimentare a consumatorului dezechilibrat.

Așa cum se vede și din figura 3.15 se consideră cazul simplu al unui consumator dezechilibrat alimentat individual, printr-o linie electrică de parametrii R, X , de pe barele sursei (de exemplu o stație de transformare de IT/ MT). Dacă s-ar vorbi despre echilibrarea sarcinii pe barele de MT ale stației, primul element din amonte care ar interveni în calculele pentru reglajul tensiunii prin compensarea puterii reactive, ar fi bineînțeles transformatorul.

Revenind la exemplul considerat, compensarea trebuie să producă echilibrarea sarcinii, deci :

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(I_i^s) + \operatorname{Im}(I_i^\wedge) &= 0 \\ \operatorname{Re}(I_i^s) + \operatorname{Re}(I_i^\wedge) &= 0 \end{aligned} \quad (3.109)$$

și anularea componentei longitudinale a căderii de tensiune pe linie, datorate circulației unor curenți care sunt de fapt componentele de secvență directă ale curenților de sarcină (rămași după anularea componentei de secvență inversă) :

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{I}_f^c \cdot \underline{Z}_l \quad (3.110)$$

$$\underline{I}_f^c = \underline{I}_d^s + \underline{I}_d^\wedge \quad (3.111)$$

în care :

$\Delta \underline{U}_f$ - căderea de tensiune pe fază pe linia de alimentare ;

\underline{I}_f^c - curentul pe conductorul de fază, după compensare ;

$\underline{I}_d^s, \underline{I}_d^\Delta$ - componentele de secvență directă corespunzătoare curenților de sarcină respectiv curenților de compensare.

Scriind $\Delta \underline{U}_f$ sub forma :

$$\Delta \underline{U}_f = \left[\operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) + j \left(\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + \operatorname{Im}(\underline{I}_d^\Delta) \right) \right] \cdot (R + jX) \quad (3.112)$$

se poate detașa componenta sa longitudinală :

$$\operatorname{Re}(\Delta \underline{U}_f) = R \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - X \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - X \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^\Delta) \quad (3.113)$$

Anularea acesteia va constitui cea de-a treia condiție, care alăturată ecuațiilor (3.109), va permite găsirea soluției, în condițiile precizate :

$$\frac{R}{X} \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^\Delta) = 0 \quad (3.114)$$

3.5.2. Susceptanțele de compensare în funcție de susceptanțele sarcinii

Din ecuațiile (3.43) și (3.49) se scot :

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS}^s - \frac{1}{2} \cdot B_{RS}^s + B_{ST}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR}^s - \frac{1}{2} \cdot B_{TR}^s \right) \cdot U \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) &= \left(\frac{1}{2} \cdot G_{RS}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS}^s - G_{ST}^s + \frac{1}{2} \cdot G_{TR}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR}^s \right) \cdot U \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) &= - \left(B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s \right) \cdot U \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) &= \left(G_{RS}^s + G_{ST}^s + G_{TR}^s \right) \cdot U \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_d^\Delta) &= - \left(B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta + B_{TR}^\Delta \right) \cdot U \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_i^\Delta) &= \left(-\frac{1}{2} \cdot B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta - \frac{1}{2} \cdot B_{TR}^\Delta \right) \cdot U \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^\Delta) &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS}^\Delta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR}^\Delta \right) \cdot U \end{aligned} \quad (3.115)$$

Înlocuind ecuațiile (3.115) în sistemul format de ecuațiile (3.109) și (3.114), acesta devine:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot G_{RS}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS}^s - G_{ST}^s + \frac{1}{2} \cdot G_{TR}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS}^\Delta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR}^\Delta = 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS}^s - \frac{1}{2} \cdot B_{RS}^s + B_{ST}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR}^s - \frac{1}{2} \cdot B_{TR}^s - \frac{1}{2} \cdot B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta + \frac{1}{2} \cdot B_{TR}^\Delta = 0 \\ \frac{R}{X} \cdot (G_{RS}^s + G_{ST}^s + G_{TR}^s) + (B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s) + (B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta + B_{TR}^\Delta) = 0 \end{cases} \quad (3.116)$$

Primele două ecuații sunt de fapt identice cu primele două din sistemul (3.17), cea de-a treia corespunzând însă unei alte condiții (egalitatea tensiunilor la capetele liniei de alimentare a consumatorului).

Evidențiind necunoscutele, va rezulta forma :

$$(3.117) \quad \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{RS}^{\Delta} \\ B_{ST}^{\Delta} \\ B_{TR}^{\Delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

unde :

$$(3.118) \quad \begin{aligned} A &= \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{RS}^{\Delta} + B_{RS}^{\Delta} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{ST}^{\Delta} + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{TR}^{\Delta} - B_{TR}^{\Delta} \\ B &= \sqrt{3} \cdot G_{RS}^{\Delta} - B_{RS}^{\Delta} + 2 \cdot B_{ST}^{\Delta} - \sqrt{3} \cdot G_{TR}^{\Delta} - B_{TR}^{\Delta} \\ C &= \frac{X}{R} \cdot (G_{RS}^{\Delta} + G_{ST}^{\Delta} + G_{TR}^{\Delta}) + (B_{RS}^{\Delta} + B_{ST}^{\Delta} + B_{TR}^{\Delta}) \end{aligned}$$

Soluțiile sistemului (3.117), cu 3 ecuații și 3 necunoscute, sunt :

$$(3.119) \quad \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= -\frac{2}{1} \cdot A + \frac{6}{1} \cdot B - \frac{3}{1} \cdot C \\ B_{ST}^{\Delta} &= -\frac{3}{1} \cdot B - \frac{3}{1} \cdot C \\ B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{1} \cdot A + \frac{6}{1} \cdot B - \frac{3}{1} \cdot C \end{aligned}$$

Adică:

$$(3.120) \quad \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= -B_{RS}^{\Delta} - G_{RS}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) - G_{ST}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) - G_{TR}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) + \frac{\sqrt{3}}{1} \\ B_{ST}^{\Delta} &= -B_{ST}^{\Delta} - G_{RS}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) + \frac{\sqrt{3}}{1} - G_{ST}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) - G_{TR}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) + \frac{\sqrt{3}}{1} \\ B_{TR}^{\Delta} &= -B_{TR}^{\Delta} - G_{RS}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) - G_{ST}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) + \frac{\sqrt{3}}{1} - G_{TR}^{\Delta} \cdot \left(\frac{3 \cdot X}{R}\right) + \frac{\sqrt{3}}{1} \end{aligned}$$

pe care, dacă le scriem sub forma :

$$(3.121) \quad \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= -B_{RS}^{\Delta} + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{ST}^{\Delta} - \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{TR}^{\Delta} - \frac{3 \cdot X}{R} \cdot (G_{RS}^{\Delta} + G_{ST}^{\Delta} + G_{TR}^{\Delta}) \\ B_{ST}^{\Delta} &= -B_{ST}^{\Delta} + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{RS}^{\Delta} + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{TR}^{\Delta} - \frac{3 \cdot X}{R} \cdot (G_{RS}^{\Delta} + G_{ST}^{\Delta} + G_{TR}^{\Delta}) \\ B_{TR}^{\Delta} &= B_{TR}^{\Delta} + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{RS}^{\Delta} - \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{ST}^{\Delta} - \frac{3 \cdot X}{R} \cdot (G_{RS}^{\Delta} + G_{ST}^{\Delta} + G_{TR}^{\Delta}) \end{aligned}$$

observăm că :

$$(3.122) \quad \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= B_{RS}^{\Delta} + B_{STPL} \\ B_{ST}^{\Delta} &= B_{ST}^{\Delta} + B_{STPL} \\ B_{TR}^{\Delta} &= B_{TR}^{\Delta} + B_{STPL} \end{aligned}$$

în care B_{RS}^{Δ} , B_{ST}^{Δ} , B_{TR}^{Δ} sunt susceptanțele obținute prin aplicarea criteriului a (echilibrare și $\cos\phi = 1$) iar $B_{STPL} = -(R/3 \cdot X) \cdot (G_{RS}^{\Delta} + G_{ST}^{\Delta} + G_{TR}^{\Delta})$ are caracter capacitiv ($B_{STPL} > 0$) și trebuie instalată suplimentar, așa cum era de așteptat, simetric (pe fiecare latură a Δ de compensare).

La nivelul sarcinii se va obține deci o supracompensare capacitivă, a cărei valoare depinde de sarcina activă și de parametrii liniei de alimentare.

3.5.3. Susceptanțele de compensare în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină.

În sistemul format de ecuațiile (3.109) și (3.114) explicitând numai I_i^A și I_d^A în funcție de susceptanțele de compensare (necunoscutele) se obține sistemul următor :

$$\begin{cases} -B_{RS}^{\lambda} + B_{TR}^{\lambda} = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \operatorname{Re}(I_i^s) \\ B_{RS}^{\lambda} - 2 \cdot B_{ST}^{\lambda} + B_{TR}^{\lambda} = \frac{2}{U} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) \\ -B_{RS}^{\lambda} - B_{ST}^{\lambda} - B_{TR}^{\lambda} = \frac{1}{U} \cdot \frac{R}{X} \operatorname{Re}(I_d^s) - \frac{1}{U} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) \end{cases} \quad (3.123)$$

Soluțiile acestuia sunt :

$$\begin{cases} B_{RS(c)}^{\lambda} = -\frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) - \frac{1}{U} \cdot \frac{R}{3 \cdot X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \\ B_{ST(c)}^{\lambda} = -\frac{2}{3 \cdot U} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) - \frac{1}{U} \cdot \frac{R}{3 \cdot X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \\ B_{TR(c)}^{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{1}{3 \cdot U} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) - \frac{1}{U} \cdot \frac{R}{3 \cdot X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \end{cases} \quad (3.124)$$

Se obține deci o formă similară cu ecuațiile (3.122), de data aceasta susceptanța suplimentară fiind exprimată sub forma :

$$B_{SUP}^{\lambda} = -\frac{1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \frac{R}{\sqrt{3} \cdot X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \quad (3.125)$$

3.5.4. Curenții de compensare în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină

Aplicând relațiile de forma (3.53) între curenții de compensare și susceptanțele de compensare, relațiile (3.124) se vor putea scrie :

$$\begin{cases} I_{RS(c)}^{\lambda} = -\operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \\ I_{ST(c)}^{\lambda} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \\ I_{TR(c)}^{\lambda} = \operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{Im}(I_d^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \cdot \operatorname{Re}(I_d^s) \end{cases} \quad (3.126)$$

Adică :

$$I_{RS}^{\Delta*} = I_{RS}^{\Delta} + I_{SUPL}$$

$$I_{ST}^{\Delta*} = I_{ST}^{\Delta} + I_{SUPL} \quad (3.127) \quad \text{unde :} \quad I_{SUPL} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \cdot \text{Re}(I_d^s) \quad (3.128)$$

$$I_{TR}^{\Delta*} = I_{TR}^{\Delta} + I_{SUPL} \quad \text{are caracter pur capacitiv.}$$

3.5.5. Curenții de compensare în funcție de componentele active și reactive ale curenților de sarcină

Dacă în expresiile (3.126) curenții de secvență se scriu cu ajutorul curenților de fază, se obțin relațiile între curenții de compensare și componentele active și reactive ale curenților de sarcină :

$$I_{RS}^{\Delta} = -\frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \right) I_{Ra} - \frac{1}{3} \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \right) I_{Sa} - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} I_{Ta} - \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{Rr} - \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{Sr} + \frac{1}{3\sqrt{3}} I_{Tr}$$

$$I_{ST}^{\Delta} = -\frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} I_{Ra} - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \right) I_{Sa} - \frac{1}{3} \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \right) I_{Ta} + \frac{1}{3\sqrt{3}} I_{Rr} - \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{Sr} - \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{Tr}$$

$$I_{TR}^{\Delta} = -\frac{1}{3} \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \right) I_{Ra} - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} I_{Sa} - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \right) I_{Ta} - \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{Rr} + \frac{1}{3\sqrt{3}} I_{Sr} - \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{Tr}$$

Se observă de asemenea verificarea relației (3.128), I_{SUPL} exprimându-se aici prin :

$$I_{SUPL} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{X} \cdot \frac{1}{3} \cdot (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta})$$

3.6. Criteriul d. Minimizarea puterii reactive instalate în compensator

Accastă condiție suplimentară face ca, din infinitatea de soluții pentru susceptanțele din alcătuirea compensatorului de echilibrare, să se aleagă acea soluție care să conducă la o putere reactivă instalată totală minimă și deci la o minimizare a costurilor :

$$Q_{inst}^2 = MIN \quad (3.129)$$

sau :

$$Q_{inst}^2 = (\sqrt{3} \cdot U)^4 \cdot (B_{RS}^{\Delta 2} + B_{ST}^{\Delta 2} + B_{TR}^{\Delta 2}) = MIN \quad (3.130)$$

$$\text{deci} \quad B_{RS}^{\Delta 2} + B_{ST}^{\Delta 2} + B_{TR}^{\Delta 2} = MIN \quad (3.131)$$

Alăturând restricția (3.131) sistemului de ecuații (3.10), pentru rezolvare se va proceda după cum urmează :

Se stabilesc B_{RS}^{Δ} și B_{TR}^{Δ} ca necunoscute principale ale sistemului (3.10) și se exprimă în funcție de necunoscuta secundară B_{ST}^{Δ} .

$$\begin{cases} B_{RS}^{\Delta} - B_{TR}^{\Delta} = A \\ B_{RS}^{\Delta} + B_{TR}^{\Delta} = B + 2 \cdot B_{ST}^{\Delta} \end{cases} \quad (3.132)$$

Rezultă :

$$(3.133) \quad \left\{ \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= \frac{1}{2} \cdot (A + B + 2 \cdot B_{ST}^{\Delta}) \\ B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{2} \cdot (-A + B + 2 \cdot B_{ST}^{\Delta}) \end{aligned} \right.$$

Înlocuind acum relațiile (3.133) în (3.131) se obține o funcție de variabilă B_{ST}^{Δ} , pentru care trebuie determinat minimumul :

$$(3.134) \quad 3 \cdot B_{ST}^{\Delta 2} + 2 \cdot B \cdot B_{ST}^{\Delta} + \frac{2}{1} \cdot (A^2 + B^2) = MIN$$

Facând derivata și egalând cu zero :

$$(3.135) \quad \frac{d(Q_{min}^2)}{dB_{ST}^{\Delta}} = 0 \quad \text{se obține :} \quad B_{ST}^{\Delta} = \frac{3}{1} \cdot B \quad (3.136)$$

și apoi înlocuind în (3.133) :

$$(3.137) \quad \left\{ \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= \frac{1}{2} \cdot (A + \frac{3}{1} \cdot B) \\ B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{2} \cdot (-A + \frac{3}{1} \cdot B) \end{aligned} \right.$$

Scind acum constantele A și B în forma explicită ce cuprinde conductanțele și susceptanțele echivalente ale sarcinii, rezultă :

$$(3.138) \quad \left\{ \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= \frac{3}{2} \cdot B_{RS}^s + \frac{1}{1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{RS}^s - \frac{3}{1} \cdot B_{ST}^s - \frac{3}{1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{TR}^s - \frac{3}{1} \cdot B_{TR}^s \\ B_{ST}^{\Delta} &= -\frac{1}{1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{RS}^s - \frac{3}{1} \cdot B_{RS}^s + \frac{3}{2} \cdot B_{ST}^s + \frac{1}{1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{TR}^s - \frac{3}{1} \cdot B_{TR}^s \\ B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{RS}^s - \frac{3}{1} \cdot B_{RS}^s - \frac{3}{1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot G_{ST}^s - \frac{3}{1} \cdot B_{ST}^s + \frac{3}{2} \cdot B_{TR}^s \end{aligned} \right.$$

sau :

$$(3.139) \quad \left\{ \begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= \frac{1}{1} \cdot \frac{3}{1} \cdot (2 \cdot B_{RS}^s - B_{ST}^s - B_{TR}^s) + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot (G_{RS}^s - G_{TR}^s) \\ B_{ST}^{\Delta} &= \frac{1}{1} \cdot \frac{3}{1} \cdot (-B_{RS}^s + 2 \cdot B_{ST}^s - B_{TR}^s) + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot (-G_{RS}^s + G_{TR}^s) \\ B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{1} \cdot \frac{3}{1} \cdot (-B_{RS}^s - B_{ST}^s + 2 \cdot B_{TR}^s) + \frac{\sqrt{3}}{1} \cdot (G_{RS}^s - G_{ST}^s) \end{aligned} \right.$$

Se observă că :

$$(3.140) \quad B_{RS}^{\Delta} + B_{ST}^{\Delta} + B_{TR}^{\Delta} = 0$$

ceea ce conduce la concluzia că este necesară montarea alai de bobine cât și de condensatoare pentru echilibrarea sarcinii, indiferent de gradul de nesimetrie sau de caracterul nesimetric.

De remarcat de asemenea că relațiile (3.139) prin care se exprimă susceptanțele de compensare în funcție de susceptanțele de sarcină în condițiile minimizării puterii reactive

instalate în compensator, sunt identice cu cele pentru compensatorul folosit la anularea componentei de secvență inversă a curentului de sarcină (relațiile 3.50).

Cu alte cuvinte, **minimizarea puterii reactive instalate se obține în condițiile realizării numai a simetrizării** (fără a îmbunătăți factorul de putere pe secvența directă). Compensatorul dimensionat prin aplicarea acestui criteriu este de fapt compensatorul Δ descris la criteriul a. Prin urmare, toate relațiile pentru calculul elementelor schemei de compensare și pentru calculul circulației de curenți și puteri rămân valabile.

3.7. Criteriul c. Minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare

Relația pentru calculul pierderilor totale de putere activă (longitudinale) pe o linie electrică ce alimentează ansamblul consumator-compensator, este :

$$\Delta P = (I_R^c{}^2 + I_S^c{}^2 + I_T^c{}^2) \cdot r \quad (3.141)$$

r - fiind rezistența electrică a conductorului de fază al liniei.

Urmează să înlocuim pe fiecare fază curentul prin cele două componente :

$$\begin{cases} I_R^c = I_R^s + I_R^\lambda \\ I_S^c = I_S^s + I_S^\lambda \\ I_T^c = I_T^s + I_T^\lambda \end{cases} \quad (3.142)$$

Utilizând relațiile (A6.4) și (A6.23) se obține legătura între curenții vehiculați pe linia electrică și curenții de sarcină respectiv de compensare :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^c &= \left(I_{Ra} + \frac{1}{2} \cdot I_{RS}^\lambda - \frac{1}{2} \cdot I_{TR}^\lambda \right) + j \left(I_{Rr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{RS}^\lambda - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{TR}^\lambda \right) \\ \underline{I}_S^c &= \left(-\frac{1}{2} \cdot I_{Sa} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{Sr} - \frac{1}{2} \cdot I_{RS}^\lambda - I_{ST}^\lambda \right) + j \left(\frac{1}{2} \cdot I_{Sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{Sa} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{RS}^\lambda \right) \\ \underline{I}_T^c &= \left(-\frac{1}{2} \cdot I_{Ta} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{Tr} + \frac{1}{2} \cdot I_{TR}^\lambda + I_{ST}^\lambda \right) + j \left(\frac{1}{2} \cdot I_{Tr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{Ta} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{TR}^\lambda \right) \end{aligned} \quad (3.143)$$

Ridicând la pătrat valorile efective ale acestor curenți și apoi însumându-le, se obține :

$$\begin{aligned} \sum I^2 &= I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 = I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 + I_{Rr}^2 + I_{Sr}^2 + I_{Tr}^2 + 2 \cdot (I_{RS}^{\lambda 2} + I_{ST}^{\lambda 2} + I_{TR}^{\lambda 2}) + \\ &+ I_{RS}^\lambda \cdot (I_{Ra} - \sqrt{3} \cdot I_{Rr} - I_{Sa} - \sqrt{3} \cdot I_{Sr}) - I_{ST}^\lambda \cdot (I_{Sa} + \sqrt{3} \cdot I_{Sr} - I_{Ta} + \sqrt{3} \cdot I_{Tr}) + (3.144) \\ &+ I_{TR}^\lambda \cdot (-I_{Ra} - \sqrt{3} \cdot I_{Rr} - I_{Ta} - \sqrt{3} \cdot I_{Tr}) - I_{RS}^\lambda \cdot I_{ST}^\lambda - I_{ST}^\lambda \cdot I_{TR}^\lambda + I_{TR}^\lambda \cdot I_{RS}^\lambda \end{aligned}$$

Cele trei necunoscute (curenții de compensare) se pot obține prin anularea derivatelor parțiale ale funcției de mai sus.

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sum I^2)}{\partial I_{RS}^\Delta} = 0 \\ \frac{\partial(\sum I^2)}{\partial I_{ST}^\Delta} = 0 \\ \frac{\partial(\sum I^2)}{\partial I_{TR}^\Delta} = 0 \end{cases} \quad (3.145) \quad \text{adică:} \quad \begin{cases} 4 \cdot I_{RS}^\Delta + I_{ST}^\Delta + I_{TR}^\Delta = -I_{Ra} - \sqrt{3} \cdot I_{Rr} + I_{Sa} - \sqrt{3} \cdot I_{Sr} \\ I_{RS}^\Delta + 4 \cdot I_{ST}^\Delta + I_{TR}^\Delta = -I_{Sa} - \sqrt{3} \cdot I_{Sr} + I_{Ta} - \sqrt{3} \cdot I_{Tr} \\ I_{RS}^\Delta + I_{ST}^\Delta + 4 \cdot I_{TR}^\Delta = -I_{Ta} - \sqrt{3} \cdot I_{Tr} + I_{Ra} - \sqrt{3} \cdot I_{Rr} \end{cases} \quad (3.146)$$

Din însumarea celor trei relații ale sistemului (3.146) rezultă următoarea condiție :

$$I_{RS}^\Delta + I_{ST}^\Delta + I_{TR}^\Delta = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \quad (3.147)$$

sau, exprimată prin susceptanțe :

$$B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta + B_{TR}^\Delta = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (B_R + B_S + B_T) \quad (3.148)$$

Dar, prin transformarea Y-Δ, susceptanțele echivalente ale sarcinii devin (A4.11) :

$$\frac{1}{3} \cdot (B_R + B_S + B_T) = B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s \quad (3.149)$$

Ceea ce înseamnă că :

$$B_{RS}^\Delta + B_{ST}^\Delta + B_{TR}^\Delta = -(B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s) \quad (3.150)$$

adică chiar condiția reieșită prin punerea condiției de simetrizare și compensare totală a puterii reactive absorbite de sarcină (criteriul a).

Deci *minimizarea pierderilor în rețeaua de alimentare se obține în cazul simetrizării sarcinii și compensării totale a puterii reactive absorbite de sarcină* (Relațiile obținute sunt identice, ceea ce era de așteptat de altfel).

Criteriul e se reduce la criteriul a.

3.8. Aplicație numerică

Pentru a observa implicațiile cantitative ale modelului matematic dezvoltat în acest capitol și a comenta diversele variante și corelații, s-a întocmit un program în BP. Aplicațiile se referă la calculul circulației de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator și determină, pentru diverse combinații de curenți pe fazele sarcinii, următoarele mărimi :

I* valorile efective pentru:

- curenții pe laturile compensatorului Δ : $I_{RS}^\Delta, I_{ST}^\Delta, I_{TR}^\Delta$;
- componentele active ale curenților pe fazele compensatorului: $I_{Ra}^\Delta, I_{Sa}^\Delta, I_{Ta}^\Delta$;
- componentele reactive ale curenților pe fazele compensatorului: $I_{Rr}^\Delta, I_{Sr}^\Delta, I_{Tr}^\Delta$;
- curenții pe fazele compensatorului: $I_R^\Delta, I_S^\Delta, I_T^\Delta$;
- curenții pe fazele ansamblului consumator-compensator: I_R, I_S, I_T ;

- curenții de secvență directă și inversă corespunzători curenților pe fazele ansamblului: I_d, I_i ;
- 2° valorile procentuale ale coeficientului de disimetrie pentru ansamblul consumator-compensator: $k_{mi} = \frac{I_i}{I_d} \cdot 100\%$;
- 3° valorile factorului de putere pe secvența directă: $\cos\varphi_d$;
- 4° valorile factorului de putere de nesimetrie, care în cazul rețelelor cu trei conductoare are expresia:

$$k_{pn} = \frac{1}{\sqrt{1 + k_{mi}^2}}$$

- 5° valorile factorului de putere pentru regimul dezechilibrat: $k_p = k_{pn} \cdot \cos\varphi_d$

S-au pus alături, pentru o analiză comparativă, rezultatele aplicării a trei criterii de compensare (regimuri) dezvoltate în acest capitol și a unuia suplimentar:

- a** echilibrarea sarcinii și compensarea totală ($\cos\varphi=1$) a puterii reactive;
- b** echilibrarea sarcinii și compensarea până la un factor de putere impus ($\cos\varphi_i$) a puterii reactive absorbite din rețea;
- d** echilibrarea sarcinii din condiția minimizării puterii reactive instalate în compensator;
- s** compensarea clasică a puterii reactive folosind un compensator simetric.

Am considerat util ca în cadrul acestei aplicații să se includă, susplimentar față de criteriile deja prezentate, cel conform căruia, se compensează integral puterea reactivă pe secvența directă, fără a se urmări și simetrizarea sarcinii (criteriul s), cu ajutorul unui compensator Δ simetric (ce va conține în general numai capacități).

Relațiile pentru calculul curenților pe laturile și fazele compensatorului dimensionat conform acestui criteriu se stabilesc cu ajutorul celor deduse în cadrul acestui capitol. Astfel, pentru a compensa integral puterea reactivă pe secvența directă, este necesar ca pe fiecare fază a compensatorului să se formeze un curent reactiv, egal și de sens contrar componentei reactive a curentului de secvență directă. Adică:

$$\underline{I}_R^{\Delta*} = -j I_m(\underline{I}_d^s) = j \frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = \underline{I}_S^{\Delta*} = \underline{I}_T^{\Delta*} \quad (3.151)$$

Dar

$$\underline{I}_R^{\Delta*} = -j \sqrt{3} I_{RS}^{\Delta} \quad (3.152)$$

Pentru curenții care se formează pe laturile compensatorului, rezultă astfel expresia:

$$I_{RS}^{\Delta} = I_{ST}^{\Delta} = I_{TR}^{\Delta} = -\frac{1}{3\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \quad (3.153)$$

ceea ce ar presupune instalarea unor susceptanțe a căror valoare se determină cu expresia:

$$B_{RS}^{\Delta} = B_{ST}^{\Delta} = B_{TR}^{\Delta} = -\frac{1}{9}(B_R^s + B_S^s + B_T^s) = -\frac{1}{3}(B_{RS}^s + B_{ST}^s + B_{TR}^s) \quad (3.154)$$

sau:

$$B_{RS}^{\Delta} = B_{ST}^{\Delta} = B_{TR}^{\Delta} = -\frac{1}{9U}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = -\frac{1}{3U} I_m(\underline{I}_d^s) \quad (3.155)$$

În cadrul criteriului **b** s-au considerat mai multe valori pentru factorul de putere impus (între 0,9÷0,98). Criteriul **a** este de fapt un caz particular al criteriului **b**. ($\cos\varphi_i=1$).

Datele de intrare ale problemei sunt curenții pe fazele sarcinii. Se pleacă de fapt de la valorile componentelor active ale acestora și factorul de putere corespunzător fiecărei faze.

S-au studiat mai multe variante ale unei sarcini trifazate conectate la tensiunea nominală de 380 V. Poate fi cazul unui grup de consumatori simetrici și nesimetrici conectați într-o astfel de rețea fără conductor neutru (motoare trifazate, transformatoare de sudură conectate între două faze, etc.). De altfel în aplicația considerată tensiunea este mai puțin importantă, ea intervenind doar la determinarea puterii reactive necesare a se instala în compensator.

Calcululele au fost făcute cu relațiile deduse în modelul matematic, folosind deci aceleași ipoteze:

- sistemul tensiunilor de linie se consideră perfect echilibrat;
- sarcina este liniară și constantă;
- se consideră regimul normal de funcționare.

Rezultatele detaliate ale calcululelor se prezintă în ANEXA 8.

Iată aici câteva concluzii ale analizei comparative a lor:

1° Pentru criteriile **a** și **b**, în marea majoritate a cazurilor analizate, puterea reactivă necesară la compensator este de tip capacitiv.

În instalațiile reale unde se justifică acest tip de compensare (dezechilibre mari și factor de putere redus), caracterul capacitiv al compensatorului este evident. Cu creșterea factorului de putere, scade puterea reactivă capacitivă necesară și crește cea inductivă.

Așa cum se poate observa din fișierele de rezultate 3e15.tde, 3e14.tde și 3e01.tde, pentru factor de putere unitar pe cele trei faze, compensatorul, căruia îi revine numai sarcina echilibrării puterii active, conține cu preponderență putere reactivă inductivă.

2° Pentru criteriul **d**, $\sum Q_c = \sum Q_i$, pentru că aceasta este de fapt condiția de dimensionare. Compensatorul anulează numai componenta de secvență inversă a sarcinii. Diferențele între curenții de pe laturile Δ în situația **d** respectiv **b** sau **a**, reprezintă tocmai curenții necesari compensării reactivului pe secvența directă, în aceste cazuri de pe urmă. Pe fiecare fază diferența este bineînțeles aceeași.

3° În urma compensării prin aplicarea criteriului **d**, curenții pe fazele rețelei sunt egali între ei și egali cu componenta de secvență directă a sarcinii.

4° În cazul criteriului **s** compensatorul este simetric și conține numai susceptanțe capacitive. El anulează numai componenta reactivă a curentului de secvență directă a sarcinii. Deși în felul acesta se majorează coeficientul de disimetrie, factorul de putere al regimului dezechilibrat este în mod considerabil ridicat.

5° Rezultatul compensării conform criteriului **a** este obținerea pe fazele rețelei a trei curenți perfect simetrici, egali cu componenta activă a curentului de secvență directă (media aritmetică a componentelor active ale celor trei curenți de fază). Evident în această situație, reactivul necesar pentru compensare are valoarea maximă (capacitivă).

6° Se poate ușor observa că în cazul **d**, compensatorul nu intervine asupra circulației curenților pe ansamblul celor trei faze. Sumele algebrice ale curenților activi respectiv reactivi pe fazele sale sunt nule. Pe fiecare fază compensatorul absoarbe sau debitează o putere activă egală chiar cu diferența dintre curentul activ al sarcinii pe faza respectivă și media aritmetică a celor trei curenți activi ai sarcinii (în fapt componenta activă a curentului de secvență directă), realizând astfel egalizarea sarcinii active pe fazele rețelei.

Pe fiecare fază compensatorul absoarbe sau debitează o putere reactivă egală chiar cu diferența între curentul reactiv al sarcinii pe faza respectivă și media aritmetică a celor trei curenți reactivi ai sarcinii (adică chiar componenta reactivă a curentului de secvență directă), realizând astfel egalizarea sarcinii reactive pe fazele rețelei.

7° Această observație este valabilă și în cazurile **a** și **b** dar numai pentru curenții activi ai compensatorului.

8° Curenții reactivi de pe fazele compensatorului în regimurile **d** și **s** constituie componentele de secvență inversă respectiv directă corespunzătoare cazului **a**. Rezultă că suma algebrică a puterilor instalate pentru regimurile **s** și **d** este egală cu cea pentru regimul **a**.

Se poate imediat observa că curenții reactivi pe fazele compensatorului dimensionat conform criteriului **a**, sunt egali și de semn contrar celor de pe fazele sarcinii, realizând astfel compensarea totală a acestora.

9° Dacă factorul de putere pe fiecare fază a sarcinii este unitar, cazul **a** se reduce la cazul **d**, compensatorului nerămânându-i de făcut decât să anuleze componenta de secvență inversă, altfel spus să echilibreze sarcina activă a rețelei. *Compensatorul va debita respectiv va absorbi pe faze numai putere activă, deși conține numai susceptanțe.*

10° Prin aplicarea criteriului **b**, factorul de putere al ansamblului consumator-compensator are valoarea egală cu a celui impus.

Capitolul 4

ELEMENTE DE CALCUL PENTRU ECHILIBRAREA REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE CU PATRU CONDUCTOARE PRIN COMPENSAREA TRANSVERSALĂ A SARCINILOR DEZECHILIBRATE

4.1. Considerații generale

În acest capitol se continuă subiectul tratat în capitolul precedent. De data aceasta este abordată problema echilibrării rețelelor electrice de distribuție trifazate cu patru conductoare, folosind însă aceeași metodă : amplasarea în acea secțiune a rețelei în care se dorește echilibrarea sarcinii, a unui compensator transversal de putere reactivă.

Contextul problemei, modurile de abordare și de rezolvare au fost pe larg descrise în capitolul anterior. De aceea aici nu ne rămâne de făcut decât de a intra direct în miezul problemei : determinarea elementelor componente ale compensatorului și a circulației de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator. Aceste elemente sunt necesare atât la dimensionarea instalației de compensare, cât și la controlul procesului, atunci când compensarea constituie obiectul unui reglaj on-line.

Se consideră deci un consumator dezechilibrat, care poate fi un receptor individual sau un consumator echivalent redus la secțiunea de interes a rețelei (de exemplu barele de joasă tensiune ale unui post de transformare), alimentat dintr-o rețea trifazată cu patru conductoare. Conductorul neutru indică prezența receptorilor monofazați, surse tipice de dezechilibru în curent. Schema echivalentă a unui astfel de consumator va fi întotdeauna cea în conexiune Y_0 .

Echilibrarea artificială a sarcinii pe fazele rețelei ce alimentează un astfel de consumator se poate face, ca și în rețelele cu trei conductoare, cu ajutorul unor surse statice de putere reactivă, ce realizează o compensare transversală. De data aceasta însă se vor folosi simultan două astfel de compensatoare trifazate, a căror necesitate va fi justificată pe parcursul expunerii modelului matematic : unul cu conexiune Δ și celălalt cu conexiune Y_0 [40].

În figura 4.1. se prezintă schema electrică simplificată pentru echilibrarea unui consumator dezechilibrat, folosind cele două compensatoare amintite, în care s-au specificat o parte dintre notațiile folosite în modelul matematic.

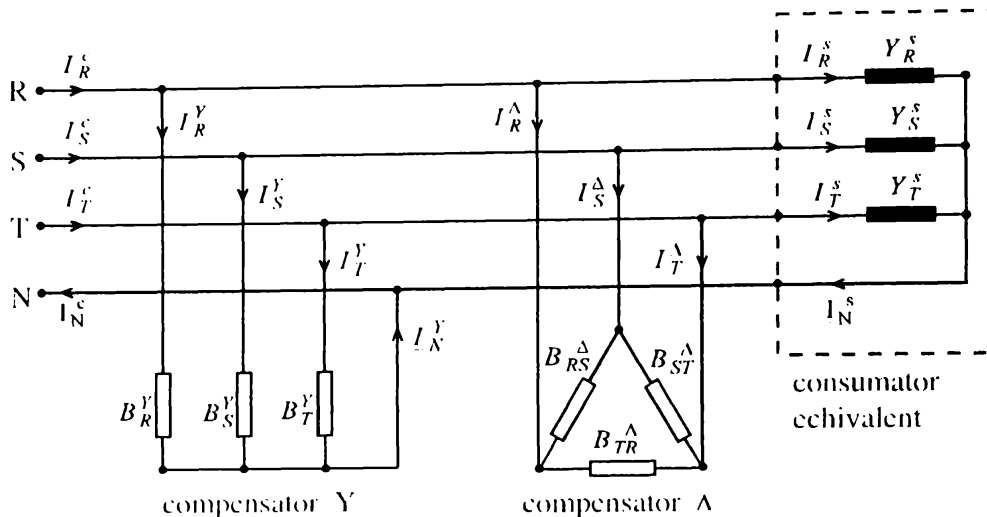


Fig. 4.1. Compensatoare statice de putere reactivă instalate la bornele unui consumator dezechilibrat - schema electrică echivalentă.

S-au notat:

$\underline{I}_R^s, \underline{I}_S^s, \underline{I}_T^s, \underline{I}_N^s$ - curenții pe conductoarele de fază și neutru ale sarcinii ;

$\underline{I}_R^c, \underline{I}_S^c, \underline{I}_T^c, \underline{I}_N^c$ - curenții pe conductoarele de fază și neutru ale ansamblului consumator- compensator (rezultați în urma compensării);

$\underline{I}_R^y, \underline{I}_S^y, \underline{I}_T^y, \underline{I}_N^y$ - curenții pe conductoarele de fază și neutru ale compensatorului Y

$\underline{I}_R^\Delta, \underline{I}_S^\Delta, \underline{I}_T^\Delta$ - curenții pe conductoarele de fază ale compensatorului Δ ;

$\underline{Y}_R^s, \underline{Y}_S^s, \underline{Y}_T^s$ - admitanțele echivalente ale sarcinii ;

B_R^y, B_S^y, B_T^y - susceptanțele echivalente ale compensatorului Y ;

$B_{RS}^\Delta, B_{ST}^\Delta, B_{TR}^\Delta$ - susceptanțele echivalente ale compensatorului Δ ;

Modelul matematic a folosit următoarele ipoteze :

- s-a considerat numai regimul permanent normal de funcționare ;
- sistemul trifazat al tensiunilor de linie și de fază din secțiunea de interes sunt perfect simetrice și echilibrate ;
- nu se ia în considerare regimul deformant : undele tensiunilor de alimentare sunt perfect sinusoidale, iar elementele de rețea și sarcina se consideră liniare ;

Stabilirea valorilor susceptanțelor celor două compensatoare se va face pe baza unor criterii ce vor viza atât regimul nesimetric cât și îmbunătățirea factorului de putere, acțiuni interdependente în rețelele electrice de distribuție dezechilibrate. De altfel, o abordare simultană a celor două probleme trebuie făcută în mod obligatoriu deoarece ele se intercondiționează în permanență, chiar și atunci când nu se întreprinde nici o acțiune pentru diminuarea uneia sau alteia dintre acestea.

Compensarea transversală a puterii reactive, va folosi un singur compensator sau ambele după cum scopul urmărit este numai simetrizarea sarcinii, numai îmbunătățirea factorului de putere sau o acțiune simultană. Dar modificarea circulației de putere reactivă produsă prin intervenția compensatoarelor obligă la verificarea nivelului tensiunilor în nodurile rețelei, ceea ce constituie element de restricție. De asemenea nu trebuie uitată

eficiența economică a compensării, pentru maximizarea căreia se va urmări minimizarea cheltuielilor de investiții pentru instalațiile de compensare respectiv maximizarea beneficiului obținut prin reducerea pierderilor de energie. Acestea au fost elementele care au determinat criteriile folosite pentru compensare, pe baza cărora s-au stabilit de altfel elementele celor două compensatoare. În capitolul de față ele au fost :

- * a - îmbunătățirea factorului de putere fără a lua în considerare regimul dezechilibrat;
- * b - echilibrarea sarcinii fără a lua în considerare îmbunătățirea factorului de putere ;
- * c - îmbunătățirea factorului de putere și micșorarea nesimetriei ;
- * d - minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare ;

Calculul se va efectua folosind metoda componentelor simetrice și va demara exprimând pentru fiecare element implicat, componentele simetrice corespunzătoare curenților pe fazele acestuia, în funcție de componentele de fază deduse cu ajutorul relațiilor din ANEXA 4. Și anume :

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_d^S &= \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) - j\frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
 \underline{I}_i^S &= \frac{1}{3}\left[I_{Ra} - \frac{1}{2}(I_{Sa} + I_{Ta}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Sr} - I_{Tr})\right] + j\frac{1}{3}\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Sa} - I_{Ta}) - I_{Rr} + \frac{1}{2}(I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\
 \underline{I}_h^S &= \frac{1}{3}\left[I_{Ra} - \frac{1}{2}(I_{Sa} + I_{Ta}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Sr} - I_{Tr})\right] + j\frac{1}{3}\left[-\frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Sa} - I_{Ta}) - I_{Rr} + \frac{1}{2}(I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\
 \underline{I}_d^Y &= -j\frac{1}{3}(I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y) \\
 \underline{I}_i^Y &= \frac{1}{6}\left[\sqrt{3}(I_S^Y - I_T^Y) + j(-2 \cdot I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y)\right] \\
 \underline{I}_h^Y &= \frac{1}{6}\left[\sqrt{3}(I_T^Y - I_S^Y) + j(-2 \cdot I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y)\right] \tag{4.1} \\
 \underline{I}_d^A &= -j\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A) \\
 \underline{I}_i^A &= \frac{1}{2}(I_{RS}^A - I_{TR}^A) + j\frac{1}{2\sqrt{3}}(2I_{ST}^A - I_{RS}^A - I_{TR}^A) \\
 \underline{I}_h^A &= 0
 \end{aligned}$$

în care :

$I_{Ra}, I_{Sa}, I_{Ta}, I_{Rr}, I_{Sr}, I_{Tr}$ - sunt componentele active respectiv reactive ale curenților de pe fazele sarcinii;

$I_R^Y, I_S^Y, I_T^Y, I_{RS}^A, I_{ST}^A, I_{TR}^A$ - componentele reactive ale curenților de pe laturile celor două compensatoare;

$\underline{I}_d^S, \underline{I}_i^S, \underline{I}_h^S, \underline{I}_d^Y, \underline{I}_i^Y, \underline{I}_h^Y, \underline{I}_d^A, \underline{I}_i^A, \underline{I}_h^A$ - curenții de secvență directă respectiv inversă și homopolară corespunzători sistemelor trifazate ale curenților de pe fazele sarcinii și compensatoarelor;

4.2. Criteriul a. Îmbunătățirea factorului de putere fără a lua în considerare regimul dezechilibrat.

Pentru aceasta este suficientă una dintre cele două instalații de compensare, de exemplu compensatorul Y. Curenții absorbiți de la rețea pe cele trei faze sunt :

$$\underline{I}_R^c = \underline{I}_R^s + \underline{I}_R^Y \quad \underline{I}_S^c = \underline{I}_S^s + \underline{I}_S^Y \quad \underline{I}_T^c = \underline{I}_T^s + \underline{I}_T^Y \quad (4.2)$$

și exprimați cu ajutorul componentelor de secvență :

$$\underline{I}_d^c = \underline{I}_d^s + \underline{I}_d^Y \quad \underline{I}_i^c = \underline{I}_i^s + \underline{I}_i^Y \quad \underline{I}_h^c = \underline{I}_h^s + \underline{I}_h^Y \quad (4.3)$$

Pentru determinarea valorilor celor trei curenți de compensare, $\underline{I}_R^Y, \underline{I}_S^Y, \underline{I}_T^Y$, sunt necesare niște condiții suplimentare asupra modului în care să se facă compensarea. Acestea vor constitui de fapt criterii de compensare. Astfel :

4.2.1. Criteriul a1 - Îmbunătățirea factorului de putere în rețeaua de alimentare prin compensarea până la anulare a componentei reactive a curentului de secvență directă, folosind o compensare simetrică

$$\begin{cases} \operatorname{Im}(\underline{I}_d^c) = 0 \\ I_R^Y = I_S^Y = I_T^Y = I^Y \end{cases} \quad (4.4)$$

Rezultă condiția :

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\underline{I}_d^c) &= -\frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) - \frac{1}{3}(I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y) = 0 \\ \Rightarrow I^Y &= \frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = \frac{1}{3} \sum_{f=R,S,T} I_{fr} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Se observă că curentul de compensare, același pe fiecare fază, va fi media aritmetică a celor trei curenți reactivi ai sarcinii. În aceste condiții nu se intervine asupra componentelor de secvență inversă și homopolară ale curenților de sarcină astfel că, prin micșorarea componentei de secvență directă, dezechilibrul curenților se accentuează.

4.2.2. Criteriul a2 - Minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare

Pierderile totale de putere activă (longitudinale) pe o presupusă linie electrică ce alimentează consumatorul, după compensare, sunt :

$$\Delta P = (I_R^{c2} + I_S^{c2} + I_T^{c2} + I_N^{c2}) \cdot r \quad (4.6)$$

sau folosind componentele de secvență:

$$\Delta P = [3(I_d^{c2} + I_i^{c2} + I_h^{c2}) + 9I_h^{c2}] \cdot r \quad (4.7)$$

în care:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^c &= \underline{I}_R^s + \underline{I}_R^y = I_{Ra} - j(I_R^y + I_{Rr}) \\
\underline{I}_S^c &= \underline{I}_S^s + \underline{I}_S^y = -\frac{1}{2}I_{Sa} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Sr} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_S^y + j\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}I_{Sa} + \frac{1}{2}I_{Sr} + \frac{1}{2}I_S^y\right) \\
\underline{I}_T^c &= \underline{I}_T^s + \underline{I}_T^c = -\frac{1}{2}I_{Ta} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Tr} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_T^y + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}I_{Ta} + \frac{1}{2}I_{Tr} + \frac{1}{2}I_T^y\right) \\
\underline{I}_N^c &= \underline{I}_R^c + \underline{I}_S^c + \underline{I}_T^c
\end{aligned} \tag{4.8}$$

și în care, așa cum s-a putut constata, rezistența electrică echivalentă a celor patru conductoare s-a presupus, pentru simplificare, aceeași, notată cu r .

În condițiile unei rețele date, $\Delta P \rightarrow \text{Min}$ dacă:

$$(I_R^{c2} + I_S^{c2} + I_T^{c2} + I_N^{c2}) = \sum(I^{c2}) = \text{Min} \tag{4.9}$$

Vom înlocui deci în ecuația (4.9) cei patru curenți cu expresiile:

$$\begin{aligned}
I_R^{c2} &= I_{Ra}^2 + (I_R^y + I_{Rr})^2 \\
I_S^{c2} &= \left(\frac{1}{2}I_{Sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Sr} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_S^y\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}I_{Sa} + \frac{1}{2}I_{Sr} + \frac{1}{2}I_S^y\right)^2 \\
I_T^{c2} &= \left(-\frac{1}{2}I_{Ta} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Tr} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_T^y\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}I_{Ta} + \frac{1}{2}I_{Tr} + \frac{1}{2}I_T^y\right)^2 \\
I_N^{c2} &= \left(I_{Ra} - \frac{1}{2}I_{Sa} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Sr} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_S^y - \frac{1}{2}I_{Ta} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Tr} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_T^y\right)^2 + \\
&\quad \left(-I_{Rr} - I_R^y - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Sa} + \frac{1}{2}I_{Sr} + \frac{1}{2}I_S^y + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{Ta} + \frac{1}{2}I_{Tr} + \frac{1}{2}I_T^y\right)^2
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Pentru a afla valorile curenților de compensare $\underline{I}_R^y, \underline{I}_S^y, \underline{I}_T^y$, pentru care $\Sigma(P) = \text{Min}$, se calculează derivatele parțiale în raport cu fiecare din aceștia și se anulează:

$$\frac{\partial[\sum(I^2)]}{\partial I_R^y} = 0 \quad \frac{\partial[\sum(I^2)]}{\partial I_S^y} = 0 \quad \frac{\partial[\sum(I^2)]}{\partial I_T^y} = 0 \tag{4.11}$$

Se obține un sistem de trei ecuații cu trei necunoscute:

$$\begin{cases} -4I_R^y + I_S^y + I_T^y = A_1 \\ I_R^y - 4I_S^y + I_T^y = B_1 \\ I_R^y + I_S^y - 4I_T^y = C_1 \end{cases} \tag{4.12}$$

în care A_1, B_1, C_1 , au valori numai în funcție de curenții de sarcină:

$$\begin{aligned}
A_1 & \sqrt{3}(I_{Sa} - I_{Ta}) + 4I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr} \\
B_1 & \sqrt{3}(-I_{Ra} + I_{Ta}) - I_{Rr} + 4I_{Sr} - I_{Tr} \\
C_1 & \sqrt{3}(I_{Ra} - I_{Sa}) - I_{Rr} - I_{Sr} + 4I_{Tr}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Soluția sistemului (4.12) rezultă:

$$I_R^c = \frac{3A_1 + B_1 + C_1}{10}; \quad I_S^c = \frac{A_1 + 3B_1 + C_1}{10}; \quad I_T^c = \frac{A_1 + B_1 + 3C_1}{10} \tag{4.14}$$

expresii care, scrise în funcție de curenții de sarcină, devin :

$$\begin{aligned}
I_R^y & = \frac{\sqrt{3}}{5}(I_{Ta} - I_{Sa}) - I_{Rr} \\
I_S^y & = \frac{\sqrt{3}}{5}(I_{Ra} - I_{Ta}) - I_{Sr} \\
I_T^y & = \frac{\sqrt{3}}{5}(I_{Sa} - I_{Ra}) - I_{Tr}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Se poate observa că:

$$I_R^y + I_S^y + I_T^y = -(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \tag{4.16}$$

Deci puterea reactivă instalată în compensator este egală și de semn contrar cu cea absorbită de consumator. Rezultă :

$$Im(\underline{I}_d^c) = -\frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) - \frac{1}{3}(I_R^y + I_S^y + I_T^y) = 0 \tag{4.17}$$

Se obține același rezultat ca și în cazul **a1** și anume anularea componentei reactive a curentului pe secvența directă. De data aceasta însă este o compensare nesimetrică care conduce la minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare (compensare realizată cu un singur compensator - în cazul de față Y).

4.3. Criteriul b. Echilibrarea sarcinii pe cele trei faze ale rețelei fără a se urmări în mod special îmbunătățirea factorului de putere

Echilibrarea sarcinii este realizată atunci când componentele inversă și homopolară devin nule:

$$Re(\underline{I}_i^c) = 0 \quad Im(\underline{I}_i^c) = 0 \quad Re(\underline{I}_h^c) = 0 \quad Im(\underline{I}_h^c) = 0 \tag{4.18}$$

Una dintre posibilitățile realizării acestor condiții constă într-o compensare transversală a puterii reactive, de data aceasta folosind atât un compensator Y cât și unul în Δ . După compensare, componentele de secvență ale curenților din rețea, conform relațiilor din ANEXA 6 vor fi:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_d^c & = \underline{I}_d^s + \underline{I}_d^y + \underline{I}_d^{\Delta} \\
\underline{I}_i^c & = \underline{I}_i^s + \underline{I}_i^y + \underline{I}_i^{\Delta} \\
\underline{I}_h^c & = \underline{I}_h^s + \underline{I}_h^y + \underline{I}_h^{\Delta}
\end{aligned} \tag{4.19}$$

$$\begin{aligned}
\operatorname{Re}(\underline{I}_d^c) &= \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}); \\
\operatorname{Im}(\underline{I}_d^c) &= -\frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) - \frac{1}{3}(I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y) - \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A) \\
\operatorname{Re}(\underline{I}_i^c) &= \frac{1}{6}[2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + \sqrt{3}(I_{Sr} - I_{Tr})] + \frac{\sqrt{3}}{6}(I_S^Y - I_T^Y) + \frac{1}{2}(I_{RS}^A - I_{TR}^A) \\
\operatorname{Im}(\underline{I}_i^c) &= \frac{1}{6}[\sqrt{3}(I_{Sa} - I_{Ta}) - 2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}] + \frac{1}{6}(-2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y) + \frac{1}{2\sqrt{3}}(2I_{ST}^A - I_{RS}^A - I_{TR}^A) \\
\operatorname{Re}(\underline{I}_h^c) &= \frac{1}{6}[2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + \sqrt{3}(I_{Tr} - I_{Sr})] + \frac{\sqrt{3}}{6}[(I_T^Y - I_S^Y)] \\
\operatorname{Im}(\underline{I}_h^c) &= \frac{1}{6}[\sqrt{3}(I_{Ta} - I_{Sa}) - 2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}] + \frac{1}{6}(-2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y)
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Aplicând condițiile (4.18) se obține un sistem de 4 ecuații cu 6 necunoscute:

$$\begin{cases}
I_S^Y - I_T^Y + \sqrt{3}(I_{RS}^A - I_{TR}^A) = B \\
-2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y + \sqrt{3}(2I_{ST}^A - I_{RS}^A - I_{TR}^A) = C \\
I_T^Y - I_S^Y = D \\
-2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y = E
\end{cases} \tag{4.21}$$

în care:

$$\begin{aligned}
B &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) - I_{Sr} + I_{Tr} = -2\sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_i^S) \\
C &= \sqrt{3}(-I_{Sa} + I_{Ta}) + 2I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr} = -6 \operatorname{Im}(\underline{I}_i^S) \\
D &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) + I_{Sr} - I_{Tr} = -2\sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^S) \\
E &= \sqrt{3}(I_{Sa} - I_{Ta}) + 2I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr} = -6 \operatorname{Im}(\underline{I}_h^S)
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Pentru a înlătura nedeterminarea sunt necesare două condiții suplimentare. Acestea pot fi de pildă, următoarele :

-unul dintre curenții compensatorului Y să fie nul ; de exemplu $I_R^Y = 0$; (4.23)

-pentru compensatorul Δ : $I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0$ (4.24)

ceea ce înseamnă că cel puțin unul dintre curenții de compensare a acestuia va avea caracter inductiv și în conformitate cu relațiile (4.1), compensatorul va interveni numai în circulația de curenți pe secvența inversă ($\underline{I}_d^A = 0, \underline{I}_h^A = 0$).

Se va forma un sistem de ecuații ale cărui soluții sunt:

$$\begin{aligned}
I_R^Y &= 0 & I_{RS}^A &= \frac{-3B + C - 3D - E}{6\sqrt{3}} \\
I_S^Y &= \frac{D - E}{2} & I_{ST}^A &= \frac{-C + E}{3\sqrt{3}} \\
I_T^Y &= \frac{-D - E}{2} & I_{TR}^A &= \frac{3B + C + 3D - E}{6\sqrt{3}}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Adică:

$$\begin{aligned}
 I_R^Y &= 0 & I_{RS}^A &= \frac{2}{3}(I_{Sa} - I_{Ra}) \\
 I_S^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} + I_{Sa} - 2I_{Ta}) + I_{Rr} - I_{Sr} & I_{ST}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ta} - I_{Sa}); \\
 I_T^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-I_{Ra} + 2I_{Sa} - I_{Ta}) + I_{Rr} - I_{Tr} & I_{TR}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ra} - I_{Ta})
 \end{aligned} \quad (4.26)$$

4.4. Criteriul c. Îmbunătățirea factorului de putere și micșorarea nesimetriei.

Aici se pot discuta mai multe criterii pe baza cărora se dimensionează elementele instalațiilor de compensare, criterii ce conduc la reducerea parțială sau totală a circulației de putere reactivă în rețeaua de alimentare și la simetrizarea parțială sau totală a sarcinii. Astfel :

4.4.1. Criteriul c1 Minimizarea nesimetriei sarcinii prin anularea prin compensare a curentului de secvență homopolară și creșterea factorului de putere prin compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă

Pe conductorul neutru circulează un curent $I_N = 3I_h$. Prezența acestui curent provoacă neajunsuri importante atât în ceea ce privește majorarea pierderilor (cu atât mai mult cu cât rezistența conductorului neutru este mai mare decât a celui de fază) cât și în funcționarea corectă a unor aparate de măsură și protecție.

Asociind anularea curentului homopolar cu anularea componentei reactive a curentului de secvență directă,

$$\operatorname{Im}(I_d^c) = 0 \quad \operatorname{Re}(I_h^c) = 0 \quad \operatorname{Im}(I_h^c) = 0 \quad (4.27)$$

efecte ce se pot obține prin folosirea unui singur compensator, mai precis compensatorul Y, rezultă următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases}
 I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y = A \\
 I_T^Y - I_S^Y = D \\
 -2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y = E
 \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\text{în care: } A = -(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) = 3 \operatorname{Im}(I_d^s) \quad (4.29)$$

(D, E au fost explicitați mai sus). Soluția sistemului (4.28) este:

$$\begin{aligned}
 I_R^Y &= \frac{A + E}{3} & I_R^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) - I_{Rr} \\
 I_S^Y &= \frac{2A + 2D - E}{6} & I_S^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) - I_{Sr} \\
 I_T^Y &= \frac{2A - 3D - E}{6} & I_T^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) - I_{Tr}
 \end{aligned} \quad (4.30) \quad \text{adică :} \quad (4.31)$$

4.4.2. Criteriul c2. Micșorarea nesimetriei sarcinii prin anularea prin compensare a curentului de secvență inversă și creșterea factorului de putere prin compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă.

Prezența unor componente de secvență inversă în tensiunea de alimentare a unor receptori de tip motoare asincrone, poate provoca neajunsuri datorate apariției unor cupluri parazite ce micșorează cuplul motor al mașinii. În aceste condiții este de dorit să se atenueze componenta de secvență inversă în curent și deci și în tensiune. Dacă la aceasta se adaugă și condiția de compensare totală a puterii reactive pe secvența directă, se pot scrie relațiile:

$$\operatorname{Im}(I_d^c) = 0 \quad \operatorname{Re}(I_i^c) = 0 \quad \operatorname{Im}(I_i^c) = 0 \quad (4.32)$$

Pentru a obține condițiile (4.32) este suficient dacă folosim un singur compensator, de exemplu un compensator Y. Rezultă următorul sistem de ecuații:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R^Y \\ I_S^Y \\ I_T^Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Soluțiile acestuia sunt

$$\begin{aligned} I_R^Y &= \frac{A+C}{3} & I_R^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ta}) - I_{Rr} \\ I_S^Y &= \frac{2A-3B-C}{6} & I_S^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Ra}) - I_{Sr} \\ I_T^Y &= \frac{2A+3B-C}{6} & I_T^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Sa}) - I_{Tr} \end{aligned} \quad (4.34) \quad \text{adică :} \quad (4.35)$$

4.4.3. Criteriul c3. Simetrizarea totală și maximizarea factorului de putere

Acest regim este cel mai avantajos din punctul de vedere al condițiilor tehnice de funcționare ale rețelei. Obținerea atât a simetrizării totale cât și a anulării puterii reactive vehiculate prin rețeaua de alimentare, este posibilă numai prin utilizarea ambelor compensatoare.

Pentru determinarea curenților de compensare se impun următoarele condiții:

$$\operatorname{Im}(I_d^c) = 0 \quad \operatorname{Re}(I_i^c) = 0 \quad \operatorname{Im}(I_i^c) = 0 \quad \operatorname{Re}(I_h^c) = 0 \quad \operatorname{Im}(I_h^c) = 0 \quad (4.36)$$

Se formează în acest fel un sistem de 5 ecuații cu 6 necunoscute:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 & -1 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ -2 & 1 & 1 & -\sqrt{3} & 2\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R^Y \\ I_S^Y \\ I_T^Y \\ I_{RS}^{\Delta} \\ I_{ST}^{\Delta} \\ I_{TR}^{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Pentru înlăturarea nedeterminării mai este necesară o condiție. Aceasta poate fi una dintre următoarele :

4.4.3.1. Criteriul c3-1. Intervenția compensatorului Δ numai în circulația curenților de secvență inversă

Ceea ce, matematic se exprimă prin condiția :

$$I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0 \quad (4.38)$$

În acest caz se obțin următoarele soluții:

$$\begin{aligned} I_R^Y &= \frac{A+E}{3} & I_{RS}^A &= \frac{-3B+C-3D-E}{6\sqrt{3}} \\ I_S^Y &= \frac{2A+3D-E}{3} & I_{ST}^A &= \frac{-C+E}{3\sqrt{3}} \\ I_T^Y &= \frac{2A-3D-E}{3} & I_{TR}^A &= \frac{3B+C+3D-E}{6\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (4.39) \quad (4.40)$$

rezultă :

$$\begin{aligned} I_R^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) - I_{Rr} & I_{RS}^A &= \frac{2}{3}(I_{Sa} - I_{Ra}) \\ I_S^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) - I_{Sr} & I_{ST}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ta} - I_{Sa}) \\ I_T^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) - I_{Tr} & I_{TR}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ra} - I_{Ta}) \end{aligned} \quad (4.41)$$

4.4.3.1. Criteriul c3-2. Minimizarea pierderilor de putere activă în compensatoare

Aceste pierderi de putere activă sunt localizate în conductanțele echivalente, neglijate de noi la modelarea compensatoarelor. Presupunând pentru simplificare aceeași conductanță pe toate laturile celor două compensatoare, condiția matematică ce corespunde acestui criteriu, este:

$$(I_R^Y)^2 + (I_S^Y)^2 + (I_T^Y)^2 + (I_{RS}^A)^2 + (I_{ST}^A)^2 + (I_{TR}^A)^2 = \sum (I)^2 \quad (4.42)$$

Modul de rezolvare al sistemului obținut este următorul:

- se exprimă toate ecuațiile sistemului (4.36) în funcție de unul dintre curenți, de exemplu I_R^Y . Va rezulta sistemul:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 & -1 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ -2 & 1 & 1 & -\sqrt{3} & 2\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R^Y \\ I_S^Y \\ I_T^Y \\ I_{RS}^A \\ I_{ST}^A \\ I_{TR}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - I_{RY}^c \\ B \\ C - 2I_{RY}^c \\ D \\ E - 2I_{RY}^c \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Acest sistem va permite exprimarea tuturor curenților de compensare în funcție de curentul I_R^Y . Și anume:

$$\begin{aligned}
I_S^Y &= \frac{D-E}{2} + I_R^Y & I_{RS}^\Delta &= \frac{2A-3B+C-3D+E}{6\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_R^Y \\
I_T^Y &= -\frac{D+E}{2} + I_R^Y & I_{ST}^\Delta &= \frac{A-C+2E}{3\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_R^Y \\
&& I_{TR}^\Delta &= \frac{2A+3B+C+3D+E}{6\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_R^Y
\end{aligned} \tag{4.44}$$

Aceștia vor permite scrierea expresiei $\Sigma(I)^2$ în funcție de curentul I_R^Y :

$$\Sigma(I)^2 = 4(I_R^Y)^2 + 2\left[U+V - \frac{1}{\sqrt{3}}(W+X+Z)\right]I_R^Y + U^2 + V^2 + W^2 + X^2 + Z^2 \tag{4.45}$$

în care:

$$\begin{aligned}
U &= \frac{D-E}{2} & V &= \frac{D-E}{2} & Z &= \frac{2A+3B+C+3D+E}{6\sqrt{3}} \\
X &= \frac{A-C+2E}{3\sqrt{3}} & W &= \frac{2A-3B+C-3D+E}{6\sqrt{3}}
\end{aligned} \tag{4.46}$$

Valoarea lui I_R^Y pentru care $\Sigma(I)^2 = \min$, se obține din condiția: $\frac{\partial[\Sigma(I)^2]}{\partial I_R^{Y2}} = 0$ (4.47)

Rezultă:

$$I_R^Y = -\frac{1}{4}\left[U+V - \frac{1}{\sqrt{3}}(W+X+Z)\right] = \frac{A+4E}{12} \tag{4.48}$$

Apoi se obțin imediat expresiile pentru curenții de compensare :

$$\begin{aligned}
I_S^Y &= \frac{A+6D-2E}{12} \\
I_T^Y &= \frac{A-6D-2E}{12} \\
I_{RS}^\Delta &= \frac{3A-6B+2C-6D-2E}{12\sqrt{3}} \\
I_{ST}^\Delta &= \frac{3A-4C+4E}{12\sqrt{3}} \\
I_{TR}^\Delta &= \frac{3A+6B+2C+6D-2E}{12\sqrt{3}}
\end{aligned} \tag{4.49}$$

sau, folosind componentele curenților de sarcină:

$$\begin{aligned}
I_R^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) + \frac{1}{4}(-3I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
I_S^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) + \frac{1}{4}(I_{Rr} - 3I_{Sr} + I_{Tr}) \\
I_T^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) + \frac{1}{4}(-I_{Rr} - I_{Sr} + 3I_{Tr})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{RS}^A &= \frac{2}{3}(I_{Sa} - I_{Ra}) - \frac{1}{4\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
I_{ST}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ta} - I_{Sa}) - \frac{1}{4\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
I_{TR}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ra} - I_{Ta}) - \frac{1}{4\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})
\end{aligned} \tag{4.50}$$

4.4.3.3. Criteriul c3-3. Minimizarea puterii reactive instalate pentru compensare

Acest criteriu intervine ca o restricție economică, ca de fiecare dată când trebuie selectată, dintre toate soluțiile tehnice care conduc la același rezultat, cea mai ieftină. Explicarea matematică a acestei restricții este următoarea :

$$\sum(I \cdot U)^2 = Min. \tag{4.51}$$

în care I și U sunt curentul reactiv prin unul dintre laturile compensatoarelor respectiv tensiunea aplicată acestuia. În felul acesta nu se face distincție între cele două tipuri de putere reactivă ce trebuie instalate, inductivă și capacitivă.

Considerând simplificarea folosită încă de la începutul acestui capitol, referitoare la simetria sistemului trifazat de tensiuni, se poate scrie :

$$\sum(I \cdot U)^2 = U_{fn}^2 \left[(I_R^Y)^2 + (I_S^Y)^2 + (I_T^Y)^2 + (\sqrt{3}I_{RS}^A)^2 + (\sqrt{3}I_{ST}^A)^2 + (\sqrt{3}I_{TR}^A)^2 \right] \tag{4.52}$$

iar condiția (4.51) se transformă în:

$$\sum(I^Y)^2 = (I_R^Y)^2 + (I_S^Y)^2 + (I_T^Y)^2 + (\sqrt{3}I_{RS}^A)^2 + (\sqrt{3}I_{ST}^A)^2 + (\sqrt{3}I_{TR}^A)^2 = Min. \tag{4.53}$$

Această condiție se alătură sistemului (4.43) și pentru rezolvare se aplică o metodă similară cu cea de la c3-2. Se folosesc aceleași relații pentru exprimarea curenților de compensare în funcție de I_R^Y (relațiile 4.44) și se introduce în relația (4.53).

Valoarea lui I_R^Y pentru care $\Sigma(I)^2 = Min$ se obține din condiția:

$$\frac{\partial \left[\sum(I \cdot U)^2 \right]}{\partial I_R^Y} = 0 \tag{4.54}$$

Rezultă:

$$I_R^Y = -\frac{1}{6} \left[U + V - \sqrt{3}(W + X + Z) \right] = \frac{A + 2E}{6} \tag{4.55}$$

Folosind relațiile (4.44) se găsesc și expresiile pentru calculul celorlalți curenți de compensare. Se obțin:

$$\begin{aligned}
I_S^Y &= \frac{A + 3D - E}{6} & I_{RS}^A &= \frac{A - 3B + C - 3D - E}{6\sqrt{3}} \\
I_T^Y &= \frac{A - 3D - E}{6} & I_{ST}^A &= \frac{A - 2C + E}{6\sqrt{3}} \\
& & I_{TR}^A &= \frac{A + 3B + C + 3D - E}{6\sqrt{3}}
\end{aligned} \tag{4.56}$$

Sau:

$$\begin{aligned}
 I_{Rr}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) + \frac{1}{6}(-5I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
 I_{Sr}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) + \frac{1}{6}(I_{Rr} - 5I_{Sr} + I_{Tr}) \\
 I_{Tr}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) + \frac{1}{6}(I_{Rr} + I_{Sr} - 5I_{Tr}) \\
 I_{RS}^A &= \frac{2}{3}(I_{Sa} - I_{Ra}) - \frac{1}{6\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
 I_{ST}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ta} - I_{Sa}) - \frac{1}{6\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
 I_{RS}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ra} - I_{Ta}) - \frac{1}{6\sqrt{3}}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})
 \end{aligned} \tag{4.57}$$

4.3.4. Criteriul c4. Simetrizarea sarcinii și compensarea puterii reactive până la un factor de putere impus

Aplicarea acestui criteriu va conduce la o problemă care este de fapt generalizarea celei obținute prin aplicarea criteriului c3. Prin compensarea parțială a componentei imaginare a curentului de secvența inversă, astfel încât:

$$Im(\underline{I}_d^C) = k Im(\underline{I}_d^S) \tag{4.58}$$

în care k este un factor subunitar, se obține factorul de putere impus :

$$tg\varphi_i = \frac{Im(\underline{I}_d^C)}{Re(\underline{I}_d^C)} = \frac{k \cdot Im(\underline{I}_d^S)}{Re(\underline{I}_d^S)} = k \cdot tg\varphi_s \tag{4.59}$$

În relația (4.59) $tg\varphi_s$ corespunde factorului de putere al sarcinii pe secvența directă :

$$tg\varphi_s = \frac{I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}}{I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}} \tag{4.60}$$

Deci :

$$k = \frac{tg\varphi_i}{tg\varphi_s} = \frac{tg(\arccos\varphi_i)}{tg(\arccos\varphi_{si})} \tag{4.61}$$

Problema devine o generalizare a celei de la criteriul c3. În sistemul (4.37), termenul liber Λ se va înlocui cu :

$$A' \quad (1-k) A \tag{4.62}$$

și în consecință, prin rezolvarea noului sistem de ecuații care se formează, folosind unul dintre criteriile c3-1, c3-2, c3-3, pentru curenții de compensare se vor obține expresii de aceeași formă însă I_{Rr} , I_{Sr} și I_{Tr} se vor înlocui cu $(1-k)I_{Rr}$, $(1-k)I_{Sr}$ și respectiv $(1-k)I_{Tr}$.

Se observă imediat că în cazul compensării totale a puterii reactive (criteriul c3) $\cos\varphi_i = 1$, $tg\varphi_i = 0$ deci $k = 0$.

4.5. Criteriul d. Minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare

În rețelele de distribuție cu patru conductoare, în cazul unui regim dezechilibrat, și conductorul neutru va fi parcurs de curent. De aceea, condiția de minimizare a pierderilor

totale de putere activă (longitudinale) pe o linie electrică ce alimentează ansamblul consumator-compensator, se va scrie sub forma :

$$\Delta P = (I_R^c{}^2 + I_S^c{}^2 + I_T^c{}^2 + I_N^c{}^2) \cdot r = MIN \quad (4.63)$$

în care cu r s-a notat rezistența electrică a conductorului de fază al liniei, aproximând, așa cum se poate observa, aceeași valoare și pentru conductorul neutru.

În relația (4.63) cei patru curenți se vor scrie în funcție de componentele de fază ale curenților de sarcină și ale celor absorbiți de compensatoarele Δ și Y :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^c &= \underline{I}_R^s + \underline{I}_R^A + \underline{I}_R^Y \\ \underline{I}_S^c &= \underline{I}_S^s + \underline{I}_S^A + \underline{I}_S^Y \\ \underline{I}_T^c &= \underline{I}_T^s + \underline{I}_T^A + \underline{I}_T^Y \\ \underline{I}_N^c &= \underline{I}_R^s + \underline{I}_S^A + \underline{I}_T^Y \end{aligned} \quad (4.64)$$

Utilizând acum relațiile (A6.4), (A6.9) și (A6.23) se obțin :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^c &= \frac{1}{2} \left[2I_{Ra}^s + I_{RS}^A - I_{TR}^A + j \left(-2I_{Rr}^s - \sqrt{3}I_{RS}^A - \sqrt{3}I_{TR}^A - 2I_R^A \right) \right] \\ \underline{I}_S^c &= \frac{1}{2} \left[-I_{Sa}^s - \sqrt{3}I_{Sr}^s - I_{RS}^A - 2I_{ST}^A - \sqrt{3}I_S^Y + j \left(-\sqrt{3}I_{Sa}^s + I_{Sr}^s + \sqrt{3}I_{RS}^A + I_S^Y \right) \right] \\ \underline{I}_T^c &= \frac{1}{2} \left[-I_{Ta}^s + \sqrt{3}I_{Tr}^s + I_{TR}^A + 2I_{ST}^A + \sqrt{3}I_T^Y + j \left(\sqrt{3}I_{Ta}^s + I_{Tr}^s + \sqrt{3}I_{TR}^A + I_T^Y \right) \right] \\ \underline{I}_N^c &= \frac{1}{2} \left[2I_{Ra}^s - I_{Sa}^s - I_{Ta}^s - \sqrt{3}I_{Sr}^s + \sqrt{3}I_{Tr}^s - \sqrt{3}I_S^Y + \sqrt{3}I_T^Y + \right. \\ &\quad \left. + j \left(-2I_{Rr}^s - \sqrt{3}I_{Sa}^s + I_{Sr}^s + \sqrt{3}I_{Ta}^s + I_{Tr}^s - 2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y \right) \right] \end{aligned} \quad (4.65)$$

Calculând acum pătratul valorilor efective ale celor patru curenți și introducându-le în relația (4.63) se obține o expresie complexă în funcție de cele șase necunoscute:

$$I_R^Y, I_S^Y, I_T^Y, I_{RS}^A, I_{ST}^A, I_{TR}^A$$

Se calculează expresiile derivatelor parțiale și se pune condiția anulării lor simultane:

$$\frac{\partial(\Delta P)}{\partial I_R^Y} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P)}{\partial I_S^Y} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P)}{\partial I_T^Y} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P)}{\partial I_{RS}^A} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P)}{\partial I_{ST}^A} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P)}{\partial I_{TR}^A} = 0. \quad (4.66)$$

Se obține un sistem de șase ecuații cu șase necunoscute :

$$\begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ -1 & 4 & -1 & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 \\ -1 & -1 & 4 & 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 & 4 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 1 & 4 & 1 \\ \sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & 1 & 1 & 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R^Y \\ I_S^Y \\ I_T^Y \\ I_{RS}^A \\ I_{ST}^A \\ I_{TR}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \\ E_2 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

în care, termenii liberi sunt:

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \sqrt{3}(I_{Ta}^s - I_{Sa}^s) - 4I_{Rr}^s + I_{Sr}^s + I_{Tr}^s \\
 B_2 &= \sqrt{3}(I_{Ra}^s - I_{Ta}^s) + I_{Rr}^s - 4I_{Sr}^s + I_{Tr}^s \\
 C_2 &= \sqrt{3}(I_{Sa}^s - I_{Ra}^s) + I_{Rr}^s + I_{Sr}^s - 4I_{Tr}^s \\
 D_2 &= I_{Sa}^s - I_{Ra}^s - \sqrt{3}(I_{Rr}^s + I_{Sr}^s) \\
 E_2 &= I_{Ta}^s - I_{Sa}^s - \sqrt{3}(I_{Sr}^s + I_{Tr}^s) \\
 D_2 &= I_{Ra}^s - I_{Ta}^s - \sqrt{3}(I_{Tr}^s + I_{Rr}^s)
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

Însă, determinantul principal asociat sistemului (4.67) este nul (cele șase ecuații nu sunt independente), sistemul admitând deci o infinitate de soluții. Pentru eliminarea nedeterminării este necesară utilizarea a încă unei condiții de legătură între necunoscute, independente de cele cuprinse în sistemul (4.67)

Aceasta poate fi de exemplu condiția (4.39) :

$$I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0$$

Se vor obține astfel soluțiile :

$$\begin{aligned}
 I_{Rr}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) - I_{Rr} & I_{RS}^A &= \frac{2}{3}(I_{Sa} - I_{Ra}) \\
 I_{Sr}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) - I_{Sr} & I_{ST}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ta} - I_{Sa}) \\
 I_{Tr}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) - I_{Tr} & I_{TR}^A &= \frac{2}{3}(I_{Ra} - I_{Ta})
 \end{aligned} \tag{4.69}$$

care se constată că sunt identice cu cele obținute prin aplicarea criteriului **c3-1**. Se poate afirma că *pierderile de putere activă totale în rețeaua de alimentare a consumatorului compensat sunt minime atunci când se anulează componentele de secvență inversă, homopolară și componenta reactivă a curentului de secvență directă.*

O concluzie la care ne așteptam de altminteri.

4.6. Susceptanțele de compensare exprimate în funcție de componentele curenților de fază, respectiv de admitanțele echivalente ale sarcinii

De la exprimarea curenților de compensare în funcție de componentele active și reactive ale curenților de fază ai sarcinii, se poate trece simplu la exprimarea susceptanțelor de compensare ce trebuie instalate în cele două compensatoare, Y și Δ, în funcție de aceleași elemente și în plus în funcție de susceptanțele și conductanțele echivalente ale sarcinii, înlocuind :

$$\begin{aligned}
 I_{Rr}^Y &= U_{Rr} \cdot B_{Rr}^Y = U \cdot B_{Rr}^Y & I_{RS} &= U_{RS} \cdot B_{RS}^A = \sqrt{3}U \cdot B_{RS}^A \\
 I_{Sr}^Y &= U_{Sr} \cdot B_{Sr}^Y = U \cdot B_{Sr}^Y & I_{ST} &= U_{ST} \cdot B_{ST}^A = \sqrt{3}U \cdot B_{ST}^A \\
 I_{Tr}^Y &= U_{Tr} \cdot B_{Tr}^Y = U \cdot B_{Tr}^Y & I_{TR} &= U_{TR} \cdot B_{TR}^A = \sqrt{3}U \cdot B_{TR}^A
 \end{aligned} \tag{4.70}$$

La scrierea relațiilor (4.70) s-a presupus desigur, ca și în celelalte cazuri de altfel, că prin compensare sistemul trifazat al tensiunilor rezultă simetric și echilibrat. Se obțin astfel, de exemplu în urma dimensionării prin aplicarea **criteriului c3-1**, următoarele relații:

$$\begin{aligned}
B_{RS}^Y &= \frac{1}{U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Ta} - I_{Sa}) - I_{Rr} \right] & B_{RS}^A &= \frac{2}{3\sqrt{3}U} (I_{Sa} - I_{Ra}) \\
B_{ST}^Y &= \frac{1}{U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Ra} - I_{Ta}) - I_{Sr} \right] & B_{ST}^A &= \frac{2}{3\sqrt{3}U} (I_{Ta} - I_{Sa}) \\
B_{TR}^Y &= \frac{1}{U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Sa} - I_{Ra}) - I_{Tr} \right] & B_{TR}^A &= \frac{2}{3\sqrt{3}U} (I_{Ra} - I_{Ta})
\end{aligned} \tag{4.71}$$

respectiv :

$$\begin{aligned}
B_{RS}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_T^S - G_S^S) - B_{RS}^S & B_{RS}^A &= \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_S^S - G_R^S) \\
B_{ST}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_R^S - G_T^S) - B_{ST}^S & B_{ST}^A &= \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_T^S - G_S^S) \\
B_{TR}^Y &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_S^S - G_R^S) - B_{TR}^S & B_{TR}^A &= \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_R^S - G_T^S)
\end{aligned} \tag{4.72}$$

Într-o manieră similară se poate efectua și transformarea expresiilor rezultate prin aplicarea celorlalte criterii de dimensionare a compensatoarelor.

4.7. Circulația de curenți și puteri în ansamblul consumator compensator, în componente de fază

În acest paragraf ne propunem să determinăm circulația curenților și puterilor în interiorul ansamblului consumator-compensator, în componente de fază, foarte utilă pentru efectuarea unor calcule de dimensionare sau pentru verificarea în instalațiile reale, a corectitudinii compensării.

Pentru aceasta se vor folosi relațiile (A6.23) referitoare la curenții pe fază absorbiți de compensatorul Δ respectiv (A6.9) pentru compensatorul Y . În ambele seturi de ecuații amintite, expresiile curenților sunt scrise pentru un plan complex unic (axa reală plasată în \underline{U}_R). Pentru a determina expresiile curenților \underline{I}_S și \underline{I}_T scrise în planuri complexe raportate la tensiunile de fază aferente (notate $\underline{I}_S^*, \underline{I}_T^*$), se calculează:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_S^{A*} &= a \cdot \underline{I}_S^A & \underline{I}_S^{A*} &= a \cdot \underline{I}_S^A \\
\underline{I}_T^{A*} &= a^2 \cdot \underline{I}_T^A & \underline{I}_T^{A*} &= a^2 \cdot \underline{I}_T^A
\end{aligned} \tag{4.73}$$

Se obțin:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{\Delta*} &= \frac{1}{2} (I_{RS}^{\Delta} - I_{TR}^{\Delta}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{RS}^{\Delta} + I_{TR}^{\Delta}) \\
\underline{I}_S^{\Delta*} &= \frac{1}{2} (I_{ST}^{\Delta} - I_{RS}^{\Delta}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{RS}^{\Delta} + I_{ST}^{\Delta}) \\
\underline{I}_T^{\Delta*} &= \frac{1}{2} (I_{TR}^{\Delta} - I_{ST}^{\Delta}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{TR}^{\Delta} + I_{ST}^{\Delta})
\end{aligned} \tag{4.74}$$

respectiv:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{Y*} &= -j \cdot I_R^Y \\
\underline{I}_S^{Y*} &= -j \cdot I_S^Y \\
\underline{I}_T^{Y*} &= -j \cdot I_T^Y
\end{aligned} \tag{4.75}$$

Este interesant de calculat și curentul pe conductorul neutru:

$$\underline{I}_N^c = \underline{I}_N^Y + \underline{I}_N^S \tag{4.76}$$

în care:

$$\underline{I}_N^Y = \underline{I}_R^Y + \underline{I}_S^Y + \underline{I}_T^Y \quad (4.77)$$

$$\underline{I}_N^S = \underline{I}_R^S + \underline{I}_S^S + \underline{I}_T^S \quad (4.78)$$

De data aceasta se va păstra reprezentarea fazorială într-un plan complex unic, mai precis cel cu \underline{U}_R în axa reală :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^Y &= -j \cdot I_R^Y \\ \underline{I}_S^Y &= a^2 \cdot (-j \cdot I_S^Y) = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_S^Y + j \cdot \frac{1}{2} I_S^Y \\ \underline{I}_T^Y &= a \cdot (-j \cdot I_T^Y) = \frac{\sqrt{3}}{2} I_T^Y + j \cdot \frac{1}{2} I_T^Y \\ \underline{I}_R^S &= I_{Ra} - j \cdot I_{Rr} \\ \underline{I}_S^S &= a^2 \cdot (I_{Sa} - j \cdot I_{Sr}) = -\frac{1}{2} I_{Sa} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Sr} + j \cdot \left(\frac{1}{2} I_{Sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Sa} \right) \\ \underline{I}_T^S &= a \cdot (I_{Ta} - j \cdot I_{Tr}) = -\frac{1}{2} I_{Ta} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Tr} + j \cdot \left(\frac{1}{2} I_{Tr} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{Ta} \right) \end{aligned} \quad (4.79)$$

Se obțin, cu titlu de valabilitate generală :

$$\underline{I}_N^Y = \frac{\sqrt{3}}{2} (I_T^Y - I_S^Y) + j \cdot \frac{1}{2} (-2I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y) \quad (4.80)$$

$$\underline{I}_N^S = \frac{1}{2} (2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{Tr} - I_{Sr}) + j \cdot \left[\frac{1}{2} (-2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{Ta} - I_{Sa}) \right] \quad (4.81)$$

Din relațiile (4.74) și (4.75) rezultă câteva observații foarte importante:

- compensatorul $\Delta+Y$ intervine atât asupra circulației de putere reactivă pe fiecare fază (și Δ și Y) cât și asupra circulației de putere activă (numai Δ);
- comportamentul cel mai interesant îl are compensatorul Δ deoarece se poate afirma că el realizează și o “compensare a puterii active” prin aceea că pe unele faze el absoarbe putere activă și pe altele injectează în rețea (debitază) putere activă. Cu alte cuvinte el realizează o redistribuire a puterii active între cele trei faze. Acest comportament este valabil pentru orice Δ format numai din susceptanțe (inductive sau capacitive). Dacă cele trei elemente ale compensatorului sunt identice, el nu modifică circulația de putere activă pe nici o fază. În cazul general, al unui Δ de susceptanțe oarecare:

$$\begin{aligned} P_R^\Delta &= U_R \cdot I_{Ra}^{\Delta*} = U_R \cdot \frac{1}{2} (I_{RS}^\Delta - I_{TR}^\Delta) \\ P_S^\Delta &= U_S \cdot I_{Sa}^{\Delta*} = U_S \cdot \frac{1}{2} (I_{ST}^\Delta - I_{RS}^\Delta) \\ P_T^\Delta &= U_T \cdot I_{Ta}^{\Delta*} = U_T \cdot \frac{1}{2} (I_{TR}^\Delta - I_{ST}^\Delta) \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\sum_{f=R,S,T} P_f^\Delta = \sum_{f=R,S,T} U_f \cdot \operatorname{Re}(I_f^\Delta) = 0$$

Deci compensatorul Δ nu modifică circulația de putere activă pe ansamblul celor trei faze ale rețelei. Valorile puterilor active absorbite sau debitate pe faze sunt funcție de valorile elementelor Δ , care la rândul lor se stabilesc în funcție de sarcina ce trebuie compensată (prin folosirea unuia dintre criteriile prezentate în acest capitol.

- la compensarea puterii reactive până la nivelul dorit contribuie atât compensatorul în Δ cât și cel în Y .

Curenții pe fiecare fază a celor două compensatoare, se pot scrie acum cu ușurință în funcție de componentele active și reactive ale fiecărui curent de sarcină, plecând de la relațiile (4.74) și (4.75). Vom considera aici numai criteriul **c3**, considerat cel mai semnificativ.

Criteriul c3-1 (compensatorul Δ intervine doar pe secvența inversă a curenților de sarcină);

Folosind soluțiile sistemului (4.36) rezolvat în ipoteza (4.38), exprimate în funcție de curenții de sarcină prin relațiile (4.41), se obțin :

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^{\Delta*} &= \frac{1}{3}(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) + j\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) \\ \underline{I}_S^{\Delta*} &= \frac{1}{3}(I_{Ra} - 2I_{Sa} + I_{Ta}) + j\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) \\ \underline{I}_T^{\Delta*} &= \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} - 2I_{Ta}) + j\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra})\end{aligned}\quad (4.83)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ta}) + I_{Rr}\right] \\ \underline{I}_S^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Ra}) + I_{Sr}\right] \\ \underline{I}_T^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Sa}) + I_{Tr}\right]\end{aligned}$$

Valorile efective ale celor trei curenți pe fazele Δ sunt egale :

$$I_R^{A*} = I_R^{\Delta*} = I_R^{Y*} = \frac{2}{3}\left(I_{Ra}^2 + I_{Sa}^2 + I_{Ta}^2 - I_{Ra}I_{Sa} - I_{Sa}I_{Ta} - I_{Ta}I_{Ra}\right)^{1/2}\quad (4.84)$$

Se pot acum calcula curenții absorbiți pe fiecare fază de către ansamblul consumator-compensator.

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^c &= \underline{I}_R^{s*} + \underline{I}_R^{\Delta*} + \underline{I}_R^{Y*} & \text{unde} & \quad \underline{I}_R^{s*} = I_{Ra} - j \cdot I_{Rr} \\ \underline{I}_S^c &= \underline{I}_S^{s*} + \underline{I}_S^{\Delta*} + \underline{I}_S^{Y*} & & \quad \underline{I}_S^{s*} = I_{Sa} - j \cdot I_{Sr} \\ \underline{I}_T^c &= \underline{I}_T^{s*} + \underline{I}_T^{\Delta*} + \underline{I}_T^{Y*} & & \quad \underline{I}_T^{s*} = I_{Ta} - j \cdot I_{Tr}\end{aligned}\quad (4.85)$$

Se observă că :

$$I_{fr}^{\Delta*} + I_{fr}^{Y*} = -I_{fr}^s \quad f = R, S, T\quad (4.86)$$

$$\text{și} \quad \underline{I}_R^c = \underline{I}_S^c = \underline{I}_T^c = \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) = \text{Re}(\underline{I}_d^c) = \text{Re}(\underline{I}_d^s)\quad (4.87)$$

Se constată satisfacerea sistemului de ecuații (4.36) : prin compensare s-au anulat curenții de secvență inversă, homopolară și componenta reactivă a curentului de secvență directă. Cu alte cuvinte s-a obținut echilibrarea sarcinii și compensarea totală a acesteia. (până la $\cos\varphi_s = \cos\varphi_d = 1$). Curenții pe faze devin după compensare pur activi, egali între ei și egali cu media aritmetică a celor trei curenți activi ai sarcinii.

Curentul pe conductorul neutru al compensatorului Y, calculat cu relația (4.77) în care s-au înlocuit relațiile (4.41) capătă expresia:

$$\underline{I}_N^Y = \frac{1}{2}(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Sr} - I_{Tr}) + j\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Sa} - I_{Ta}) + \frac{1}{2}(2I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr})\right]\quad (4.88)$$

Se constată ceea ce era de așteptat :

$$\underline{I}_N^c = \underline{I}_N^Y + \underline{I}_N^s = 0 \quad \text{sau} \quad \underline{I}_N^Y = -\underline{I}_N^s\quad (4.89)$$

deoarece $\underline{I}_N^c = 3 \cdot \underline{I}_h^c$ iar compensatoarele au fost dimensionate astfel încât să anuleze componenta de secvență homopolară ($\underline{I}_h^c = 0$).

Deci compensatorul Y injectează pe conductorul neutru un curent egal și de semn opus cu cel de pe conductorul neutru al sarcinii. Același rezultat se obține prin înlocuirea în expresia lui \underline{I}_h^y din relațiile (4.1), a relațiilor (4.41). Se constată că :

$$\underline{I}_h^s = -\underline{I}_h^y \quad (4.90)$$

Puterile active pe cele trei faze în interiorul ansamblului consumator-compensator

$$\begin{aligned} P_R^s &= U_R \cdot I_{Ra} = U \cdot I_{Ra} & P_R^{\Delta} &= U_R \cdot I_{Ra}^{\Delta*} = U \frac{1}{3} (-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \\ \text{sunt : } P_S^s &= U_S \cdot I_{Sa} = U \cdot I_{Sa} & P_S^{\Delta} &= U_S \cdot I_{Sa}^{\Delta*} = U \frac{1}{3} (I_{Ra} - 2I_{Sa} + I_{Ta}) \\ P_T^s &= U_T \cdot I_{Ta} = U \cdot I_{Ta} & P_T^{\Delta} &= U_T \cdot I_{Ta}^{\Delta*} = U \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} - 2I_{Ta}) \end{aligned} \quad (4.91)$$

Compensatorul Δ modifică pe fiecare fază circulația puterii active : pe unele debitează putere activă iar pe altele absoarbe. Pe ansamblul celor trei faze nu este afectată însă circulația puterii active deoarece :

$$\sum_{f=R,S,T} P_f^{\Delta} = 0 \quad (4.92)$$

În schimb, compensatorul Y nu intervine de loc asupra circulației puterii active :

$$P_R^y = P_S^y = P_T^y = 0 \quad (4.93)$$

După compensare :

$$\begin{aligned} P_R^c &= U_R \cdot I_{Ra}^c = U \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \\ P_S^c &= U_S \cdot I_{Sa}^c = U \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \\ P_T^c &= U_T \cdot I_{Ta}^c = U \frac{1}{3} (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \end{aligned} \quad (4.94)$$

Se observă încă o dată că prezența compensatorului nu afectează puterea activă absorbită din rețea (aceeași înainte și după compensare):

$$\sum_{f=R,S,T} P_f^s = \sum_{f=R,S,T} P_f^c = U \cdot (I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \quad (4.95)$$

Puterile reactive pe cele trei faze în interiorul ansamblului consumator-compensator se calculează cu următoarele relații:

$$\begin{aligned} Q_R^s &= U_R \cdot I_{Rr} & Q_R^{\Delta} &= U_R \cdot I_{Rr}^{\Delta*} = U \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Sa} - I_{Ta}) \\ Q_S^s &= U_S \cdot I_{Sr} & Q_S^{\Delta} &= U_S \cdot I_{Sr}^{\Delta*} = U \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Ta} - I_{Ra}) \\ Q_T^s &= U_T \cdot I_{Tr} & Q_T^{\Delta} &= U_T \cdot I_{Tr}^{\Delta*} = U \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Ra} - I_{Sa}) \end{aligned} \quad (4.96)$$

$$\begin{aligned} Q_R^y &= U_R \cdot I_{Rr}^{y*} = U \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Ta} - I_{Sa}) - I_{Rr} \right] \\ Q_S^y &= U_S \cdot I_{Sr}^{y*} = U \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Ra} - I_{Ta}) - I_{Sr} \right] \\ Q_T^y &= U_T \cdot I_{Tr}^{y*} = U \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{Sa} - I_{Ra}) - I_{Tr} \right] \end{aligned} \quad (4.97)$$

$$\begin{aligned} Q_R^c &= Q_R^s + Q_R^{\Delta} + Q_R^y = 0 & Q_R^{\Delta} + Q_R^y &= -Q_R^s \\ Q_S^c &= Q_S^s + Q_S^{\Delta} + Q_S^y = 0 & Q_S^{\Delta} + Q_S^y &= -Q_S^s \\ Q_T^c &= Q_T^s + Q_T^{\Delta} + Q_T^y = 0 & Q_T^{\Delta} + Q_T^y &= -Q_T^s \end{aligned} \quad (4.98)$$

Se constată încă o dată compensarea totală a puterii reactive. Pe fiecare fază cele două compensatoare produc împreună circulația unui curent reactiv, egal și de semn contrar curentului reactiv al sarcinii (4.98). Se mai observă că:

$$\sum_{f=R,S,T} Q_f^A = 0 \quad (4.99)$$

Deci compensatorul Δ pe unele faze absoarbe reactiv iar pe altele debitează reactiv, însă pe ansamblul celor trei faze el nu afectează circulația de reactiv. Se poate deci afirma că acest compensator realizează și o redistribuire a puterii reactive între cele trei faze.

Se mai observă că:

$$\sum_{f=R,S,T} Q_f^j = - \sum_{f=R,S,T} Q_f^s \quad (4.100)$$

De fapt, compensatorul Y este cel care realizează efectiv compensarea puterii reactive a sarcinii.

Criteriul c3-2 (pierderi minime de putere activă în compensatoare)

Folosind soluțiile sistemului (4.36) rezolvat în condiția (4.42), date de relațiile (4.50), se obțin :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{\Delta*} &= \frac{1}{3}(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) + j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) + \frac{1}{4}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_S^{\Delta*} &= \frac{1}{3}(I_{Ra} - 2I_{Sa} + I_{Ta}) + j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) + \frac{1}{4}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_T^{\Delta*} &= \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} - 2I_{Ta}) + j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) + \frac{1}{4}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_R^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ta}) - \frac{1}{4}(-3I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_S^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Ra}) - \frac{1}{4}(I_{Rr} - 3I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_T^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Sa}) - \frac{1}{4}(I_{Rr} + I_{Sr} - 3I_{Tr})\right] \end{aligned} \quad (4.101)$$

Criteriul c3-3 (puterea reactivă instalată pentru compensare, minimă)

Folosind soluțiile sistemului (4.36) rezolvat în condiția (4.53), date de relațiile (4.57), se obțin :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{A*} &= \frac{1}{3}(-2I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) + j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Sa}) + \frac{1}{6}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_S^{A*} &= \frac{1}{3}(I_{Ra} - 2I_{Sa} + I_{Ta}) + j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Ta}) + \frac{1}{6}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_T^{A*} &= \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} - 2I_{Ta}) + j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ra}) + \frac{1}{6}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})\right] \end{aligned} \quad (4.102)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Sa} - I_{Ta}) + \frac{1}{6}(5I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_S^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ta} - I_{Ra}) + \frac{1}{6}(-I_{Rr} + 5I_{Sr} - I_{Tr})\right] \\ \underline{I}_T^{Y*} &= j\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(I_{Ra} - I_{Sa}) + \frac{1}{6}(-I_{Rr} - I_{Sr} + 5I_{Tr})\right] \end{aligned} \quad (4.103)$$

Se constată că intervenția asupra circulației de putere activă pe fiecare fază este identică în cazul compensatoarelor dimensionate după criteriile c3-1, c3-2 și c3-3. Relațiile (4.87), (4.93), (4.95) rămân valabile.

În ceea ce privește circulația puterilor reactive, modul de intervenție al compensatoarelor pe fiecare fază este diferit de la un criteriu la altul. Rămân valabile însă relațiile (4.98).

4.8. Curenții de compensare exprimați cu ajutorul componentelor curenților de secvență ai sarcinii

Exprimarea curenților de compensare în funcție de componentele simetrice ale curenților de sarcină permite o interpretare completă a mecanismului compensării puterii reactive și simetrizării sarcinii.

Pentru aceasta se scriu mai întâi ecuațiile ce exprimă circulația de curenți armonici în interiorul ansamblului consumator-compensator, pentru cele trei componente simetrice :

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^c &= \underline{I}_d^s + \underline{I}_d^{\Delta} + \underline{I}_d^Y \\ \underline{I}_i^c &= \underline{I}_i^s + \underline{I}_i^{\Delta} + \underline{I}_i^Y \\ \underline{I}_h^c &= \underline{I}_h^s + \underline{I}_h^{\Delta} + \underline{I}_h^Y \end{aligned} \quad (4.104)$$

Punând acum condițiile de simetrizare și de compensare totală, deci cele de la criteriul c3 de dimensionare:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{Im}(\underline{I}_d^c) = 0 \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^c) = 0 \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_i^c) = 0 \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_h^c) = 0 \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_h^c) = 0 \end{array} \right. \quad (4.105) \quad \text{rezultă :} \quad \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) = -\operatorname{Im}(\underline{I}_d^{\Delta}) - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^Y) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) = -\operatorname{Re}(\underline{I}_i^{\Delta}) - \operatorname{Re}(\underline{I}_i^Y) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) = -\operatorname{Im}(\underline{I}_i^{\Delta}) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^Y) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) = -\operatorname{Re}(\underline{I}_h^{\Delta}) - \operatorname{Re}(\underline{I}_h^Y) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) = -\operatorname{Im}(\underline{I}_h^{\Delta}) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^Y) \end{array} \right. \quad (4.106)$$

Exprimând componentele de secvență ale curenților de compensare în funcție de curenții de compensare se obține sistemul de ecuații:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A) + \frac{1}{3}(I_R^Y + I_S^Y + I_T^Y) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) = \frac{1}{2}(I_{TR}^A - I_{RS}^A) + \frac{1}{2\sqrt{3}}(I_T^Y - I_S^Y) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) = \frac{1}{2\sqrt{3}}(I_{RS}^A - 2I_{ST}^A + I_{TR}^A) + \frac{1}{6}(2I_R^Y - I_S^Y - I_T^Y) \\ \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) = \frac{1}{2\sqrt{3}}(I_S^Y - I_T^Y) \\ \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) = \frac{1}{6}(2I_R^Y - I_S^Y - I_T^Y) \end{array} \right. \quad (4.107)$$

Acest sistem de cinci ecuații cu șase necunoscute (curenții de compensare) nu poate fi rezolvat decât în condițiile considerării unei relații de legătură suplimentare între necunoscute, independentă de cele cinci. Aceasta poate fi una dintre cele folosite deja la criteriul c3. Deoarece am considerat cel mai semnificativ pentru explicarea mecanismului compensării criteriul c3-1, în cadrul acestui paragraf se va face referire numai la această situație, celelalte criterii necesitând o abordare similară.

Deci condiția suplimentară folosită va fi :

$$I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0 \quad (4.108)$$

(adică compensatorul Δ nu intervine decât în circulația curenților de secvență inversă)

Rezolvarea sistemului astfel format conduce la următoarele soluții :

$$\begin{aligned} I_{RS}^A &= -\operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_i^s) - \operatorname{Re}(I_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_h^s) \\ I_{ST}^A &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_i^s) + \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_h^s) \\ I_{TR}^A &= \operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_i^s) + \operatorname{Re}(I_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_h^s) \end{aligned} \quad (4.109)$$

$$\begin{aligned} I_R^Y &= \operatorname{Im}(I_d^s) + 2 \operatorname{Im}(I_h^s) \\ I_S^Y &= \operatorname{Im}(I_d^s) + \sqrt{3} \operatorname{Re}(I_h^s) - \operatorname{Im}(I_h^s) \\ I_T^Y &= \operatorname{Im}(I_d^s) - \sqrt{3} \operatorname{Re}(I_h^s) - \operatorname{Im}(I_h^s) \end{aligned} \quad (4.110)$$

4.9. Circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator calculată cu ajutorul componentelor simetrice

Faza R

Folosind relațiile (A6.23) pe faza R a compensatorului Δ curentul este:

$$I_R^A = \frac{1}{2}(I_{RS}^A - I_{TR}^A) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(-I_{RS}^A - I_{TR}^A) \quad (4.111)$$

Ținând cont de relațiile (4.109) rezultă :

$$I_R^A = -\operatorname{Re}(I_i^s) - \operatorname{Re}(I_h^s) + j[-\operatorname{Im}(I_i^s) + \operatorname{Im}(I_h^s)] \quad (4.112)$$

Pe faza R a compensatorului Y, din relațiile (A6.23) și (4.110) se obține:

$$I_R^Y = -j \cdot I_R^Y = -j[\operatorname{Im}(I_d^s) + 2 \operatorname{Im}(I_h^s)] \quad (4.113)$$

Pe faza R a sarcinii :

$$I_R^s = I_h^s + I_d^s + I_i^s = \operatorname{Re}(I_d^s) + \operatorname{Re}(I_i^s) + \operatorname{Re}(I_h^s) + j[\operatorname{Im}(I_d^s) + \operatorname{Im}(I_i^s) + \operatorname{Im}(I_h^s)] \quad (4.114)$$

Deci curentul absorbit pe faza R de către ansamblul consumator-compensator este :

$$I_R^c = I_R^s + I_R^A + I_R^Y = \operatorname{Re}(I_d^s) \quad (4.115)$$

Faza S

Procedând similar, avem:

$$I_S^A = -\frac{1}{2}(I_{RS}^A + 2I_{ST}^A) + j \frac{\sqrt{3}}{2} I_{RS}^A \quad (4.116)$$

Rezultă:

$$\begin{aligned} I_S^A &= \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{Re}(I_i^s) + \operatorname{Re}(I_h^s) + \sqrt{3} [\operatorname{Im}(I_i^s) - \operatorname{Im}(I_h^s)] \right\} + \\ &\quad + j \frac{1}{2} \left\{ -\sqrt{3} [\operatorname{Re}(I_i^s) + \operatorname{Re}(I_h^s)] + \operatorname{Im}(I_i^s) - \operatorname{Im}(I_h^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.117)$$

sau:

$$\underline{I}_S^A = -a \cdot \underline{I}_i^s + a \cdot \underline{I}_h^s - 2a \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \quad (4.118)$$

Apoi,

$$\begin{aligned} \underline{I}_S^Y = a^2 \cdot (-j \cdot \underline{I}_S^Y) = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \right] - 3 \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] \end{aligned} \quad (4.119)$$

sau :

$$\underline{I}_S^Y = -a^2 \cdot j \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + a^2 \cdot \underline{I}_h^s + 2a \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \quad (4.120)$$

Iar

$$\begin{aligned} \underline{I}_S^s = \underline{I}_h^s + a^2 \cdot \underline{I}_d^s + a \cdot \underline{I}_i^s = \frac{1}{2} \left\{ 2 \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right] \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[-\operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) \right] + 2 \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.121)$$

Curentul absorbit pe faza S de către ansamblul consumator-compensator este :

$$\underline{I}_S^c = \underline{I}_S^s + \underline{I}_S^A + \underline{I}_S^Y = -\frac{1}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) = a^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) \quad (4.122)$$

Componentele active și reactive ale curenților de pe faza S, exprimate cu ajutorul componentelor active și reactive ale curenților de secvență de referință (corespunzătoare fazei R), se obțin prin aducerea curenților $\underline{I}_S^A, \underline{I}_S^Y, \underline{I}_S^s$ în planul complex raportat la faza S.

$$\begin{aligned} \underline{I}_S^{A*} = a \cdot \underline{I}_S^A = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right] \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[\operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] + \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.123)$$

$$\underline{I}_S^{Y*} = a \cdot \underline{I}_S^Y = -j \cdot \underline{I}_S^Y = j \cdot \left[-\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] \quad (4.124)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_S^{s*} = a \cdot \underline{I}_S^s = \frac{1}{2} \left\{ 2 \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \right\} + \\ + j \cdot \frac{1}{2} \left\{ 2 \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[-\operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.125)$$

Se obține:

$$\underline{I}_S^{c*} = \underline{I}_S^{s*} + \underline{I}_S^{A*} + \underline{I}_S^{Y*} = \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) \quad (4.126)$$

Faza T

$$\underline{I}_T^A = \frac{1}{2} (I_{TR}^A + 2I_{ST}^A) + j \frac{\sqrt{3}}{2} I_{TR}^A \quad (4.127)$$

devine:

$$\begin{aligned} \underline{I}_T^A = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right] \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[\operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] + \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.128)$$

Sau:

$$\underline{I}_T^A = -a^2 \cdot \underline{I}_i^s + a^2 \cdot \underline{I}_h^s - 2a^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \quad (4.129)$$

Apoi,

$$\begin{aligned} \underline{I}_T^Y = a \cdot (-j \cdot I_T^Y) = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right] - 3 \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.130)$$

Sau:

$$\underline{I}_T^Y = -a \cdot j \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + a \cdot \underline{I}_h^s + 2a^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \quad (4.131)$$

Curentul absorbit de sarcină pe faza T este:

$$\begin{aligned} \underline{I}_T^s = \underline{I}_h^s + a \cdot \underline{I}_d^s + a^2 \cdot \underline{I}_i^s = \frac{1}{2} \left\{ -\operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + 2 \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) \right] \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[\operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) \right] - \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) + 2 \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.132)$$

Curentul obținut pe faza T după compensare va fi:

$$\underline{I}_T^c = \underline{I}_T^s + \underline{I}_T^A + \underline{I}_T^Y = -\frac{1}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) = a \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) \quad (4.133)$$

Pentru a determina componentele active și reactive ale curenților pe faza T (raportate la tensiunea fazei T), se înmulțesc $\underline{I}_T^A, \underline{I}_T^Y, \underline{I}_T^s$, (care sunt raportate la tensiunea fazei R), cu a^2 :

$$\begin{aligned} \underline{I}_T^{A*} = a^2 \cdot \underline{I}_T^A = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) + \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} \left[-\operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right\} \end{aligned} \quad (4.134)$$

$$\underline{I}_T^{Y*} = a^2 \underline{I}_T^Y = -j \cdot \underline{I}_T^Y = j \cdot \left[-\operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) + \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] \quad (4.135)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_T^{s*} = a^2 \cdot \underline{I}_T^s = \frac{1}{2} \left\{ 2 \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) \right] \right\} + \\ + j \frac{1}{2} \left\{ 2 \operatorname{Im}(\underline{I}_d^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + \sqrt{3} \left[\operatorname{Re}(\underline{I}_i^s) - \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.136)$$

Se obține:

$$\underline{I}_T^{c*} = \underline{I}_T^{s*} + \underline{I}_T^{A*} + \underline{I}_T^{Y*} = a^2 \cdot \underline{I}_T^c = a^2 \cdot a \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) = \operatorname{Re}(\underline{I}_d^s) \quad (4.137) \quad !$$

Se constată aceleași elemente:

- * compensatorul Y nu intervine decât asupra circulației de putere reactivă ;
- * compensatorul Δ modifică pe fiecare fază circulația atât a puterii active cât și a celei reactive (pe unele faze absoarbe iar pe celelalte debitează) realizând o redistribuire a acestora între faze. El nu modifică însă bilanțul puterilor pe ansamblul celor trei faze, deoarece:

$$\sum_{f=R,S,T} \operatorname{Re}(\underline{I}_f^A) = 0 \quad \text{și} \quad \sum_{f=R,S,T} \operatorname{Im}(\underline{I}_f^A) = 0 \quad (4.138)$$

- * în urma compensării, curenții pe cele trei faze se constituie într-un sistem trifazat simetric și echilibrat, în fază cu tensiunile fazelor respective, având aceeași valoare, egală cu componenta activă a curentului de secvență directă a sarcinii.

Se observă, așa cum era de așteptat de altfel, că compensatorul Δ produce un sistem trifazat de curenți de secvență inversă:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{\Delta} &= -\underline{I}_i^s + j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) - \text{Re}(\underline{I}_h^s) \\
\underline{I}_S^{\Delta} &= a \cdot \left[-\underline{I}_i^s + j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) - \text{Re}(\underline{I}_h^s) \right] \\
\underline{I}_R^{\Delta} &= a^2 \cdot \left[-\underline{I}_i^s + j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) - \text{Re}(\underline{I}_h^s) \right]
\end{aligned} \tag{4.139}$$

Cu câteva artificii, curenții pe fazele compensatorului Y se pot scrie sub forma:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^Y &= -j \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) \quad - j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) + \text{Re}(\underline{I}_h^s) \quad - \text{Re}(\underline{I}_h^s) - j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) \\
\underline{I}_S^Y &= -a^2 \cdot j \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) - a \cdot \left[j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) - \text{Re}(\underline{I}_h^s) \right] - \text{Re}(\underline{I}_h^s) - j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) \\
\underline{I}_T^Y &= -a \cdot j \cdot \text{Im}(\underline{I}_d^s) \quad - a^2 \left[j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s) - \text{Re}(\underline{I}_h^s) \right] - \text{Re}(\underline{I}_h^s) - j \cdot \text{Im}(\underline{I}_h^s)
\end{aligned} \tag{4.140}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{Y_d} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{Y_i} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{Y_h}$

Se observă existența a trei componente în conținutul fiecărui curent de fază, ce se constituie în trei sisteme trifazate de curenți, fictive:

- ◇ unul de secvență directă, Y_d , care anulează componenta imaginară a curentului de secvență directă al sarcinii;
- ◇ unul de secvență inversă, Y_i , care, împreună cu cel dat de compensatorul Δ , anulează curentul de secvență inversă al sarcinii;
- ◇ unul de secvență homopolară, Y_h , care anulează curentul de secvență homopolară al sarcinii.

Se observă de asemenea că curentul pe conductorul neutru al compensatorului Y compensează curentul de pe conductorul neutru al sarcinii, deoarece:

$$\underline{I}_R^Y + \underline{I}_S^Y + \underline{I}_T^Y = -3\underline{I}_h^s \tag{4.141}$$

4.10. Susceptanțele de compensare exprimate în funcție de componentele de secvență ale curenților de sarcină

Pe baza relațiilor (4.109) și (4.110), prin împărțire în ambele părți ale egalităților cu $\sqrt{3}U$ respectiv cu U , se pot stabili relațiile pentru calculul celor șase susceptanțe de compensare, exprimate în funcție de componentele active și reactive ale curenților de secvență (valabile pentru criteriul c3-1):

$$\begin{aligned}
B_{RS}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[-\text{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}(\underline{I}_i^s) - \text{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \\
B_{ST}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[-\frac{2}{\sqrt{3}} \text{Im}(\underline{I}_i^s) + \frac{2}{\sqrt{3}} \text{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \\
B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\text{Re}(\underline{I}_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}(\underline{I}_i^s) + \text{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}(\underline{I}_h^s) \right]
\end{aligned} \tag{4.142}$$

$$\begin{aligned}
B_R^Y &= \frac{1}{U} \left[\text{Im}(\underline{I}_d^s) + 2 \text{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \\
B_S^Y &= \frac{1}{U} \left[\text{Im}(\underline{I}_d^s) + \sqrt{3} \text{Re}(\underline{I}_h^s) - \text{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \\
B_T^Y &= \frac{1}{U} \left[\text{Im}(\underline{I}_d^s) - \sqrt{3} \text{Re}(\underline{I}_h^s) - \text{Im}(\underline{I}_h^s) \right]
\end{aligned} \tag{4.143}$$

Deoarece circulațiile de curenți pe cele trei secvențe simetrice sunt independente, aceste susceptanțe se pot descompune astfel încât să se constituie în trei compensatoare fictive, fiecare realizând compensarea pe una dintre secvențe :

$$\begin{aligned}
 B_{RS}^{\Delta} &= B_{RS}^{\Delta i} + B_{RS}^{\Delta h} & B_R^Y &= B_R^{Yd} + B_R^{Yh} \\
 B_{ST}^{\Delta} &= B_{ST}^{\Delta i} + B_{ST}^{\Delta h} & B_S^Y &= B_S^{Yd} + B_S^{Yh} \\
 B_{TR}^{\Delta} &= B_{TR}^{\Delta i} + B_{TR}^{\Delta h} & B_T^Y &= B_T^{Yd} + B_T^{Yh}
 \end{aligned} \tag{4.144}$$

În care :

$$\begin{aligned}
 B_{RS}^{\Delta i} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[-\operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_i^s) \right] & B_{RS}^{\Delta h} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[-\operatorname{Re}(I_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_h^s) \right] \\
 B_{ST}^{\Delta i} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[-\frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_i^s) \right] & B_{ST}^{\Delta h} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_h^s) \right]
 \end{aligned} \tag{4.145}$$

$$\begin{aligned}
 B_{TR}^{\Delta i} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\operatorname{Re}(I_i^s) + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_i^s) \right] & B_{TR}^{\Delta h} &= \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\operatorname{Re}(I_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(I_h^s) \right] \\
 B_R^{Yd} &= B_S^{Yd} = B_T^{Yd} = \frac{1}{U} \operatorname{Im}(I_d^s)
 \end{aligned} \tag{4.146}$$

$$\begin{aligned}
 B_R^{Yh} &= \frac{2}{U} \operatorname{Im}(I_h^s) \\
 B_S^{Yh} &= \frac{1}{U} \left[\sqrt{3} \operatorname{Re}(I_h^s) - \operatorname{Im}(I_h^s) \right] \\
 B_T^{Yh} &= \frac{1}{U} \left[-\sqrt{3} \operatorname{Re}(I_h^s) - \operatorname{Im}(I_h^s) \right]
 \end{aligned} \tag{4.147}$$

4.11. Mecanismul compensării

Se observă că susceptanțele constituite în Δi se pot determina cu aceleași relații ca și în cazul rețelelor cu trei conductoare (relațiile 3.48). Pentru compensarea părții imaginare a secvenței directe se folosește de data aceasta un compensator în Y, simetric. Curentul de secvență homopolară este anulat de către un compensator mixt Δ -Y. Această structură mixtă este necesară deoarece trebuie anulată componenta activă a curentului de secvență homopolară, pentru care este necesară o schemă Δ și pentru ca totodată să se poată închide curenții de secvență homopolară de compensare, lucru posibil numai într-o schemă Y_0 .

În figura 4.2 se prezintă cele trei compensatoare fictive și circulația curenților de secvență în interiorul ansamblului consumator-compensator, iar în figura 4.3 diagramele fazoriale ale mecanismului compensării. În aceasta din urmă se ilustrează mai întâi cei trei curenții de fază ai sarcinii constituiți într-un sistem trifazat dezechilibrat, pe baza cărora s-au determinat curenții de secvență de referință (fig. 4.3.a). Determinarea componentelor simetrice s-a efectuat utilizând metodele grafice prezentate în ANI:XA 7. Se poate observa intervenția pe rând a compensatoarelor fictive care anulează componenta de secvență homopolară (fig.4.3.b), componenta de secvență inversă (fig.4.3.c) și componenta reactivă a curentului de secvență directă (fig.4.3.d). După compensare rămâne un sistem trifazat de curenții perfect echilibrat și având caracter pur activ (în fază cu tensiunile simple aferente). Curenții absorbiți pe faze de către compensatorul Δh se pot calcula cu ajutorul relațiilor (A6.23):

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{\Delta h} &= \frac{1}{2} \left(I_{RS}^{\Delta h} - I_{TR}^{\Delta h} \right) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \left(I_{RS}^{\Delta h} + I_{TR}^{\Delta h} \right) \\
\underline{I}_S^{\Delta h} &= -\frac{1}{2} \left(I_{RS}^{\Delta h} + 2I_{ST}^{\Delta h} \right) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} I_{RS}^{\Delta h} \\
\underline{I}_T^{\Delta h} &= \frac{1}{2} \left(I_{TR}^{\Delta h} + 2I_{ST}^{\Delta h} \right) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} I_{TR}^{\Delta h}
\end{aligned} \tag{4.148}$$

în care se vor înlocui:

$$\begin{aligned}
I_{RS}^{\Delta h} &= \sqrt{3} \cdot U \cdot B_{RS}^{\Delta h} = -\operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \\
I_{ST}^{\Delta h} &= \sqrt{3} \cdot U \cdot B_{ST}^{\Delta h} = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \\
I_{TR}^{\Delta h} &= \sqrt{3} \cdot U \cdot B_{TR}^{\Delta h} = \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s)
\end{aligned} \tag{4.149}$$

Rezultă:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{\Delta h} &= -\operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + j \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \\
\underline{I}_S^{\Delta h} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + j \cdot \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \\
\underline{I}_T^{\Delta h} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + j \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right]
\end{aligned} \tag{4.150}$$

Curenții absorbiți pe faze de către compensatorul Yh se pot calcula cu ajutorul relațiilor (A6.9):

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{Yh} &= -j \cdot I_R^{Yh} \\
\underline{I}_S^{Yh} &= -\frac{\sqrt{3}}{2} I_S^{Yh} + j \cdot I_S^{Yh} \\
\underline{I}_T^{Yh} &= \frac{\sqrt{3}}{2} I_T^{Yh} + j \cdot \frac{1}{2} I_T^{Yh}
\end{aligned} \tag{4.151}$$

în care se vor înlocui:

$$\begin{aligned}
I_R^{Yh} &= U \cdot B_R^{Yh} = 2 \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \\
I_S^{Yh} &= U \cdot B_S^{Yh} = \sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \\
I_T^{Yh} &= U \cdot B_T^{Yh} = -\sqrt{3} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s)
\end{aligned} \tag{4.152}$$

Rezultă:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{Yh} &= -j \cdot 2 \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \\
\underline{I}_S^{Yh} &= -\frac{3}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + j \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right] \\
\underline{I}_T^{Yh} &= -\frac{3}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) + j \cdot \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\underline{I}_h^s) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\underline{I}_h^s) \right]
\end{aligned} \tag{4.153}$$

Curenții absorbiți pe fază de către compensatorul pentru componenta de secvență homopolară a curentului de sarcină sunt sumele curenților corespunzători celor două compensatoare fictive Δh și Yh . Se vede ușor că:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^h &= \underline{I}_R^{\Delta h} + \underline{I}_R^{Yh} = -\underline{I}_h^s \\
\underline{I}_S^h &= \underline{I}_S^{\Delta h} + \underline{I}_S^{Yh} = -\underline{I}_h^s \\
\underline{I}_T^h &= \underline{I}_T^{\Delta h} + \underline{I}_T^{Yh} = -\underline{I}_h^s
\end{aligned} \tag{4.154}$$

Curentul pe conductorul neutru al compensatorului Y_n este:

$$\underline{I}_N^{yh} = \underline{I}_R^{yh} + \underline{I}_S^{yh} + \underline{I}_T^{yh} = -3 \cdot \underline{I}_h^s = \underline{I}_R^h + \underline{I}_S^h + \underline{I}_T^h \quad (4.155)$$

Este evident că în practică nu sunt necesare patru compensatoare distincte, ci doar două. Totuși această descompunere poate fi utilă în cazul în care se urmărește compensarea unuia sau altuia dintre componentele simetrice ale curenților de sarcină.

4.12. Aplicație numerică

O aplicație numerică având la bază modelul matematic prezentat în acest capitol este indispensabilă pentru evaluarea cantitativă completă a acestuia și pentru o comparație între diversele criterii de compensare în funcție de structura și gradele de dezechilibru ale sarcinii.

Pentru aceasta s-a întocmit un program în BP care calculează circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator și determină, pentru diverse combinații de curenți pe fazele sarcinii, următoarele:

1° - valorile efective pentru:

- componentele reactive ale curenților pe fazele compensatorului $Y : I_R^Y, I_S^Y, I_T^Y$
- componentele reactive ale curenților pe laturile compensatorului $\Delta : I_{RS}^A, I_{ST}^A, I_{TR}^A$
- componentele active ale curenților pe fazele compensatorului $\Delta : I_{Ra}^A, I_{Sa}^A, I_{Ta}^A$
- componentele reactive ale curenților pe fazele compensatorului $\Delta : I_{Rr}^A, I_{Sr}^A, I_{Tr}^A$
- curenții pe fazele compensatorului $\Delta : I_R^A, I_S^A, I_T^A$
- curenții de secvență directă, inversă și homopolară corespunzători curenților pe fazele ansamblului consumator-compensator: I_d^c, I_i^c, I_h^c

2° - valorile procentuale ale coeficienților de disimetrie respectiv de asimetrie pentru curenții pe fazele ansamblului:

$$k_{mi} = \frac{I_i^c}{I_d^c} \cdot 100 [\%] \quad , \quad k_{mh} = \frac{I_h^c}{I_d^c} \cdot 100 [\%] \quad (4.156)$$

3° - valoarea factorului de putere de nesimetrie global, care în rețelele trifazate cu patru conductoare are expresia:

$$k_{pm} = \frac{1}{\sqrt{1 + k_{mi}^2 + k_{mh}^2 \left(1 + 3 \frac{r_N}{r}\right)}} = \frac{I_d^c}{\sqrt{I_d^{c2} + I_i^{c2} + I_h^{c2} \left(1 + 3 \frac{r_N}{r}\right)}} \quad (4.157)$$

în care r, r_N sunt rezistențele electrice ale conductoarelor de fază respectiv a conductorului neutru.

4° valoarea factorului de putere pe secvența directă pentru ansamblul consumator-compensator: $\cos \varphi_d$

5° valoarea factorului de putere în regim dezechilibrat: $k_p = k_{pm} \cdot \cos \varphi_d$ (4.158)

6° valoarea totală a pierderilor longitudinale de putere activă într-o presupusă linie electrică ce alimentează ansamblul consumator-compensator, având $r = r_N = 0,025 \Omega$

7° valorile puterilor reactive capacitive și inductive instalate în cele două compensatoare:

$$\sum Q_C \quad \text{și} \quad \sum Q_L$$

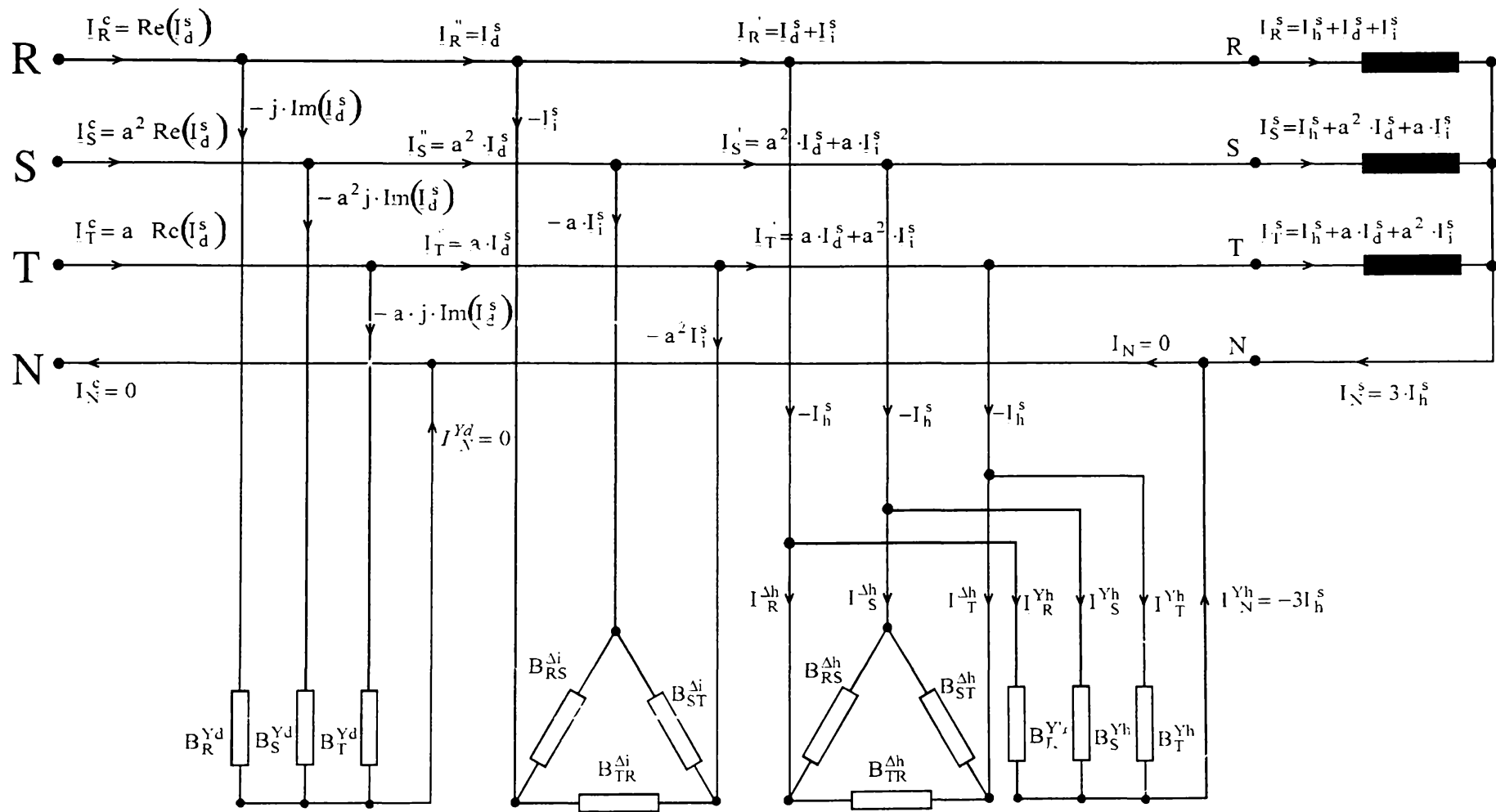


Fig. 4.2. Descompunerea compensatorului în patru compensatoare fictive (Δh , Y_h , Δi , Y_d) și mecanismul compensării ilustrate cu ajutorul componentelor simetrice.

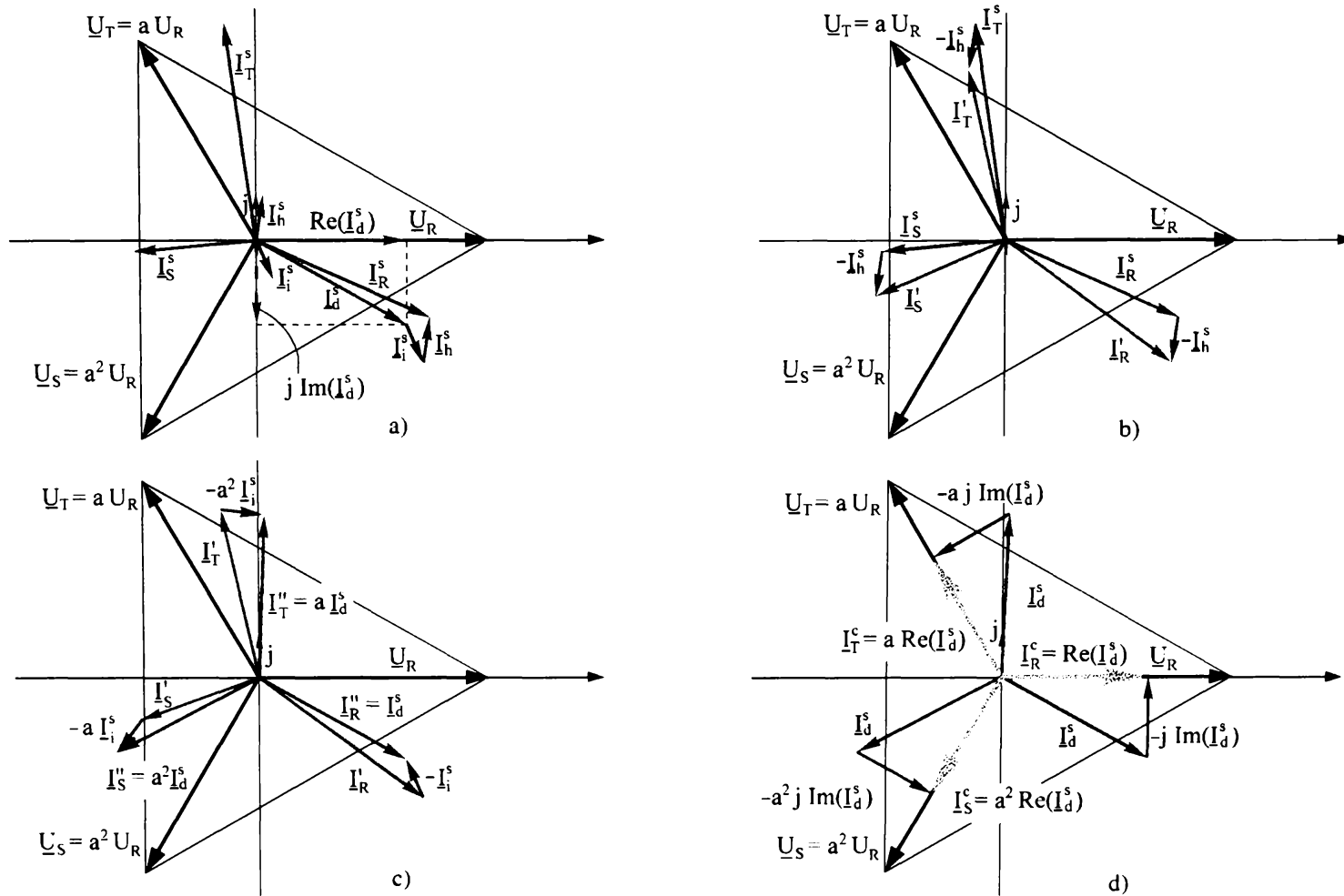


Fig. 4.3. Diagramele fazoriale ce ilustrează mecanismul compensării prin intermediul componentelor simetrice
 a) curenții de sarcină pe faze și determinarea componentelor simetrice de referință ;
 b) compensarea lui \underline{I}_h^s ; c) compensarea lui \underline{I}_i^s ; d) compensarea lui $\text{Im}(\underline{I}_d^s)$.

S-au studiat mai multe variante ale unei sarcini trifazate, conectate la tensiunea nominală de 380/220 V. Este cazul, foarte frecvent întâlnit de altfel, al unei sarcini echivalente conectate în secundarul unui transformator de MT/JT care cuprinde o multitudine de receptori simetrici și asimetrici.

S-au pus alături, pentru a facilita o analiză comparativă, rezultatele aplicării a trei criterii de compensare dezvoltate în acest capitol:

a - compensarea numai a puterii reactive pe secvența directă (integral) fără echilibrarea sarcinii. În această situație a fost necesar un singur compensator, considerat cel în conexiune Y și a cărui dimensionare s-a făcut folosind două condiții suplimentare:

a1 - compensare simetrică

a2 - minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare

b - echilibrarea sarcinii pe cele trei faze ale rețelei, fără a se urmări în mod special îmbunătățirea factorului de putere. Sunt necesare ambele compensatoare. Pentru dimensionarea lor s-au folosit două condiții suplimentare:

$$b1 \quad I_R^Y = 0$$

$$b2 \quad I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0$$

c - compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă și micșorarea nesimetriei, constând în:

c1 - anularea numai a componentei homopolare a curenților rezultanți ;

c2 - anularea numai a componentei inverse a curenților rezultanți ;

c3 - anularea atât a componentei de secvență homopolară, cât și a celei de secvență inversă din curenții de pe fazele ansamblului consumator-compensator.

Pentru dimensionarea compensatorului conform acestui criteriu, a fost necesară o condiție suplimentară:

c3-1 $I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0$ - compensatorul Δ să intervină numai asupra curenților de secvență inversă;

c3-2 - minimizarea pierderilor de putere reactivă în admitanțele compensatoarelor;

c3-3 - minimizarea puterilor reactive instalate în compensatoare.

Rezultatele complete ale calculelor se găsesc în ANEXA 9.

Se prezintă în continuare câteva observații rezultate dintr-o analiză comparativă a lor.

- În majoritatea cazurilor studiate, indiferent de criteriul de compensare, gradul de nesimetrie a sarcinii sau factorul de putere, puterea reactivă instalată în compensatoare este preponderent capacitivă.

De altfel puterea reactivă inductivă este necesară numai la criteriile care realizează simetrizarea totală a sarcinii.

În cazul sarcinilor dezechilibrate pur active, (fișierele 4c01.tde, 4c14.tde, 4c15.tde), puterile reactive capacitive și inductive instalate în compensatoare sunt egale, indiferent de criterii și de mărimea dezechilibrului.

- Comparând rezultatele aplicării criteriilor **a1** și **a2** se poate observa că acesta din urmă este mai avantajos deoarece, *la aceeași putere reactivă instalată în compensator*, conduce la o scădere considerabilă a pierderilor de putere activă în rețeaua de alimentare. De fapt criteriul **a2** a constatat tocmai în minimizarea pierderilor în rețea în condițiile folosirii unui singur compensator (Y) și compensării doar pe secvența directă.

Pierderile sunt însă minime atunci când sunt anulate și componentele de secvență inversă și homopolară din curenții de pe fazele de alimentare (criteriul **c**).

- Deși criteriul **b** a urmărit numai echilibrarea sarcinii, s-a obținut și o compensare într-o măsură considerabilă a puterii reactive pe secvența directă. S-au micșorat prin urmare foarte mult și pierderile de putere activă în rețeaua de alimentare. Aceasta însă cu o utilizare irațională a puterii reactive instalate în compensatoare, ale cărei valori sunt printre cele mai mari comparativ cu celelalte criterii.

- Dimensionarea compensatoarelor Δ în cazurile **b** și **c3-1** este identică și suma algebrică a puterilor reactive instalate în acestea este nulă, deoarece s-a folosit condiția $I_{RS}^A + I_{ST}^A + I_{TR}^A = 0$.

Curenții pe fazele compensatoarelor Δ astfel dimensionate se constituie într-un sistem de curenți perfect echilibrat (de secvență inversă), conform modelului matematic.

Puterile active, respectiv reactive absorbite pe unele faze sunt egale și de sens contrar cu puterile active, respectiv reactive debitate pe celelalte faze ale compensatorului.

- De fiecare dată când sunt folosite (criteriile **b** și **c3**), compensatoarele Δ realizează echilibrarea sarcinii active pe cele trei faze. Pe fiecare fază ele absorb sau debitează putere activă de o valoare egală cu diferența între puterea activă a sarcinii pe faza respectivă și media celor trei puteri active pe faze (egală cu puterea activă pe secvența directă).

- Criteriile **c1** și respectiv **c2** deși reduc pierderile de putere suficient de mult, în principal prin compensarea componentei reactive a curentului de secvență directă dar și prin anularea curentului de secvență homopolară respectiv inversă, accentuează nesimetria față de situația inițială. Deși s-ar părea că cele două criterii sunt oarecum echivalente, este evident că criteriul **c1** este mai avantajos întrucât anulează curentul homopolar iar rezistența conductorului neutru este de obicei mai mare decât cea a conductoarelor de fază.

- Criteriile **a1**, **a2**, **c1** și **c2** folosesc doar compensatorul Y. Deși sunt dimensionate diferit, ele conduc la aceeași valoare a puterii reactive instalate, care de fiecare dată este capacitivă. Deoarece criteriul **a2** conduce la pierderi minime de putere activă în rețeaua de alimentare, dintre cele patru el va fi cel preferat.

- Criteriile **c3-1**, **c3-2**, **c3-3** conduc la același rezultat: compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă și simetrizarea totală a sarcinii. Deși criteriul **c3-1** este mai interesant prin faptul că compensatorul Δ intervine cu un sistem de curenți de secvență inversă, din punct de vedere economic este preferat criteriul **c3-3** (sau uneori **c3-2**), care conduce la o putere reactivă minimă instalată în compensatoare.

- Este interesant de remarcat faptul că suma algebrică a puterilor reactive instalate în compensatoare dimensionate conform criteriului **c3-3**, este egală, fără excepție cu puterea reactivă rezultată prin aplicarea criteriilor **a1**, **a2**, **c1**, **c2**.

Capitolul 5

DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

5.1. Introducere

Acest capitol își propune să valideze, pe baza unei serii de experimente efectuate în laboratorul de rețele electrice al Facultății de Electrotehnică din Timișoara, modelul matematic aferent compensării puterii reactive în rețele electrice trifazate dezechilibrate, cu trei respectiv patru conductoare, în regim permanent sinusoidal, dezvoltat în capitolele 3 respectiv 4 ale prezentei lucrări.

Mai precis este vorba despre validarea criteriilor de compensare notate cu **a** respectiv **c3-1**, care urmărește echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei simultan cu compensarea integrală a puterii reactive absorbite de către un consumator echivalent dezechilibrat, urmând astfel să fie validate implicit și celelalte criterii.

Experimentele au fost elaborate gradual, de la simplu spre complex. Astfel, primele trei experimente se referă la rețelele cu trei conductoare. Primele două experimente folosesc o sarcină trifazată dezechilibrată care are în componență numai elemente echivalente rezistive. A fost făcută mai întâi compensarea cu ajutorul unui compensator ce conține susceptanțe fixe, dimensionate cu relațiile stabilite în modelul matematic și apoi prin intermediul unui compensator cu susceptanțe variabile realizate cu dispozitive de comutație statică.

De altfel, acest tip de compensator, modul său de realizare și funcționare, este prezentat în ANEXA 10. Aceasta pentru că, echilibrarea sarcinii cu ajutorul unor susceptanțe variabile este destinată unei aplicații on-line, aplicație care, în condițiile actuale ale creșterii performanțelor electronicii de putere, automatizării și informaticii în ceea ce privește viteza de execuție a comutației sau calculului, fiabilitatea, posibilitatea conducerii unor procese complexe cu echipamente inteligente (ce folosesc microcontrolere, microprocesoare), începe să aibă o extindere tot mai amplă.

Al treilea experiment urmărește validarea modelului matematic în condițiile criteriului amintit, prin considerarea unei sarcini trifazate dezechilibrate în structură echivalentă mixtă R-L, evasi-general întâlnită în componența rețelelor electrice de distribuție. În acest caz s-a folosit direct compensatorul Δ cu susceptanțe variabile.

Experimentul nr. 4 abordează rețeaua trifazată cu patru conductoare la care este racordat un consumator trifazat dezechilibrat, de asemenea în structură echivalentă mixtă R-L. De data aceasta, apariția componentei homopolare a curenților de sarcină face necesară utilizarea a două compensatoare, unul în conexiune Δ și altul în conexiune Y_0 . Și în acest experiment au fost utilizate direct compensatoarele cu susceptanțe variabile.

Concluziile acestui capitol arată că deși modelul matematic este elaborat în condițiile neglijării unor aspecte reale, aplicarea sa, eventual chiar în softul unui regulator automat al puterii reactive, conduce la rezultatul dorit, cu efecte benefice asupra rețelelor electrice de distribuție.

5.2. Experimentul nr.1 : Compensarea într-o rețea trifazată cu trei conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură pur rezistivă, folosind un compensator cu susceptanțe fixe.

Primul experiment efectuat urmărește atât confirmarea posibilității echilibrării unei sarcini trifazate dezechilibrate fără conductor neutru cu ajutorul unui compensator care conține numai susceptanțe, el însuși dezechilibrat, cât și verificarea relațiilor de calcul deduse în modelul matematic prezentat în capitolul 3. Așa cum s-a precizat deja, ca și pentru celelalte experimente de altfel, s-a vizat un regim permanent normal de funcționare în care s-a aplicat pentru compensare *criteriul a*.

Am început cu alcătuirea sarcinii dezechilibrate care, având o schemă trifazată în conexiune Δ , în acest prim caz conține numai rezistoare.

Etapa a doua a fost determinarea parametrilor echivalenței ai sarcinii în condițiile concrete de funcționare ale rețelei, pe baza cărora urmează să se calculeze și să se dimensioneze compensatorul.

Obs. Din motive de asigurare a condițiilor optime de funcționare pentru dispozitivele de comutație statică folosite la realizarea susceptanțelor variabile din experimentele următoare (motive explicate în ANEXA 10.), tensiunile nominale ale modelului de rețea au fost : 220 V valoarea efectivă a tensiunii între faze, respectiv 127 V ($200 \cdot \sqrt{3}$) valoarea efectivă a tensiunii de fază.

Folosind metoda voltampermetrică (în care s-au neglijat erorile sistematice), s-au determinat admitanțele (în cazul de față conductanțele) echivalente ale sarcinii. Alimentând cu un sistem trifazat considerat simetric de tensiuni de linie, cu valorile efective :

$$U_{RS} = 218 V$$

$$U_{ST} = 220 V \quad \text{pe laturile schemei în } \Delta \text{ a sarcinii se obțin curenții :}$$

$$U_{TR} = 220 V$$

$$I_{RS}^s = 0,395 A$$

$$I_{ST}^s = 2,115 A$$

$$I_{TR}^s = 3,75 A \quad \text{care corespund următoarelor conductanțe între faze :}$$

$$G_{RS}^s = 0,001789 S$$

$$G_{ST}^s = 0,0096136 S$$

$$G_{TR}^s = 0,0170454 S,$$

susceptanțele echivalente B_{RS}^s , B_{ST}^s și B_{TR}^s fiind evident nule .

Cunoscând elementele schemei echivalente a sarcinii, se pot acum calcula susceptanțele necesare pentru compensatorul trifazat în conexiune Δ , conform relațiilor (3.20) care devin :

$$\begin{aligned} B_{RS}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{ST}^s - G_{TR}^s) \\ B_{ST}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{TR}^s - G_{RS}^s) \\ B_{TR}^{\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (G_{RS}^s - G_{ST}^s) \end{aligned} \quad (5.1)$$

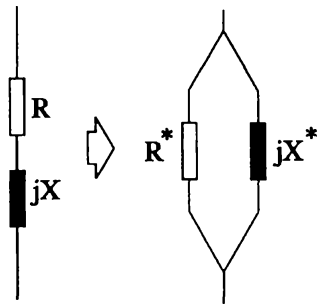
Dintr-un calcul preliminar se obține $B_{ST}^{\wedge} > 0$ deci inductiv și B_{RS}^{\wedge} , $B_{TR}^{\wedge} < 0$ capacitivi.

Se calculează mai întâi susceptanța inductivă, respectiv reactanța inductivă a bobinei ce trebuie montată între fazele S și T, pentru a putea fi aplicată o procedură de corecție impusă de faptul că bobina avută la dispoziție nu este una ideală, procedură descrisă mai jos. Rezultă :

$$B_{ST}^{\wedge} = 0,0088083 \text{ S} \quad \text{deci} \quad X_{ST}^{\wedge} = 113,53 \Omega \quad , \quad L_{ST}^{\wedge} = 361,37 \text{ mH}$$

Bobina folosită este o bobină cu întrefier reglabil (reactanța variabilă) care pentru domeniul de interes se poate considera liniară având factorul de calitate practic constant : $q = X/R \cong 12$.

Prin introducerea ei în circuit se va modifica deci G_{ST} echivalent al ansamblului consumator-compensator cu o valoare care se poate determina dacă se trece de la schema echivalentă serie a bobinei, de impedanță $\underline{Z} = R + jX$, la schema echivalentă paralel de admitanță $\frac{1}{\underline{Y}^*} = \frac{1}{R^*} + \frac{1}{jX^*} = G^* - jB^*$ (fig.5.1).



Se cunosc relațiile între elementele celor două scheme echivalente :

$$R^* = \frac{R^2 + X^2}{R} \quad , \quad X^* = \frac{R^2 + X^2}{X} \quad (5.2)$$

și

$$R = \frac{R^* \cdot X^{*2}}{R^{*2} + X^{*2}} \quad , \quad X = \frac{R^{*2} \cdot X^*}{R^{*2} + X^{*2}} \quad (5.3)$$

Fig. 5.1. Transformarea schemei echivalente serie a impedanței în schemă echivalentă paralel.

$$\frac{X}{R} = \frac{R^*}{X^*} = q \quad (5.4)$$

Calibrarea bobinei se face prin metoda voltampermetrică. Se determină de fapt impedanța bobinei $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$. Cunoscând valoarea reactanței inductive din schema echivalentă în paralel $X^* = X_{ST}^{\wedge}$ și implicit $R^* = q \cdot X^*$, cu relațiile (144) se calculează R și X :

$$X = X^* \cdot \frac{q^2}{q^2 + 1} \quad , \quad R = R^* \cdot \frac{q}{q^2 + 1} \quad (5.5)$$

și apoi Z pentru calibrarea bobinei.

$$Z = X^* \cdot \frac{q}{\sqrt{q^2 + 1}} \quad (5.6)$$

Se obțin : $R^* = 1217 \Omega$, $R = 9,39 \Omega$, $X = 112,75 \Omega$, $Z = 113,138 \Omega$.

Conductanța introdusă de bobina de compensare între fazele S și T, $G_{STb} = 1/R^*$ = 0,0008217 S va modifica conductanța echivalentă a ansamblului consumator-compensator. Pentru a obține o echilibrare mai bună prin compensare, se poate face o corecție la calculul susceptanțelor de compensare, în relațiile (142) înlocuind G_{ST}^s cu :

$$G = G_{ST}^s + G_{STb} = 0,010435 \text{ S} \quad .$$

Corecția va influența numai susceptanțele capacitive de compensare, care vor deveni:

$$B_{RS}^{\wedge*} = -0,0038164 \text{ S} \quad (C_{RS}^{\wedge*} = 12,15 \mu\text{F})$$

$$B_{TR}^{\wedge*} = -0,009919 \text{ S} \quad (C_{TR}^{\wedge*} = 15,89 \mu\text{F})$$

Evident că în cazul folosirii unor bobine cu factor de calitate ridicat sau în cazul unor determinări pentru care nu se impune o precizie prea mare, această corecție nu mai e necesară. Ceea ce s-a și făcut de altfel la determinările experimentale ce au urmat.

Cu valorile astfel determinate ale elementelor pentru schema echivalentă a sarcinii și a compensatorului s-a realizat schema electrică din figura 5.2.

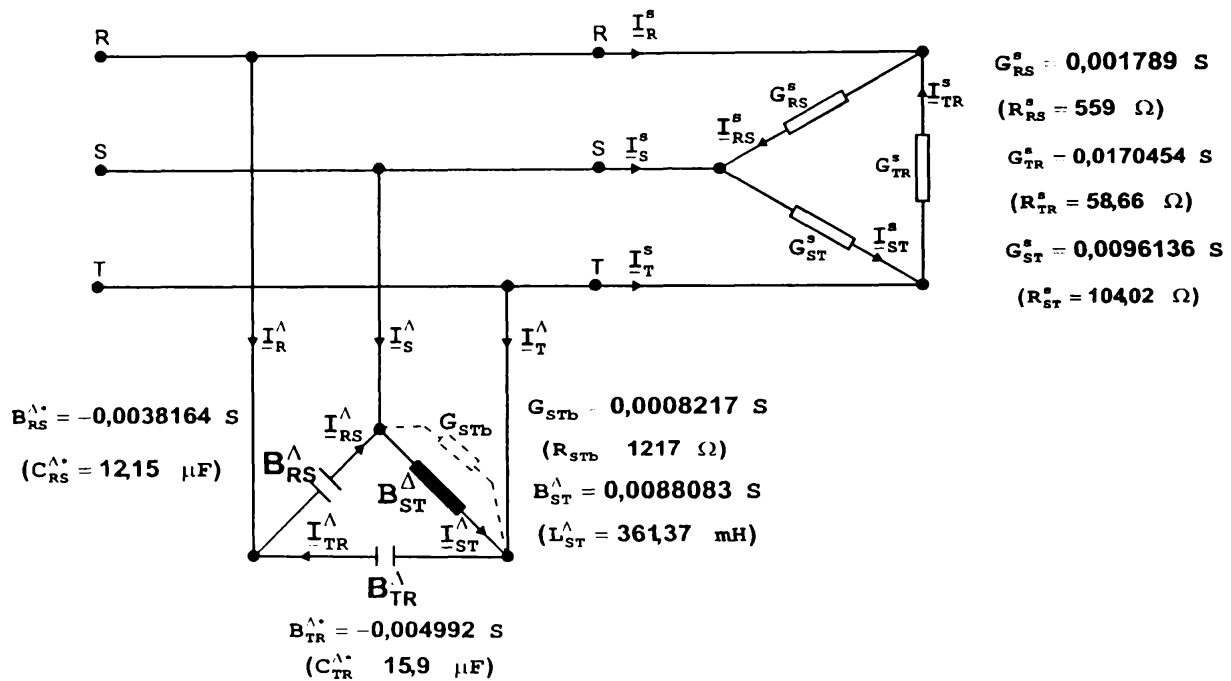


Fig. 5.2. Schema electrică simplificată a ansamblului consumator-compensator folosit pentru experimentul nr.1.

În continuare măsurătorile s-au făcut cu sistemul de achiziție și prelucrare a datelor descris în capitolul 2. S-au achiziționat curenții pe laturile Δ de sarcină respectiv de compensare, curenții pe fază la sarcină respectiv la compensator, curenții pe fază absorbiți de ansamblul sarcină-compensator, tensiunile de fază și de linie.

Rezultatele complete ale prelucrării achiziției, sunt prezentate în ANEXA 11. În cele ce urmează se prezintă cele mai semnificative :

1° În fișierul **11.txt** s-au achiziționat tensiunile de linie și curenții pe laturile Δ al sarcinii. Tensiunile de linie, definite de data aceasta prin fazori (valori efective și faze), sunt:

$$\underline{U}_{RS} = 217,74 \cdot e^{j 344,134^\circ} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{ST} = 219,32 \cdot e^{j 225,638^\circ} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{TR} = 219,57 \cdot e^{j 107,274^\circ} \text{ V}$$

Se observă că ele se apropie de un sistem echilibrat și simetric .

Observații :

- deoarece sistemul de achiziție de date este conceput astfel încât să poată achiziționa trei tensiuni (canalele 0, 1, 2) și trei curenți (canalele 3, 4, 5), achizițiile pentru perechile tensiuni-curenți între faze, respectiv tensiuni-curenți pe faze, în diverse secțiuni ale ansamblului consumator-compensator, au fost făcute la momente diferite. Cum alimentarea schemei s-a obținut cu ajutorul unui autotransformator trifazat reglabil, din cauza unei imperfecțiuni mecanice a sistemului cursorului acestuia, a rezultat o nesimetrie în secundarul autotransformatorului, nesimetrie care aproape de fiecare dată era alta. Diferențele între tensiunile de linie se situează însă într-un domeniu de $\pm 1,5\%$ și nu au afectat rezultatele.

- faptul că diferitele fișiere au fost achiziționate la momente diferite de timp, face ca o comparație între acestea, să nu fie în totalitate elocventă (în primul rând comparațiile care folosesc faza fazorilor obținuți).

- pe fiecare canal, faza fazorului corespunzător se calculează față de momentul începerii achiziției, considerat la $t = 0$.

2° În fișierul **3!.TXT** s-au achiziționat tensiunile de fază și curenții pe fază absorbiți din rețea de către ansamblul consumator-compensator. Tensiunile de fază au fost determinate ca având următorii fazori :

$$\underline{U}_{RN} = 127,97 \cdot e^{j268,84^\circ} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{SN} = 126,31 \cdot e^{j151,46^\circ} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{TN} = 125,80 \cdot e^{j30,71^\circ} \text{ V}$$

Sistemului trifazat al tensiunilor de fază îi corespund următoarele componente de secvență :

$$\underline{U}_d = 126,67 \cdot e^{j270,33^\circ} \text{ V}$$

$$\underline{U}_i = 1,53 \cdot e^{j185,93^\circ} \text{ V}$$

$$\underline{U}_h = 2,11 \cdot e^{j211,86^\circ} \text{ V}$$

Se observă că componentele de secvență inversă și homopolară sunt sub 1,7% deci sistemul tensiunilor de fază se poate considera unul simetric și echilibrat.

3° Curenții pe laturile schemei în Δ a sarcinii sunt :

$$\underline{I}_{RS} = 0,388 \cdot e^{j344,075^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{ST} = 2,085 \cdot e^{j225,461^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{TR} = 3,748 \cdot e^{j106,881^\circ} \text{ A} \quad (\text{fișier 1!.txt})$$

fiind practic în fază cu tensiunile înlănțuite corespunzătoare. Raportați la acestea ei au expresiile :

$$\underline{I}_{RS}^* = 0,388 \cdot e^{j0,059^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{ST}^* = 2,085 \cdot e^{j0,177^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{TR}^* = 3,748 \cdot e^{j0,893^\circ} \text{ A}$$

Curenții pe fază absorbiți de sarcină rezultă :

$$\underline{I}_R^s = 3,954 \cdot e^{j111,14^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_S^s = 2,323 \cdot e^{j35,98^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_T^s = 5,141 \cdot e^{j265,45^\circ} \text{ A} \quad (\text{fișier 2!.txt})$$

care față de tensiunile de fază achiziționate în același fișier, adică :

$$\begin{aligned}\underline{U}_{RN} &= 128,43 \cdot e^{j134,3^\circ} \text{ V} \\ \underline{U}_{SN} &= 126,6 \cdot e^{j51,91^\circ} \text{ V} \\ \underline{U}_{TN} &= 127,8 \cdot e^{j257,9^\circ} \text{ V} \quad (\text{fișier 2!.txt})\end{aligned}$$

au și componente reactive (deși schema echivalentă în Δ a sarcinii conține numai rezistențe!) ceea ce confirmă rezultatele dezvoltării teoretice din capitolele precedente .

Astfel :

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^{s*} &= 3,9540 e^{j-23,16^\circ} \text{ A} = (3,635 - j 1,555) \text{ A} \\ \underline{I}_S^{s*} &= 2,3230 e^{j20,07^\circ} \text{ A} = (2,182 + j 0,797) \text{ A} \\ \underline{I}_T^{s*} &= 5,1405 e^{j7,55^\circ} \text{ A} = (5,096 + j 0,676) \text{ A}\end{aligned}$$

ceea ce corespunde unei puteri active totale $P_t = 1393,3 \text{ W}$ și a unei puteri reactive totale $Q_t = 12,56 \text{ var}$ (practic neglijabilă).

O schemă echivalentă în Y corespunzătoare ar conține :

$$\begin{aligned}\underline{Y}_R^s &= G_R^s - jB_R^s = (0,02830 + j 0,0121077) \text{ S} \\ \underline{Y}_S^s &= G_S^s - jB_S^s = (0,017235 - j 0,006295) \text{ S} \\ \underline{Y}_T^s &= G_T^s - jB_T^s = (0,0399404 - j 0,005298) \text{ S}\end{aligned}$$

Se poate aprecia că, deși pe fiecare fază există o circulație importantă de putere reactivă ($Q_R = 199,7 \text{ var}$, $Q_S = -100,9 \text{ var}$, $Q_T = -86,3 \text{ var}$) cărcia într-o rețea reală i se datorează de fapt dezechilibrul tensiunilor din rețeaua electrică din amonte prin producerea de căderi nesimetrice de tensiuni pe faze, pe ansamblul celor 3 faze, sarcina nu absoarbe decât putere activă.

Obs.: Acești 12,56 var rezultă din condițiile, practice de lucru : nesimetria existentă în sistemul trifazat de tensiuni de alimentare, erori de măsură și prelucrare, regimul deformant prezent în tensiuni, etc.). Trebuie precizat aici și faptul că neutrul față de care au fost măsurate tensiunile de fază este neutrul fizic al autotransformatorului de alimentare a schemei. Într-o rețea reală, în care neutrul nu este accesibil, tensiunile de fază se determină prin calcul față de neutrul fictiv (în planul fazorilor tensiunilor, aflat în centrul de greutate al triunghiului tensiunilor de linie)

Din rezultatele calculului pentru analiza regimului nesimetric al sarcinii (fișier 2!.txt) se poate observa că puterea reactivă absorbită pe secvența inversă ($Q_i^s = 8,52 \text{ var}$) este mai mare decât cea de pe secvența directă ($Q_d^s = 3,9 \text{ var}$).

Se observă de asemenea o pondere foarte importantă în curenții de sarcină a componentei de secvență inversă : $I_i = 1,66 \text{ A}$, aproape 46% din curentul de secvență directă.

Datorită nesimetriei din sistemul trifazat de tensiuni de fază ($U_i = 2,79 \text{ V}$ și $U_h = 1,87 \text{ V}$) vor apare și puteri active și reactive pe secvența inversă: $P_i^s = 10,97 \text{ W}$ și $Q_i^s = 8,52 \text{ var}$, cu mult mai mici însă decât pe secvența directă.

Curentul de secvență homopolară al sarcinii $I_h^s = 0,0283 \text{ A}$, ceea ce este normal pentru un receptor trifazat cu o schemă în conexiune Δ .

Dacă considerăm \underline{U}_R în axa reală, $\underline{I}_i^{s*} = 1,6605 \cdot e^{j(-88,26^\circ)} A$, raportare utilă pentru compararea cu $\underline{I}_i^{\Delta*}$.

4°. Curenții pe laturile schemei în Δ a compensatorului sunt :

$$\begin{aligned}\underline{I}_{RS}^{\Delta} &= 0,835 \cdot e^{j327,033^\circ} A \\ \underline{I}_{ST}^{\Delta} &= 1,976 \cdot e^{j42,2811^\circ} A \\ \underline{I}_{TR}^{\Delta} &= 1,115 \cdot e^{j93,5546^\circ} A \quad (\text{fișier 5!.txt})\end{aligned}$$

care, raportați fiecare la tensiunile înălțuite corespunzătoare, achiziționate în același fișier :

$$\begin{aligned}\underline{U}_{RS}^{\Delta} &= 217,694 \cdot e^{j246,06^\circ} V \\ \underline{U}_{ST}^{\Delta} &= 219,972 \cdot e^{j129,87^\circ} V \\ \underline{U}_{TR}^{\Delta} &= 219,178 \cdot e^{j7,521^\circ} V ,\end{aligned}$$

devin :

$$\begin{aligned}\underline{I}_{RS}^{\Delta*} &= 0,835 \cdot e^{j(-80,966^\circ)} A = (0,1331 + j0,8246) A \quad (\text{capacitiv}) \\ \underline{I}_{ST}^{\Delta*} &= 1,976 \cdot e^{j87,59^\circ} A = (0,0831 - j1,974) A \quad (\text{inductiv}) \\ \underline{I}_{TR}^{\Delta*} &= 1,115 \cdot e^{j(-86,03^\circ)} A = (0,077 + j1,112) A \quad (\text{capacitiv})\end{aligned}$$

corespunzător unor impedanțe transversale (între faze) echivalente de valori :

$$\begin{aligned}\frac{1}{\underline{Z}_{RS}^{\Delta}} &= \frac{1}{R_{RS}^{\Delta}} - j \frac{1}{X_{RS}^{\Delta}} = \left(\frac{1}{1660,52} - j \frac{1}{26} \right) \Omega \\ \frac{1}{\underline{Z}_{ST}^{\Delta}} &= \frac{1}{R_{ST}^{\Delta}} - j \frac{1}{X_{ST}^{\Delta}} = \left(\frac{1}{2647,07} + j \frac{1}{111,435} \right) \Omega \\ \frac{1}{\underline{Z}_{TR}^{\Delta}} &= \frac{1}{R_{TR}^{\Delta}} - j \frac{1}{X_{TR}^{\Delta}} = \left(\frac{1}{2846,47} - j \frac{1}{197,10} \right) \Omega\end{aligned}$$

deci a unor admitanțe :

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{RS}^{\Delta} &= G_{RS}^{\Delta} - jB_{RS}^{\Delta} = (0,0006022 - j0,0037878) S \\ \underline{Y}_{ST}^{\Delta} &= G_{ST}^{\Delta} - jB_{ST}^{\Delta} = (0,0003777 + j0,0089738) S \\ \underline{Y}_{TR}^{\Delta} &= G_{TR}^{\Delta} - jB_{TR}^{\Delta} = (0,0003513 - j0,0050735) S\end{aligned}$$

Se poate observa aici o a altă sursă de erori : conductanțele echivalente (corespunzătoare pierderilor de putere activă) pe care le introduce condensatoarele folosite pentru compensare, conductanțe comparabile și chiar mai mari decât cea a bobinei.

Susceptanțelor astfel determinate le corespund următoarele inductivități (dacă $B > 0$) respectiv capacități (pentru $B < 0$):

$$L_{ST} = 354,7 \text{ mH} \quad C_{RS} = 12,05 \text{ } \mu\text{F} \quad C_{TR} = 16,15 \text{ } \mu\text{F}$$

Diferențele acestora față de valorile presupuse la construcția compensatorului sunt neseemnificative.

Curenții pe fazele compensatorului sunt :

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^{\Delta} &= 1,6735 \cdot e^{j1,98^{\circ}} \text{ A} \\ \underline{I}_S^{\Delta} &= 1,7910 \cdot e^{j123,04^{\circ}} \text{ A} \\ \underline{I}_T^{\Delta} &= 1,6280 \cdot e^{j248,94^{\circ}} \text{ A} \quad (\text{fișier 4!.txt})\end{aligned}$$

care, după cum se poate ușor observa, se constituie într-un sistem foarte apropiat de unul de secvență inversă. Raportat fiecare la tensiunea de fază corespunzătoare :

$$\begin{aligned}\underline{U}_{RN} &= 126,75 \cdot e^{j275,58^{\circ}} \text{ V} \\ \underline{U}_{SN} &= 125,44 \cdot e^{j157,52^{\circ}} \text{ V} \\ \underline{U}_{TN} &= 126,39 \cdot e^{j37,19^{\circ}} \text{ V} \quad (\text{fișier 4!.txt})\end{aligned}$$

devin :

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^{\Delta*} &= 0,105 + j 1,6701 \text{ A} \\ \underline{I}_S^{\Delta*} &= 1,476 - j 1,014 \text{ A} \\ \underline{I}_T^{\Delta*} &= -1,384 - j 0,8567 \text{ A}\end{aligned}$$

Pentru comparația cu rezultatele obținute prin aplicarea modelului matematic, vom calcula valorile curenților pe fazele compensatorului cu relațiile (3.82), care folosesc componentele active și reactive ale curenților de fază ai sarcinii.

Rezultă valori apropiate :

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^{\Delta*} &= 0,0026 + j 1,555 \text{ A} \\ \underline{I}_S^{\Delta*} &= 1,455 - j 0,794 \text{ A} \\ \underline{I}_T^{\Delta*} &= -1,458 - j 0,676 \text{ A}\end{aligned}$$

Diferențele se datorează de asemenea faptului că modelul matematic a fost obținut în condiții simplificate, idealizate. Aici cauza principală o constituie însă conductanța, relativ mare, din schemele echivalente ale bobinei și condensatoarelor folosite la compensator .

Aceleași sunt motivele pentru care compensatorul debitează respectiv absoarbe putere activă și reactivă pe secvența homopolară respectiv directă (teoretic aceste mărimi trebuie să aibă valori nule). Valorile obținute se pot însă neglija :

$$\begin{aligned}P_h &= -0,131 \text{ W} & Q_h &= -0,028 \text{ var} \\ P_d &= 31,71 \text{ W} & Q_d &= 24,43 \text{ var} \quad (\text{fișier 4!.txt})\end{aligned}$$

Descompunerea în componente de secvență a curenților de compensare, pune în evidență preponderența componentei de secvență inversă , așa cum era de așteptat de altfel :

$$\begin{aligned}I_d &= 0,1057 \text{ A} \\ I_h &= 0,0393 \text{ A} \\ I_i &= 1,6951 \text{ A}\end{aligned}$$

Dacă raportăm componenta de secvență inversă a curenților de compensare la tensiunea fazei R se obține :

$$\underline{I}_i^{\Delta*} = 1,6951 \cdot e^{j 88,99^\circ} A$$

Comparându-l acum cu $\underline{I}_i^{s*} = 1,6605 \cdot e^{j(-88,26^\circ)} A$ se poate afirma că cei doi se compensează reciproc având valori efective apropiate și un defazaj de aproximativ 180° .

Acceași afirmație se poate face și în urma comparației între puterile active și reactive pe secvența inversă ale sarcinii (absorbite) și cele ale compensatorului (debitate), cu o eroare mai mare la puterea reactivă.

5° Curenții pe fază absorbiți din rețea de către ansamblul consumator-compensator sunt :

$$\underline{I}_R^c = 3,7068 \cdot e^{j 267,14^\circ} A$$

$$\underline{I}_S^c = 3,6859 \cdot e^{j 148,24^\circ} A$$

$$\underline{I}_T^c = 3,6888 \cdot e^{j 28,27^\circ} A \quad (\text{fișier 3!.txt})$$

care, raportându-i la tensiunile de fază corespunzătoare devin :

$$\underline{I}_R^{c*} = 3,7068 \cdot e^{j 1,7^\circ} A$$

$$\underline{I}_S^{c*} = 3,6859 \cdot e^{j 3,22^\circ} A$$

$$\underline{I}_T^{c*} = 3,6888 \cdot e^{j 2,44^\circ} A$$

Astfel puterile active și reactive absorbite pe faze din rețea sunt :

$$P_R^c = 474,15 W$$

$$Q_R^c = 14,08 var$$

$$P_S^c = 464,84 W$$

$$Q_S^c = 26,18 var$$

$$P_T^c = 463,62 W$$

$$Q_T^c = 19,8 var$$

Obs. : Aceste rezultate sunt obținute în urma unui calcul, în care s-a considerat că cei trei curenți și cele trei tensiuni au undele perfect sinusoidale. În realitate, avem de aface cu un regim deformant, datorat neliniarității condensatoarelor folosite în componența compensatorului, prezent mai ales în curenți. Acest lucru constituie o sursă de erori care se propagă bineînțeles până la valorile puterilor. Pentru cazul considerat coeficienții de deformare ai undelor de curent și tensiune nu depășesc însă 5% respectiv 2% .

Se constată că s-a obținut o foarte bună simetrizare a sarcinii pe cele trei faze ale rețelei de alimentare și de asemenea o compensare a puterii reactive a sarcinii până la $\cos\varphi \cong 1$:

$$I_d = 3,6937 A$$

$$I_i = 0,0257 A$$

$$I_h = 0,0238 A$$

(curenții de fază sunt practic egali cu componenta activă a curentului de secvență directă)

$$P_d = 1402,340 W$$

$$Q_d = 60,0328 var$$

$$P_i = 0,1167 W$$

$$Q_i = -0,0155 var$$

$$P_h = 0,1423 W$$

$$Q_h = 0,05 var$$

Ceea ce trebuia demonstrat !

5.3. Experimentul nr. 2 : Compensarea într-o rețea trifazată cu trei conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură pur rezistivă, folosind un compensator cu susceptanțe variabile.

Acest experiment este de fapt o dezvoltare a celui precedent. Aceeași sarcină de la experimentul nr.1 a fost acum compensată, firește tot în regim normal de funcționare cu ajutorul unui compensator cu susceptanțe variabile. Schema electrică simplificată a montajului corespunde celei din figura 5.2.

Pe baza curenților obținuți pe laturile Δ de compensare, mai precis a valorilor maxime ale acestora, obținute la compensarea cu susceptanțele constante de la experimentul nr.1, s-au stabilit valorile L și C ale bobinelor și condensatoarelor din componența susceptanțelor variabile, aceleași pe cele trei laturi ale compensatorului .

Astfel, $I_{L, max. comp.} = 2 \text{ A}$ și $I_{C, max. comp.} = 1,15 \text{ A}$ necesari pentru compensare au condus la soluția $I_{L, max.} / I_{C, max.} = 2,5$ și $I_{L, max.} = 3,5 \text{ A}$, $I_{C, max.} = 1,4 \text{ A}$ pentru care au rezultat $L = 200 \text{ mH}$ și $C = 20 \text{ }\mu\text{F}$.

S-au reglat apoi unghiurile de deschidere ale tiristoarelor, astfel încât să se obțină pentru curenții pe laturile Δ de compensare, mai întâi aceleași caractere (inductiv sau capacitiv) și apoi aproximativ aceleași valori efective ca și la experimentul nr.1.

Adică :

$$\begin{aligned} I_{RS} &= 0,84 \text{ A} && \text{capacitiv} \\ I_{ST} &= 2 \text{ A} && \text{inductiv} \\ I_{TR} &= 1,1 \text{ A} && \text{capacitiv} \end{aligned}$$

Rezultatele detaliate ale regimului sunt prezentate în ANEXA 12 . Cele mai semnificative sunt :

1° Tensiunile pe fazele rețelei și tensiunile între faze se mențin constituite în sisteme trifazate aproximativ simetrice :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{RN} &= 127,24 \cdot e^{j 76,46^\circ} \text{ V} & \underline{U}_{RS} &= 222,33 \cdot e^{j 142,02^\circ} \text{ V} \\ \underline{U}_{SN} &= 126,09 \cdot e^{j 313,8^\circ} \text{ V} & \underline{U}_{ST} &= 218,49 \cdot e^{j 20,76^\circ} \text{ V} \\ \underline{U}_{TN} &= 127,14 \cdot e^{j 195^\circ} \text{ V} & \underline{U}_{TR} &= 218,68 \cdot e^{j 261,14^\circ} \text{ V} \\ & \text{(fișier ps3.txt)} & & \text{(fișier ps4.txt)} \end{aligned}$$

2° Curenții absorbiți de sarcină au practic aceeași configurație ca la experimentul nr.1 :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RS}^* &= 0,388 \cdot e^{j 0,059^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_{ST}^* &= 2,085 \cdot e^{j 0,177^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_{TR}^* &= 3,748 \cdot e^{j 0,893^\circ} \text{ A} && \text{(fișier 1!.txt)} \\ \underline{I}_R^* &= 3,9540 e^{j -23,16^\circ} \text{ A} = (3,635 - j 1,555) \text{ A} \\ \underline{I}_S^* &= 2,3230 e^{j 20,07^\circ} \text{ A} = (2,182 + j 0,797) \text{ A} \\ \underline{I}_T^* &= 5,1405 e^{j 7,55^\circ} \text{ A} = (5,096 + j 0,676) \text{ A} && \text{(fișier 2!.txt)} \end{aligned}$$

3° Curenții prin cele trei bobine al compensatorului sunt :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RS} &= 0,316 \cdot e^{j 6,27^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_{ST} &= 3,251 \cdot e^{j 297,88^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_{TR} &= 0,089 \cdot e^{j 156,43^\circ} \text{ A} \end{aligned} \quad (\text{fișier ps4.txt})$$

unghiul de aprindere al tiristoarelor, pentru fiecare latură fiind altul : $\delta_{RS} \cong 63^\circ$, $\delta_{ST} \cong 5^\circ$, $\delta_{RS} \cong 70^\circ$. Pe laturile RS și TR unghiul de aprindere este mai mare, valoarea efectivă a curentului prin bobină este mică și laturile respective ale compensatorului au caracter capacitiv. Dimpotrivă, pe latura ST unghiul de aprindere este mai mic, curentul prin bobină are o valoare apropiată de cea maximă, asigurând caracterul inductiv necesar .

4° Curenții absorbiți din rețea după compensare sunt :

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= 3,828 \cdot e^{j 77,12^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_S &= 3,842 \cdot e^{j 317,87^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_T &= 3,865 \cdot e^{j 187,72^\circ} \text{ A} \end{aligned} \quad (\text{fișier ps3.txt})$$

Descompunerea lor în componente de secvență pune în evidență preponderența componentei de secvență directă :

$$\begin{aligned} \underline{I}_d &= 3,832 \cdot e^{j 74,22^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_i &= 0,223 \cdot e^{j 229,04^\circ} \text{ A} \\ \underline{I}_h &= 0,216 \cdot e^{j 101,3^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

și caracterul practic activ al puterii absorbite din rețea :

$$\begin{aligned} P_d &= 1457,63 \text{ W} & Q_d &= 22,11 \text{ var} \\ P_i &= -0,21 \text{ W} & Q_i &= -1 \text{ var} \\ P_h &= 0,21 \text{ W} & Q_h &= 1,22 \text{ var} \end{aligned}$$

Se poate observa că puterea activă totală absorbită din rețea de către ansamblul consumator-compensator este cu ceva mai mare decât la experimentul nr.1. Acest fapt se datorează pierderilor suplimentare de putere activă din compensator (de data aceasta format din 3 bobine și 3 baterii de condensatoare) .

Cu alte cuvinte, *compensatorul și-a atins scopul : echilibrarea sarcinii și compensarea totală a puterii reactive* .

Ceea ce este la fel de important constă în aceea că se validează totodată și soluția folosirii unui compensator cu susceptanțe variabile a căror structură și funcționare au fost descrise în ANEXA 10. Acest lucru face posibilă trecerea la etapa finală a acestui demers : compensarea on-line în rețelele trifazate dezechilibrate, un subiect ce poate constitui singurul obiect al unei dezvoltări teoretice și practice.

5.4. Experimentul nr. 3 : Compensarea într-o rețea trifazată cu trei conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură mixtă R-L, folosind un compensator cu susceptanțe variabile.

Acest experiment le dezvoltă pe cele anterioare, în sensul considerării de data aceasta a unui consumator trifazat, a cărui structură echivalentă are forma cea mai frecvent întâlnită și anume cea mixtă R-L.

Cu ajutorul unor rezistențe și bobine, montate în conexiune Δ , s-a modelat un astfel de consumator. În fișierul RE3~1.TXT s-au achiziționat tensiunile de linie aplicate acestui consumator și curenții pe laturile Δ . Rezultatele prelucrării acestui fișier sunt (pe larg în ANEXA 13) :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{RS} &= 220,2150 e^{j223,093^\circ} V & \underline{I}_{RS}^s &= 1,3277 e^{j159,202^\circ} A \\ \underline{U}_{ST} &= 223,9555 e^{j104,727^\circ} V & \underline{I}_{ST}^s &= 1,0273 e^{j88,312^\circ} A \\ \underline{U}_{TR} &= 221,3176 e^{j342,447^\circ} V & \underline{I}_{TR}^s &= 1,6987 e^{j325,732^\circ} A \end{aligned}$$

$$\underline{I}_{RS}^{s*} = 1,3277 e^{j(-63,8914^\circ)} A = (0,5842 - j 1,1922) A$$

din care rezultă: $\underline{I}_{ST}^{s*} = 1,0273 e^{j(-16,4154^\circ)} A = (0,9854 - j 0,2982) A$

$$\underline{I}_{TR}^{s*} = 1,6987 e^{j(-16,7144^\circ)} A = (1,6269 - j 0,4885) A$$

Conductanțele și susceptanțele echivalente ale sarcinii sunt deci:

$$\begin{aligned} G_{RS}^s &= 0,002652862 S & G_{RS}^s &= 0,00541380 S \\ G_{ST}^s &= 0,004399981 S & G_{ST}^s &= 0,001331515 S \\ G_{TR}^s &= 0,007350974 S & G_{TR}^s &= 0,002207235 S \end{aligned}$$

Achiziționând apoi tensiunile de fază și curenții pe fazele sarcinii, (fișier RE3~2.TXT) în vederea analizării regimului nesimetric al acesteia, s-au obținut :).

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= 126,7542 e^{j193,2818^\circ} V & \underline{I}_R &= 3,0056 e^{j153,2738^\circ} A \\ \underline{U}_S &= 127,8530 e^{j77,1578^\circ} V & \underline{I}_S &= 1,3642 e^{j25,3338^\circ} A \\ \underline{U}_T &= 128,4655 e^{j313,4094^\circ} V & \underline{I}_T &= 2,3750 e^{j305,5199^\circ} A \end{aligned}$$

$$\underline{I}_R^{s*} = 3,0056 e^{j(-40,008^\circ)} A = (2,3022 - j 1,9323) A$$

$$\underline{I}_S^{s*} = 1,3642 e^{j(-51,824^\circ)} A = (0,8432 - j 1,0724) A$$

$$\underline{I}_T^{s*} = 2,3750 e^{j(-7,8895^\circ)} A = (2,3525 - j 0,3260) A$$

ceea ce corespunde unor parametri transversali echivalenți pe faze având valorile:

$$\begin{aligned} G_R^s &= 0,018162712 S & B_R^s &= 0,015244465 S \\ G_S^s &= 0,006595074 S & B_S^s &= 0,008387758 S \\ G_T^s &= 0,018312310 S & B_T^s &= 0,002537646 S \end{aligned}$$

Componentele de secvență directă și inversă ale curenților de sarcină au valorile:

$$\underline{I}_d^* = 2,1521 e^{j(-31,7255)^\circ} A = (1,8305 - j 1,1317) A$$

$$\underline{I}_i^* = 0,938 e^{j 85,0814^\circ} A = (0,0804 + j 0,9346) A$$

ceea ce corespunde unui coeficient de disimetrie procentual de 43,587%.

Puterile active și reactive totale absorbite de sarcină din rețea sunt de:

$$P_t = 701,8284 W \quad Q_t = 423,9146 \text{ var}$$

Folosind acum din nou relațiile (3.20), se pot determina valorile elementelor compensatorului Δ și ale curenților prin acestea în condițiile echilibrării sarcinii și anulării puterii reactive absorbite din rețea:

$$B_{RS}^A = -0,007117557 S$$

$$C_{RS}^A = 22,656 \mu F$$

$$\underline{I}_{RS}^{A*} = j 1,567 A$$

$$B_{ST}^A = -0,001380941 S$$

$$L_{ST}^A = 2305,02 mH$$

$$\underline{I}_{ST}^{A*} = -j 0,309 A$$

$$B_{TR}^A = -0,003215935 S$$

$$C_{TR}^A = 10,237 \mu F$$

$$\underline{I}_{TR}^{A*} = j 0,712 A$$

Cu relațiile (3.68) se pot calcula și curenții (anticipați) pe fazele compensatorului:

$$\underline{I}_R^{A*} = (-0,4275 + j 1,9737) A = 2,019 e^{j 102,22^\circ} A$$

$$\underline{I}_S^{A*} = (1,0925 + j 1,089) A = 1,543 e^{j 44,92^\circ} A$$

$$\underline{I}_T^{A*} = (-0,5105 + j 0,349) A = 0,618 e^{j 145,64^\circ} A$$

Așa cum s-a demonstrat în modelul matematic, componentele reactive ale curenților pe fazele compensatorului trebuie să rezulte egale și de semn contrar cu cele ale curenților de sarcină, pe care de fapt le compensează. În plus componentele active ale curenților pe fazele compensatorului determină puteri active, unele debitate, altele absorbite, dar o sumă a acestora, nulă.

Aceste valori corespund unei situații ideale în care regimul este considerat perfect sinusoidal iar condensatoarele și bobinele folosite sunt fără pierderi de putere activă (ideale). Valorile obținute sunt însă utile la dimensionarea elementelor compensatorului Δ .

Am realizat de data aceasta echilibrarea direct în varianta folosirii de susceptanțe variabile la compensator.

Aplicând aceeași procedură de dimensionare a compensatorului ca la experimentul anterior și folosind varianta divizării bobinei în două jumătăți pentru îmbunătățirea condițiilor de comutație ale tiristoarelor, a rezultat schema din figura 5.3.

S-au reglat apoi unghiurile de deschidere ale tiristoarelor pentru a se obține valori cât mai apropiate de cele calculate pentru curenții pe laturile compensatorului, urmărind ca în același timp curenții pe fazele acestuia și curenții absorbiți pe faze de către ansamblul consumator-compensator să aibă valori cât mai apropiate de cele anticipate prin calcul. Lucru care s-a și obținut de altfel:

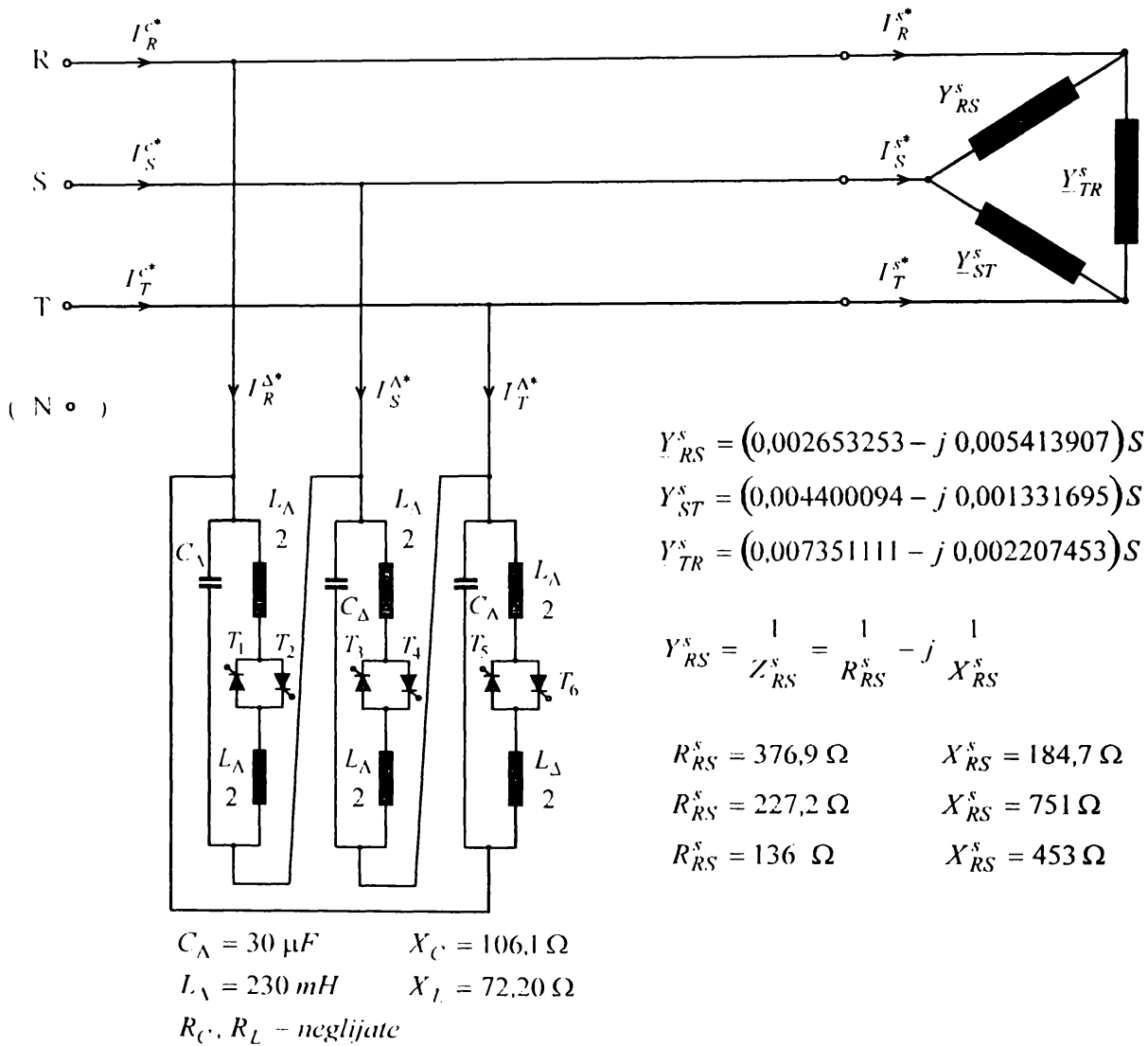


Fig. 5.3. Schema electrică și valorile parametrilor echivalenți ale elementelor ansamblului consumator-compensator.

Curenții pe fazele compensatorului (fișier RE3~10.TXT) :

$$\underline{I}_R^{A*} = 2,0158 e^{j 90,9654^\circ} A = (-0,034 + j 2,0156) A$$

$$\underline{I}_S^{A*} = 1,5691 e^{j 45,4507^\circ} A = (1,1008 + j 1,1182) A$$

$$\underline{I}_T^{A*} = 0,6592 e^{j 146,4276^\circ} A = (-0,5492 + j 0,3645) A$$

Se constată o foarte bună apropiere de valori calculate. Componentele reactive sunt practic egale și de semn contrar cu cele ale curenților de sarcină.

Componentele simetrice ale curenților pe fazele compensatorului sunt:

$$\underline{I}_d^{A*} = 1,1838 e^{j 81,2142^\circ} A = (0,1808 + j 1,1699) A$$

$$\underline{I}_i^{A*} = 0,9473 e^{j (-149,1754)^\circ} A = (-0,8135 - j 0,4854) A$$

Comparând aceste valori cu ale mărimilor similare ale curenților de sarcină se constată că:

- componentele reactive de secvență directă sunt practic egale și de semn contrar - se produce astfel compensarea totală a puterii reactive pe secvență directă;

- componentele active și reactive de secvență inversă sunt de semn contrar și au valori apropiate, ceea ce conduce la o reducere substanțială a curentului de secvență inversă absorbit din rețea de către ansamblul consumator compensator (de la 43,6% la 0,7%).

Curenții pe faze absorbiți din rețea de către ansamblul consumator-compensator (fișier RI3~6.TXT) :

$$\underline{I}_R^{c*} = 2,0558 e^{j 0,5077^\circ} A = (2,0557 + j 0,0182) A$$

$$\underline{I}_S^{c*} = 2,0724 e^{j (-1,2456)^\circ} A = (2,0719 - j 0,045) A$$

$$\underline{I}_T^{c*} = 2,1334 e^{j (-0,6347)^\circ} A = (2,1332 - j 0,0236) A$$

Se constată o foarte bună echilibrare a sarcinii pe cele trei faze. Valorile efective ale curenților sunt practic egale și apropiate de valoarea anticipată prin calcul:

$$\underline{I}_R^{c*} = \underline{I}_S^{c*} = \underline{I}_T^{c*} = \text{Re}(\underline{I}_d^c) = \text{Re}(\underline{I}_i^s) = \frac{1}{3}(I_{Ra}^s + I_{Sa}^s + I_{Ta}^s) = 1,832 A$$

Diferențele se datorează în mod evident conductanțelor echivalente aferente bobinelor și condensatoarelor folosite la construcția compensatorului. Se constată de asemenea anularea practic a componentelor reactive ale curenților pe faze.

Aceleași concluzii se pot extrage și din analiza curenților de secvență absorbiți din rețea (fișier RI3~6.TXT) :

$$\underline{I}_d^{c*} = 2,0868 e^{j (-0,4554)^\circ} A = (2,0867 - j 0,0166) A$$

$$\underline{I}_i^{c*} = 0,0151 e^{j 11,3607^\circ} A = (0,0148 + j 0,0030) A$$

Deci prin compensare se “anihilează” componenta reactivă a curentului de secvență directă și curentul de secvență inversă (ambele componente).

S-au obținut astfel echilibrarea sarcinii pe cele trei faze și compensarea totală a puterii reactive. Ansamblul consumator-compensator este “văzut” din rețea ca o sarcină (pur) activă și (perfect) echilibrată: (fișier RI3~6.TXT):

$P_R = 261,24 W$	$Q_R = -2,31 var$	$P_d = 798,11 W$	$Q_d = 6,34 var$
$P_S = 262,24 W$	$Q_S = 5,7 var$	$P_i = 0,07 W$	$Q_i = -0,01 var$
$P_T = 274,91 W$	$Q_T = 3,04 var$		
$P_l = 798,40 W$	$Q_l = 6,43 var$		

Ceea ce trebuia demonstrat !

5.5. Experimentul nr. 4 : Compensarea într-o rețea trifazată cu patru conductoare a unui consumator echivalent dezechilibrat cu structură mixtă R-L, folosind un compensator cu susceptanțe variabile.

Acest experiment a fost făcut cu scopul validării modelului matematic corespunzător compensării puterii reactive în rețelele electrice trifazate dezechilibrate cu patru conductoare. De data aceasta s-a considerat numai cazul sarcinii dezechilibrate în structură echivalentă mixtă R-L și s-au folosit direct compensatoarele cu susceptanțe variabile.

Pentru descrierea integrală a sarcinii, necesară și în scopul dimensionării celor două compensatoare Δ și Y, s-a achiziționat fișierul DN1.TXT, dintre rezultatele prelucrării căruia se evidențiază:

- tensiunile de fază și curenții pe fazele sarcinii și pe conductorul neutru sunt:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{RN} &= 127,0284 e^{j 256,7187^\circ} \text{ V} & \underline{I}_R^{s*} &= 2,1803 e^{j(-17,0014)^\circ} \text{ A} = (2,0851 - j 0,6375) \text{ A} \\ \underline{U}_{SN} &= 128,6795 e^{j 135,9746^\circ} \text{ V} & \underline{I}_S^{s*} &= 1,2435 e^{j(-59,8057)^\circ} \text{ A} = (0,6254 - j 1,0748) \text{ A} \\ \underline{U}_{TN} &= 125,6991 e^{j 17,8069^\circ} \text{ V} & \underline{I}_T^{s*} &= 3,0835 e^{j(-28,3034)^\circ} \text{ A} = (2,7149 - j 1,4620) \text{ A} \\ & & \underline{I}_N^s &= 2,416 e^{j 153,338^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

Dezechilibrul sistemului trifazat de tensiuni poate fi neglijat, valorile procentuale ale coeficienților de asimetrie și respectiv de disimetrie fiind $k_{ns0i} = 1,23\%$ respectiv $k_{ns2i} = 1,06\%$.

Dezechilibrul din sistemul trifazat de curenți este însă foarte pronunțat, componentele de secvență ale curenților de sarcină fiind:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^{s*} &= 2,0918 e^{j(-30,033)^\circ} \text{ A} = (1,8109 - j 1,0469) \text{ A} \\ \underline{I}_h^{s*} &= 0,85 e^{j(-144,6122)^\circ} \text{ A} = (-0,6929 - j 0,4922) \text{ A} \\ \underline{I}_i^{s*} &= 0,4142 e^{j(-117,7663)^\circ} \text{ A} = (-0,193 + j 0,3665) \text{ A} \end{aligned}$$

ceea ce corespunde valorilor procentuale ale coeficienților de asimetrie și respectiv de disimetrie de $k_{ns0i} = 40,63\%$ și respectiv de $k_{ns2i} = 19,8\%$.

Pentru modelarea sarcinii s-au folosit rezistențe și bobine conectate în Y_0 . Elementele echivalente transversale ale acestei scheme în cele două exprimări sunt:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_R^s &= G_R^s - j \cdot B_R^s & G_R^s &= 0,016414440 \text{ S} & B_R^s &= 0,005018563 \text{ S} \\ & & G_S^s &= 0,004860137 \text{ S} & B_S^s &= 0,008352535 \text{ S} \\ & & G_T^s &= 0,021598404 \text{ S} & B_T^s &= 0,011630950 \text{ S} \end{aligned}$$

și

$$\begin{aligned} \underline{Y}_R^s &= \frac{1}{\underline{Z}_R^s} = \frac{1}{R_R^s} - j \frac{1}{X_R^s} & R_R^s &= 60,92 \ \Omega & X_R^s &= 199,26 \ \Omega \\ & & R_S^s &= 205,75 \ \Omega & X_S^s &= 119,72 \ \Omega \\ & & R_T^s &= 46,3 \ \Omega & X_T^s &= 85,98 \ \Omega \end{aligned}$$

puterile active și reactive pe fazele sarcinii și pe ansamblul său au rezultat:

$$\begin{aligned}
P_R &= 264,8624 \text{ W} & Q_R &= 80,9835 \text{ var} \\
P_S &= 80,4775 \text{ W} & Q_S &= 138,3056 \text{ var} \\
P_T &= 341,2587 \text{ W} & Q_T &= 183,7750 \text{ var} \\
P_I &= 686,5986 \text{ W} & Q_I &= 403,0642 \text{ var}
\end{aligned}$$

Cu ajutorul relațiilor (4.71) sau (4.72), se pot acum determina elementele echivalente necesare pentru cele două compensatoare, în conexiune Δ respectiv Y :

$$\begin{aligned}
B_{RS}^{\Delta} &= -0,004423624 \text{ S} & G_{RS}^{\Delta} &= 14,08 \text{ } \mu\text{S} & X_{C_{RS}}^{\Delta} &= 226,06 \text{ } \Omega \\
B_{ST}^{\Delta} &= 0,006332366 \text{ S} & L_{ST}^{\Delta} &= 502,67 \text{ mH} & X_{L_{ST}}^{\Delta} &= 157,92 \text{ } \Omega \\
B_{TR}^{\Delta} &= -0,001908741 \text{ S} & C_{TR}^{\Delta} &= 6,076 \text{ } \mu\text{F} & X_{C_{TR}}^{\Delta} &= 523,9 \text{ } \Omega \\
B_R^Y &= -0,004423624 \text{ S} & L_R^Y &= 710,7 \text{ mH} & X_{L_R}^Y &= 208,83 \text{ } \Omega \\
B_S^Y &= -0,011326104 \text{ S} & C_S^Y &= 36,05 \text{ } \mu\text{F} & X_{C_S}^Y &= 88,29 \text{ } \Omega \\
B_T^Y &= -0,018147248 \text{ S} & C_T^Y &= 57,76 \text{ } \mu\text{F} & X_{C_T}^Y &= 55,1 \text{ } \Omega
\end{aligned}$$

Acestea, în condițiile simetriei tensiunilor de fază ar produce pe laturile respective ale compensatoarelor curenții:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{RS}^{A*} &= j 0,973 \text{ A} & \underline{I}_R^{Y*} &= -j 0,569 \text{ A} \\
\underline{I}_{ST}^{A*} &= -j 1,393 \text{ A} & \underline{I}_S^{Y*} &= j 1,438 \text{ A} \\
\underline{I}_{TR}^{A*} &= j 0,42 \text{ A} & \underline{I}_T^{Y*} &= j 2,305 \text{ A}
\end{aligned}$$

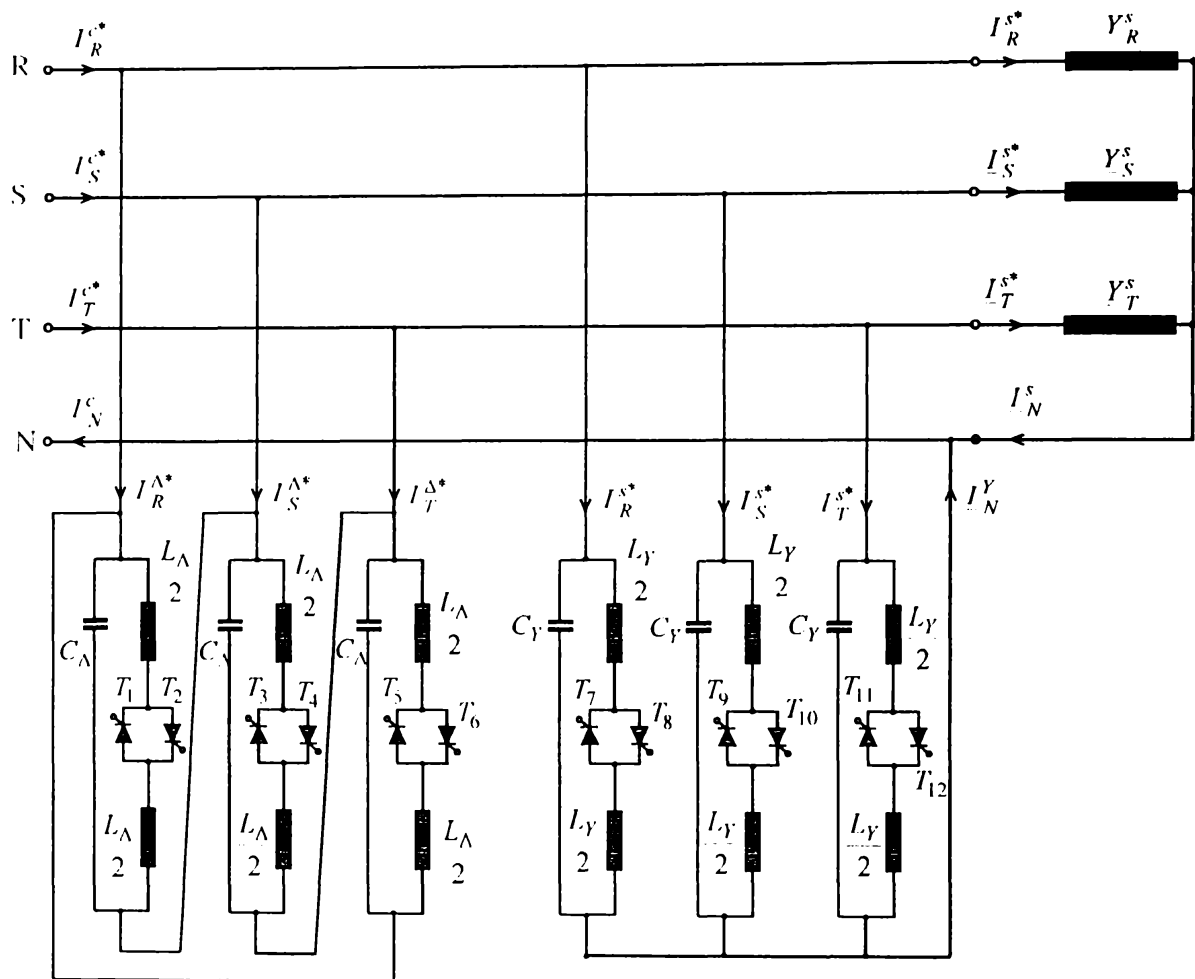
Cu ajutorul relațiilor (4.74) sau (4.83) se pot anticipa și curenții pe fazele compensatorului Δ :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{A*} &= (-0,2766 + j 1,2063) \text{ A} = 1,2376 e^{j 102,91^\circ} \text{ A} \\
\underline{I}_S^{A*} &= (1,183 - j 0,3636) \text{ A} = 1,2376 e^{j (-17,08^\circ)} \text{ A} \\
\underline{I}_T^{A*} &= (-0,9064 - j 0,8427) \text{ A} = 1,2376 e^{j (-137,08^\circ)} \text{ A}
\end{aligned}$$

care după cum se poate ușor observa, se constituie într-un sistem trifazat de secvență inversă.

Aplicând apoi procedura de dimensionare a condensatoarelor și bobinelor necesare la construcția celor două compensatoare cu susceptanțe variabile prezentată la experimentul nr. 2, s-a construit montajul necesar experimentului, a cărui schemă simplificată și parametri echivalenți sunt prezentați în figura 5.4.

Se reglează acum unghiurile de deschidere pentru fiecare dintre cele 6 perechi de tiristoare astfel încât să se obțină pentru curenții pe laturile și pe fazele compensatoarelor, valori cât mai apropiate de cele anticipate. S-au obținut:



$$C_{\Delta} = 15 \mu F \quad X_{C_{\Delta}} = 212,2 \Omega$$

$$L_{\Delta} = 230 mH \quad X_{L_{\Delta}} = 72,25 \Omega$$

$$C_Y = 60 \mu F \quad X_{C_Y} = 53,05 \Omega$$

$$L_Y = 160 mH \quad X_{L_Y} = 50,26 \Omega$$

$$B_{\Delta min} = -0,004712 S \quad B_{\Delta max} = 0,013839 S \quad B_{Y min} = 0,019894 S \quad B_{Y max} = -0,018849 S$$

$$I_{C max} = 1,04 A \quad I_{L max} = 3,04 A \quad I_{C max} = 2,4 A \quad I_{L max} = 2,53 A$$

Fig. 5.4. Schema electrică simplificată și parametri echivalenți respectiv caracteristici pentru compensatoarele cu susceptanțe variabile în montaj Δ și Y.

• Curenții pe fazele respectiv pe conductorul neutru ale compensatorului Y au valori (fișier DN~7.TXT) :

$$\underline{I}_R^Y = 0,7533 e^{j(-53,7413^\circ)} A = (0,4455 - j 0,6074) A$$

$$\underline{I}_S^Y = 1,9394 e^{j 76,4066^\circ} A = (0,4558 + j 1,8851) A$$

$$\underline{I}_T^Y = 2,3392 e^{j 85,0564^\circ} A = (0,2016 + j 2,3305) A$$

$$\underline{I}_N^Y = 2,573 e^{j 256,514^\circ} A$$

căroră le corespund următoarele componente simetrice:

$$\underline{I}_h^{Y*} = 0,9806 e^{j158,4911^\circ} A = (-0,9123 + j 0,3595) A$$

$$\underline{I}_i^{Y*} = 0,8318 e^{j(-162,4053^\circ)} A = (-0,7929 - j 0,2515) A$$

$$\underline{I}_d^{Y*} = 1,2702 e^{j71,3697^\circ} A = (0,4058 + j 1,2036) A$$

Se observă că valorile componentelor reactive ale curenților pe faze au caracterul impus (inductiv pe faza R și capacitiv pe fazele S și T) și valori foarte apropiate de cele calculate. Componentele active, care nu pot fi înlăturate și care corespund pierderilor de putere activă din bobinele și condensatoarelor compensatorului, se vor regăsi în puterea activă totală (mai mare decât anterior compensării) absorbită din rețea de către ansamblul consumator-compensator.

• Puterile active și reactive pe cele trei faze și pe ansamblul compensatorului Y sunt:

$$\begin{array}{ll} P_R = 56,4234 W & Q_R = 76,9273 var \\ P_S = 57,8332 W & Q_S = -239,1741 var \\ P_T = 25,8237 W & Q_T = -298,5482 var \\ P_l = 140,0802 W & Q_l = -460,7949 var \end{array}$$

Puterile active sunt cele aferente pierderilor în compensator, amintite mai sus (nule în modelul matematic). Puterile reactive unele sunt absorbite, altele debitate. Suma lor însă trebuie să rezulte egală și de semn contrar celei absorbite de sarcină, deoarece compensatorul Y este cel care realizează în fapt compensarea totală a puterii reactive a sarcinii. Ceea ce s-a și obținut de altfel, cu o eroare determinată de condițiile reale în care s-a realizat experimentul.

Pentru a analiza corect curenții de pe conductoarele neutrelor sarcinii, compensatorului Y și rețelei, a fost necesară achiziționarea lor simultană (fisier DN~7.TXT). S-au obținut:

$$\underline{I}_N^S = 2,531 e^{j55,372^\circ}$$

$$\underline{I}_N^Y = 2,587 e^{j254,661^\circ}$$

$$\underline{I}_N^c = 1,216 e^{j296,020^\circ}$$

Se constată că curenții de pe conductoarele neutrelor sarcinii și compensatorului Y sunt aproximativ egali cu de trei ori curenții homopolari corespunzători fiecăruia dintre cele două receptoare trifazate. Valorile lor efective sunt practic egale dar defazajul nu este de 180° așa cum rezultă din modelul matematic (curentul de pe neutrul compensatorului Y anulează curentul de pe neutrul sarcinii, deci este egal și de semn contrar acestuia) ci de aproape 200° . Acesta este de altfel motivul principal pentru care curentul pe conductorul neutru al ansamblului consumator-compensatoare rămâne la o valoare relativ ridicată (48% din curentul pe conductorul neutru al sarcinii).

Așa cum se observă din oscilogramele prezentate în ANEXA 14 deformarea foarte pronunțată din unda curentului de pe conductorul neutru al compensatorului Y (CDef = 26,7%) se regăsește în curentul de pe conductorul neutru al ansamblului (CDef = 98,4%)

- Curenții pe fazele compensatorului Δ s-au obținut (fișier DN3~2.TXT):

$$\underline{I}_R^{A*} = 1,1622 e^{j102,3334^\circ} A = (-0,2483 + j 1,1354) A$$

$$\underline{I}_S^{A*} = 1,4493 e^{j(-20,3133^\circ)} A = (1,3591 - j 0,5031) A$$

$$\underline{I}_T^{A*} = 1,2808 e^{j(-131,0506^\circ)} A = (-0,8411 - j 0,9659) A$$

cu componentele simetrice:

$$\underline{I}_d^{A*} = 0,1648 e^{j(-53,0699^\circ)} A = (0,0990 - j 0,1317) A$$

$$\underline{I}_i^{A*} = 1,2917 e^{j115,8074^\circ} A = (-0,5623 + j 1,1628) A$$

Componenta de secvență directă, conform modelului matematic ar trebui să fie nulă. În experiment ea a rezultat foarte mică, practic neglijabilă.

Curenții pe fazele compensatorului Δ sunt constituiți într-un sistem de secvență inversă, în conformitate cu modelul matematic.

- Puterile pe fiecare fază și pe ansamblul compensatorului Δ au rezultat:

$$P_R = -31,6548 W \quad Q_R = -144,7765 var$$

$$P_S = 171,5983 W \quad Q_S = 63,5213 var$$

$$P_T = -106,5190 W \quad Q_T = 122,3179 var$$

$$P_i = 33,4244 W \quad Q_i = 41,0627 var$$

Se observă că pe unele faze compensatorul Δ absoarbe putere activă iar pe altele debitează, afirmație valabilă și pentru puterile reactive. Pe ansamblul celor trei faze, acest compensator nu schimbă circulația de putere. El realizează de fapt o redistribuire a puterilor active și reactive între faze, în sensul echilibrării sarcinii acestora. Ceea ce s-a obținut și în experimentul descris aici.

Ansamblul consumator-compensator absoarbe din rețea curenții (fișier DN2~8.TXT):

$$\underline{I}_R^{c*} = 2,3889 e^{j(-1,4691)^\circ} A = (2,3881 - j 0,0612) A$$

$$\underline{I}_S^{c*} = 2,3721 e^{j(-6,0066^\circ)} A = (2,3591 - j 0,2482) A$$

$$\underline{I}_T^{c*} = 2,4087 e^{j0,0711^\circ} A = (2,4087 + j 0,0030) A$$

pentru care componentele de secvență sunt:

$$\underline{I}_h^{c*} = 0,0741 e^{j(-66,3559)^\circ} A = (0,0297 - j 0,0678) A$$

$$\underline{I}_d^{c*} = 2,3876 e^{j(-2,4543^\circ)} A = (2,3854 - j 0,1022) A$$

$$\underline{I}_i^{c*} = 0,0764 e^{j79,1649^\circ} A = (0,0144 + j 0,0750) A$$

deci corespunzător unor valori procentuale pentru coeficientul de asimetrie respectiv de disimetrie de:

$$k_{ns0i} = 3,1 \% \quad k_{ns2i} = 3,2 \%$$

Puterile absorbite pe faze și pe total au rezultat:

$$\begin{array}{ll} P_R = 305,2764 W & Q_R = 7,8291 var \\ P_S = 298,9886 W & Q_S = 31,4596 var \\ P_T = 312,8337 W & Q_T = -0,3880 var \\ P_I = 917,0987 W & Q_I = 38,9006 var \end{array}$$

Se observă foarte ușor că curenții pe cele trei faze sunt aproximativ egali și au practic numai componentă activă. De altfel componentele de secvență inversă și homopolară aferente au fost anulate, după cum a fost aproape anulată și componenta reactivă a curentului de secvență directă. Fiecare dintre cei trei curenți pe faze are o valoare practic egală cu componenta activă a curentului de secvență directă, în conformitate cu modelul matematic.

Diferențele între componentele de secvență directă ale curenților sarcinii, respectiv ale celor absorbiți din rețea după compensare, se datorează pierderilor de putere activă în elementele compensatorului în principal, dar și în restul montajului electric (conexiuni, aparate de măsură), pierderi neglijate în cadrul modelului matematic.

S-a obținut deci atât echilibrarea sarcinii cât și compensarea totală a puterii reactive absorbite de sarcină din rețea, *validându-se astfel modelul matematic*.

5.7. Observații și comentarii asupra rezultatelor experimentelor

Deși lasă loc de mai bine din punct de vedere al calității elementelor de circuit folosite (este vorba în primul rând de bobinele și condensatoarele din componența compensatoarelor)

experimentele și-au atins scopul și anume au validat modelele matematice ale compensării puterii reactive în rețelele trifazate dezechilibrate, expuse în capitolele anterioare.

În cele ce urmează vom face o analiză asupra elementelor care au condus la denaturarea rezultatelor, elemente care țin în principal de condițiile reale de efectuare a experimentelor și de asemenea o evaluare cantitativă a diferențelor față de modelele matematice, construite în condiții simplificite, idealizate.

Această analiză se impune de altfel ca o condiție obligatorie de fiecare dată când sunt evaluate rezultatele unui experiment.

Și în cazul experimentelor descrise în acest capitol, rezultatele au fost afectate de erori, așa cum a fost deja explicat pe parcursul descrierii experimentelor și interpretării rezultatelor.

Sistematizând, putem împărți sursele de erori în două categorii distincte:

a) aparținând sistemului de achiziții și prelucrare a rezultatelor, folosit ca "instrument de măsură" universal,

b) aparținând condițiilor reale de efectuare a experimentului, mai exact metodelor și mijloacelor folosite.

În ceea ce privește sistemul de achiziții și prelucrare a datelor, nu ne vom referi la erorile introduse de circuitele de adaptare semnal și de placa de achiziție, care au fost expuse deja în capitolul 2 al prezentei lucrări, ce se pot considera constante, ci la cele rezultate în urma prelucrării numerice a semnalelor, în general variabile și depinzând în mare măsură de caracteristicile regimului de funcționare al sistemului în care se face achiziția. Astfel:

Achizițiile au fost făcute pe 6, respectiv 8 canale (atunci când a fost achiziționat și al patrulea curent - curentul pe conductorul neutru) cu o rată de eșantionare de 40000,

respectiv 50000 eșantioane/sec., ceea ce a condus la obținerea unui număr de puncte achiziționate pe o perioadă în jur de 133, respectiv 125.

Așa cum a fost prezentat în capitolul 2 aceasta asigură precizia dorită a procesului de prelucrare numerică a semnalelor achiziționate, inclusiv pentru armonica de rang 40.

Totuși, având în vedere că prelucrarea numerică a semnalelor periodice (calculul valorii efective de exemplu) are la bază determinarea numărului de puncte achiziționate pe o perioadă și cum acest număr nu poate fi unul fracționar, aceasta este o primă sursă de erori.

Eroarea de determinare a numărului de puncte pe o perioadă, la frecvența de 50 Hz, în cazul obținerii a $133 \div 134$ puncte în loc de 133,33 și a 124 (126) în loc de 125 este de $(-0,25 \div +0,14)\%$, respectiv de $\pm 0,8\%$. Efectul său este foarte redus asupra calculării valorii efective, dar este relativ mare la calculul fazei. În cazul de față de $(-0,07^\circ \div +0,14^\circ)$, respectiv de $\pm 0,22^\circ$. Aceste erori se adaugă celor cauzate de eșantionarea prin scanare nesimultană a celor 6, respectiv 8 canale pe care se face achiziția. La 133 respectiv 125 eșantioane pe o perioadă, defazajul corespunzător distanței în timp între două eșantioane consecutive este de $2,72^\circ$ respectiv $2,9^\circ$. În cadrul sistemului de achiziție utilizat s-au efectuat corecții prin soft-ul folosit, corecții care depind de numărul de canale eșantionate, de rata de eșantionare și de frecvența semnalelor achiziționate. Se estimează totuși prezența unei erori de determinare a fazelor semnalelor periodice de $\pm 1,5^\circ$.

Regimul deformant este prezent atât în tensiuni, cât și în curenți:

- Regimul deformant în tensiuni (coeficient de deformare de maxim 2%) se datorează în principal sursei de alimentare al montajului folosit. Este vorba de un autotransformator trifazat de 40 kVA în conexiune Y_0/y_0 .

- Regimul deformant în curenți se datorează :

- a) tensiunilor de alimentare, atunci când elementul de circuit se poate considera liniar (cazul rezistoarelor sau bobinelor - deformări ale curenților de maxim 2%) ;
- b) neliniarității elementelor de circuit (cazul condensatoarelor - deformări ale curenților de până la 11% ;
- c) prezenței dispozitivelor de comutație statică care, în funcție de unghiul de deschidere al tiristoarelor, poate produce deformarea curentului comandat de până la 100%.

O suprapunere a efectelor de deformare ale undelor curenților prin elementele de circuit conduce la o deformare a curenților pe fazele compensatoarelor de până la 74,3%, respectiv a curenților absorbiți din rețea de către ansamblul consumator - compensator de până la 19,1%.

Dacă efectele deformărilor din undele tensiunilor asupra rezultatelor calculate se pot neglija, nu același lucru se poate spune în cazul curenților. Nu este vorba de corectitudinea calculului valorilor efective și a fazelor (față de momentul începerii achiziției) ci a faptului că aceste mărimi au fost folosite la definirea fazorială a curenților achiziționați prin valoarea efectivă și faza respectivă, ca și în cazul unei mărimi perfect sinusoidale. Ceea ce este o reprezentare aproximativă.

Această reprezentare a fost necesară pentru a permite apoi determinarea componentelor de secvență corespunzătoare curenților de fază din secțiunea circuitului în care s-a făcut achiziția, cu scopul evaluării circulației curenților și puterilor pentru fiecare componentă în parte, în interiorul ansamblului consumator - compensator și comparării lor cu valorile calculate.

Erorile obținute la calculul puterilor active și reactive pe faze, prin utilizarea componentelor active și reactive ale curenților pe faze, rezultă în urma reprezentării amintite

mai sus, se poate vedea prin comparație cu valorile corecte, calculate ca sume algebrice ale puterilor active , respectiv reactive de pe toate armonicile.

De pildă la experimentul nr. 2 (fișierul PS3.TXT) o comparație între cele două seturi de puteri pe fazele rețelei, calculate așa cum s-a expus mai sus:

$$\begin{array}{l}
 P_R = 486,9926 \text{ W} \\
 P_S = 483,1872 \text{ W} \\
 P_T = 487,4418 \text{ W} \\
 \\
 Q_R = -5,6234 \text{ var} \\
 Q_S = -34,2458 \text{ var} \\
 Q_T = 62,2018 \text{ var}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \sum_{k=1}^{40} P_{Rk} = 484,8976 \text{ W} \\
 \sum_{k=1}^{40} P_{Sk} = 482,6996 \text{ W} \\
 \sum_{k=1}^{40} P_{Tk} = 489,1788 \text{ W} \\
 \\
 \sum_{k=1}^{40} Q_{Rk} = 14,4990 \text{ var} \\
 \sum_{k=1}^{40} Q_{Sk} = 13,3660 \text{ var} \\
 \sum_{k=1}^{40} Q_{Tk} = 12,7602 \text{ var}
 \end{array}$$

relevă erori de calculul puterilor active pe faze de +0,43%, +0,1%, respectiv -0,35% dar erori mult mai mari la calculul puterilor reactive. Evident că erorile cresc cu atât mai mult cu cât valoarea absolută a mărimii este mai apropiată de zero. De aceea o comparație procentuală în această situație nu este relevantă.

La erorile de calcul amintite mai sus se adaugă cele cauzate de condițiile reale de execuție ale experimentelor, explicate de altfel în cadrul prezentării și interpretării rezultatelor. Le reamintim mai jos:

- existența unor conductanțe relativ mari în schemele echivalente ale bobinelor și condensatoarelor folosite (corespunzătoare pierderilor de putere activă în acestea) conductanțe considerate nule în modelul matematic și neglijate la dimensionarea compensatoarelor; (cu excepția primului experiment în care s-a făcut corecția ce ține seama de conductanța bobinei compensatorului);

- nesimetria sistemului de tensiuni de alimentare, datorată în principal autotransformatorului trifazat în secundarul căruia am conectat montajul. Această nesimetrie s-a manifestat prin apariția componentei de secvență inversă în tensiunile de linie și în plus a componentei de secvență homopolară în tensiunile de fază, care împreună cu componentelor similare ale curenților, au produs o circulație de puteri pe secvențele respective, care evident au denaturat bilanțul puterilor pe ansamblul consumator - compensator;

- conceput pentru achiziționarea a trei tensiuni și trei curenți, sistemul de achiziție nu a permis măsurarea simultană a curenților în toate secțiunile de interes ale circuitului. (Modul de lucru a fost următorul: se instala sistemul de achiziție în secțiunea de interes, se ridică tensiunea de la zero la valoarea nominală, se ajustau reglajele, se făcea achiziția, se cobora tensiunea la zero, se instala sistemul de achiziție în altă secțiune și așa mai departe). Acest aspect, adăugat la faptul că tensiunile de alimentare erau de cele mai multe ori modificate, datorită variațiilor tensiunii rețelei și datorită jocului mecanic inerent al sistemului cursorului autotransformatorului de alimentare, au constituit motive suplimentare pentru ca bilanțurile circulațiilor curenților, respectiv ale puterilor să fie denaturate.

Cu toate acestea este ușor de observat că experimentele prezentate în acest capitol demonstrează cu succes în principal aspectele calitative dar și cele cantitative ale fenomenelor descrise în modelele matematice ale compensării puterii reactive în rețele trifazate cu sarcini dezechilibrate cu trei, respectiv patru conductoare .

O concluzie cel puțin la fel de importantă ca prima constă în faptul că se confirmă posibilitatea folosirii susceptanțelor variabile realizate cu dispozitive statice în soluția prezentată în subcapitolul 5.3.

Principalele caracteristici ale acestora și anume:

- flexibilitate - posibilitatea trecerii continue din caracter inductiv în capacitiv și invers;
- rapiditatea comutației - putându-se trece între cele două regimuri, la extremitățile lor, în mai puțin de o semiperioadă;
- posibilitatea realizării unui reglaj fin,

le fac ideale ca element de execuție al unui sistem automat de compensare on-line în rețelele trifazate reale, care după cum se știe, în evasi-generalitatea lor, funcționează în regimuri dezechilibrate. Algoritmul procesului de reglaj, care se va concretiza în stabilirea legilor de comandă ale tiristoarelor, poate avea deci la bază modelele matematice dezvoltate în această lucrare.

Capitolul 6

COMPENSAREA PUTERII REACTIVE ÎN REȚELELE DE DISTRIBUȚIE CE FUNCȚIONEAZĂ ÎN REGIMURI NESIMETRICE ȘI NESINUSOIDALE

6.1. Aspecte generale

Regimurile reale de funcționare ale rețelelor de distribuție sunt mai mult sau mai puțin apropiate prin caracteristicile ce le definesc, de unul ideal, de tipul celui folosit pentru calcule și demonstrații matematice. Deși aceste regimuri sunt cât se poate de normale și reflectă în permanență relațiile de interdependență existente între toate elementele componente ale unui sistem electroenergetic stabil, au fost denumite **regimuri perturbate**. Nesimetriile de curent și/sau tensiuni, deformările din undele de curent și/sau tensiune, flickerul, golurile de tensiune, supratensiunile etc. constituie abateri de la regimul ideal de funcționare, regim pe baza căruia s-au construit toate modelele matematice folosite la construcția echipamentelor, proiectarea sistemului și calculul regimurilor normale de funcționare.

Optimizarea regimurilor normale de funcționare ale rețelelor electrice de distribuție include pe lângă acțiunile care nu sunt în legătură directă cu aceste perturbații cum ar fi de pildă cele ce urmăresc minimizarea pierderilor de putere activă, reglajul tensiunii, etc., pe cele care vizează atât cauzele cât și efectele perturbațiilor.

Accastă delimitare se poate face însă doar didactic, cu scop de sistematizare însă practic există o interdependență directă între aceste acțiuni. Cunoașterea consecințelor aplicării fiecăreia dintre ele este absolut obligatorie deoarece în multe cazuri aplicarea unor metode sau mijloace cu scopul de îmbunătățire a regimului dintr-un anumit punct de vedere poate fi dăunătoare din alte puncte de vedere. Optimizarea regimurilor de funcționare constă deci în găsirea celui mai bun compromis din punct de vedere tehnic între soluțiile cunoscute, fără a neglija bineînțeles restricțiile economice.

Metoda de intervenție cea mai eficientă dar și cu cel mai mare impact asupra regimurilor de funcționare ale unei rețele este **reglarea circulației de putere reactivă**, întâlnită de cele mai multe ori sub titulatura de **compensarea puterii reactive** și aplicată în rețelele de distribuție în principal cu scopul de micșorare a circulației acesteia pe elementele de rețea (**îmbunătățirea factorului de putere**) dar și ca mijloc auxiliar de reglare a tensiunii.

Deși nu se întâlnește sub formă de "lucru util" în instalațiile de producere sau utilizare a energiei electrice, puterea reactivă este absolut necesară în funcționarea acestora. În plus, circulația puterii reactive pe elementele de rețea deși nu conduce la nimic bun, este inevitabilă, acestea fiind ele însele consumatoare sau producătoare de energie reactivă. Iără

a intra în alte amănunte, se poate spune deci că puterea reactivă este un rău necesar, optimizarea circulației de putere reactivă conducând în multe situații la optimizarea funcționării rețelelor de transport și distribuție.

În rețelele de distribuție se acționează cel mai adesea asupra circulației de putere reactivă în sensul micșorării puterii reactive inductive care circulă prin elementele rețelei furnizorului. Se micșorează astfel pierderile de putere activă și pierderile de tensiune, îmbunătățindu-se totodată randamentul distribuției.

Compensarea capacitivă transversală folosită în acest scop este realizată cu baterii de condensatoare cărora, în ultima vreme, li s-au adăugat dispozitive de comutație statică, comandate de automate realizate cu microcontrolere sau microprocesoare ce au ridicat substanțial eficiența compensării prin aceea că au conferit posibilitatea unui reglaj continuu în funcție de circulația de reactiv sau de nivelul tensiunii în secțiunea de interes.

Așa cum s-a văzut în capitolele anterioare, tot prin compensarea puterii reactive se poate face echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei. De data aceasta, compensatorul va interveni în mod diferit pe cele trei faze, susceptanțele echivalente fiind capacitive sau inductive, valorile lor, dependente de natura și mărimea dezechilibrului, așa cum s-a arătat în capitolele anterioare, putându-se regla foarte exact.

Elementele reactive introduse în rețea prin intermediul compensatoarelor amintite, în speță condensatoarele, conduc și la o serie de neajunsuri. Astfel, reactanța capacitivă transversală echivalentă trebuie dimensionată ținând cont și de restricția de a nu conduce la condiția de rezonanță, ce poate apare prin alăturarea sa, impedanței inductive echivalente a rețelei, "văzute" în secțiunea în care a fost montat compensatorul.

Iată deci, într-o prezentare sumară, câteva dintre elementele care explică existența unei strânse interdependențe între acțiunile ce urmăresc îmbunătățirea factorului de putere, echilibrarea sarcinii, respectiv filtrarea curenților armonici în rețelele electrice de distribuție. În capitolul de față s-a soluționat problema stabilirii unei corelații analitice și apoi calitative și cantitative între cele trei elemente amintite mai sus. De asemenea s-a stabilit conexiunea între efectele acestor acțiuni și calitatea tensiunii în rețeaua de distribuție, demers absolut necesar în contextul problemei generale a optimizării funcționării acesteia.

6.2. Interdependența acțiunilor ce urmăresc îmbunătățirea factorului de putere, echilibrarea sarcinii respectiv filtrarea curenților armonici.

De regulă cele trei probleme sunt abordate în moduri diferite și de cele mai multe ori distinct, considerându-se că sunt independente și că soluționarea lor poate fi făcută separat. Așa cum s-a menționat, cea mai cunoscută este compensarea puterii reactive cu scopul îmbunătățirii factorului de putere, apoi, după caz, echilibrarea sarcinii sau atenuarea regimului nesinusoidal. De multe ori în practică, se abordează simultan câte două aspecte, de exemplu compensarea și filtrarea ([30], [41]) sau compensarea și echilibrarea ([13], [62], [90]), desconsiderându-se cel de-al treilea. De obicei compensarea puterii reactive se soluționează simultan cu atenuarea regimului nesinusoidal, așa cum s-a precizat mai sus, neținându-se cont de regimul nesimetric al sarcinii. Experiența dovedește însă că regimul nesimetric însoțește întotdeauna pe cel nesinusoidal ([53], [56], [91], [110]).

Circulația puterii reactive, dezechilibrul sarcinii și/sau al tensiunii și regimul deformant în curenți și/sau în tensiuni se intercon condiționează în permanență, motiv pentru care acțiunile întreprinse pentru ameliorarea regimurilor de funcționare se află în aceeași relație.

Unul dintre indicatorii importanți pentru analiza eficienței regimurilor de funcționare ale rețelelor electrice, este factorul de putere. Expresia sa cea mai cunoscută este însă

valabilă numai pentru regimul echilibrat și sinusoidal al unei rețele electrice trifazate. În ultima perioadă în literatura de specialitate internațională a curs însă multă cerneală în tentativa găsirii unei definiții valabile pentru regimuri nesimetrice și nesinusoidale, unanim acceptate [61], [70], [94], [114]. Sub acest aspect trebuie remarcate și contribuțiile unor specialiști români [37].

Pentru că indicatorul menționat va fi folosit și în analiza prezentată în capitolul de față, în cele ce urmează se prezintă elementele care au stat la baza definiției sale.

6.2.1. Definirea unui factor de putere în regim nesimetric și nesinusoidal.

6.2.1.1. Elemente introductive

Definirea factorului de putere în regim nesimetric și dezechilibrat este legată fără îndoială de două aspecte esențiale și anume:

- definirea puterilor în sistemele trifazate ce funcționează în regim nesimetric și dezechilibrat,
- posibilitatea de măsurare practică a factorului de putere și semnificația fizică a componentelor sale.

La aceste două aspecte se adaugă și acela legat de faptul că multă vreme cele două probleme: regimul nesimetric pe de o parte iar pe de altă parte regimul nesinusoidal au fost abordate separat, încercându-se apoi de cele mai multe ori o extensie a definiției factorului de putere dintr-un regim în celălalt.

Referindu-ne la definirea puterilor și a factorului de putere în regimuri nesimetrice și/sau nesinusoidale trebuie menționate lucrările de referință ale lui Budeanu [27], Țugulea [102], [103], [104], Frize [61], Emanuel [52], [53], [54], Kusters și Moore [70], Filipski [59], [60], Czarnecki [43], [50], Arseneau [31], care au jalonat evoluția electrotehnicii în acest domeniu, fără îndoială.

IEEE Working Group on nonsinusoidal situations [114] referindu-se la lucrările celor mai sus menționați, definește în sistemele trifazate următoarele:

- Puterea aparentă echivalentă S_e :

$$S_e = 3 \cdot U_e \cdot I_e \quad (6.1)$$

unde:

$$U_e = \sqrt{\frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{3}} \quad I_e = \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}} \quad (6.2)$$

pentru rețelele cu patru conductoare, iar în cele cu trei conductoare:

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2}{9}} \quad (6.3)$$

- Mărimile echivalente : tensiunea U_e și curentul I_e , ca valori efective, prezintă câte două componente - una corespunzătoare fundamentalei și alta nefundamentalei:

$$U_e^2 = U_{e1}^2 + U_{ek}^2 \quad I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{ek}^2 \quad (6.4)$$

unde:

$$U_{e1}^2 = \frac{U_{R1}^2 + U_{S1}^2 + U_{T1}^2}{3} \quad I_{e1}^2 = \frac{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2}{3} \quad (6.5)$$

$$U_{ek}^2 = \sum_{k \neq 1} \left[\frac{U_{Rk}^2 + U_{Sk}^2 + U_{Tk}^2}{3} \right] \quad I_{ek}^2 = \sum_{k \neq 1} \left[\frac{I_{Rk}^2 + I_{Sk}^2 + I_{Tk}^2}{3} \right] \quad (6.6)$$

Ca urmare și puterea aparentă are două componente, una fundamentală S_{e1} și alta nefundamentală S_{eN} , adică:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (6.7)$$

Se definește distorsiunea armonică totală echivalentă (de fapt reziduul deformant - *Total Harmonic Distorsion*) pentru tensiune respectiv curent ca fiind:

$$UTHD_e = U_{ek} / U_{e1} \quad \text{și} \quad ITHD_e = I_{ek} / I_{e1} \quad (6.8)$$

și corespunzător puterea aparentă nefundamentală normalizată:

$$\left[\frac{S_{eN}}{S_{e1}} \right]^2 = (UTHD_e)^2 + (ITHD_e)^2 + (UTHD_e \cdot ITHD_e) \quad (6.9)$$

Puterea aparentă fundamentală S_{e1} poate fi divizată în doi termeni unul corespunzător secvenței directe fundamentale S_{d1} și altul corespunzător puterii aparente dezechilibrate fundamentale (puterii aparente de nesimetrie pe fundamentală) S_{n1} , adică :

$$S_{e1}^2 = S_{d1}^2 + S_{n1}^2 \quad (6.10)$$

Puterea aparentă fundamentală se poate descompune de asemenea în componentele activă respectiv reactivă.

$$\text{Gradul de poluare armonică se apreciază după mărimea raportului} \quad \frac{S_{eN}}{S_{e1}} \quad (6.11)$$

$$\text{Gradul de poluare nesimetrică se apreciază prin raportul} \quad \frac{S_{n1}}{S_{e1}} \quad (6.12)$$

În aceste condiții apare firească definiția unui factor de putere fundamental KF_1 , prin relația :

$$KF_1 = \frac{Re(S_{e1})}{S_{e1}} = \frac{P_{e1}}{S_{e1}} \quad (6.13)$$

și a altuia total :

$$KF = \frac{Re(S_e)}{S_e} \quad (6.14)$$

6.2.1.2. Criterii pentru definirea unui factor de putere

În lucrările lor, prof. Țugulea [102], [103] precum și Emmanuel care-l citează pe Țugulea [52], [53], evidențiază câteva criterii care trebuie să stea la baza definiției unui factor de putere în regim armonic. Cum acest regim în rețelele trifazate apare întotdeauna însoțit de cel nesimetric [53], [56], putem vorbi de un factor de putere definit în regim deformant și dezechilibrat. Astfel, criteriile amintite sunt :

- ◆ factorul de putere trebuie să permită aprecierea gradului de utilizare a puterii active disponibile pentru un receptor alimentat de la rețea. De regulă prin putere disponibilă activă maximă se înțelege puterea pe care receptorul o poate primi de la generatoarele ce debitează în rețea fără a determina pierderi suplimentare în rețea, față de pierderile pe care le determină alimentarea sa reală;
- ◆ factorul de putere trebuie să dea informații despre așa numitul consum tehnologic din rețea determinat de alimentarea unui receptor deformant cu o anumită putere activă;
- ◆ factorul de putere, prin definiția lui, trebuie să conțină indicații privind căile de aducere a valorii sale la valoarea optimală;
- ◆ în regim permanent (sinusoidal, simetric), definiția trebuie să se reducă la definiția clasică, cunoscută;
- ◆ factorul de putere trebuie să poată fi măsurat cât mai simplu, cu mijloace de măsură deja existente fără a reclama mijloace suplimentare. De asemenea urmărirea lui trebuie să se realizeze prin dezvoltarea normativelor deja existente.

Desigur aceste criterii trebuie privite reunit, într-un tot unitar. În construcția definițiilor întâlnite în literatură se pornește de obicei de la unul dintre aceste criterii și se verifică apoi cum sunt îndeplinite celelalte. Deși se pare că factorul de putere este o mărime proprie consumatorului, prin criteriile impuse rezultă că valoarea lui depinde de interacțiunea cu rețeaua. Astfel, în [104] se arată că schimbând rețeaua de alimentare chiar dacă se păstrează frecvența fundamentală și tensiunea nominală a rețelei, factorul de putere se schimbă.

Mai mult, valoarea factorului de putere nu ne indică direcția în care trebuie acționat pentru îmbunătățirea lui. Rezultă că definiția factorului de putere trebuie să conțină informații referitoare la caracteristicile regimului dezechilibrat și nesinusoidal. Acestea sunt reflectate de obicei prin coeficienții de nesimetrie și nivelul armonicilor.

6.2.1.3. Definierea unui factor de putere în rețelele electrice trifazate funcționând în regim nesimetric și nesinusoidal

Dacă se are în vedere gradul de utilizare a puterii active disponibile și legat de aceasta, circulația puterilor de secvență și a celor armonice în rețea ([101], [102], [103]), factorul de putere poate fi definit ca fiind ([103]):

$$k_p = \frac{P}{P_{max}} = \frac{P}{S_{d1}} = \frac{P_1 + P_d}{3 \cdot U_{d1} I_{d1}} = \frac{P_{d1} + P_{i1} + P_{h1} + P_d}{S_{d1}} \quad (6.15)$$

sau:

$$k_p = \frac{3U_{d1}I_{d1} \cos\varphi_{d1} + 3U_{i1}I_{i1} \cos\varphi_{i1} + 3U_{h1}I_{h1} \cos\varphi_{h1} + \sum_{f=R,S,T} \sum_{k \neq 1} (U_{kf} I_{kf} \cos\varphi_{kf})}{3U_{d1}I_{d1}} \quad (6.16)$$

unde semnificația puterilor active și a factorilor ce apar în expresia lor este evidentă.

Dacă se introduce mărimile caracteristice regimului dezechilibrat și nesinusoidal, expresia lui k_p devine:

$$\begin{aligned} k_p &= \cos\varphi_{d1} + k_{m1} \cdot k_{n1} \cdot \cos\varphi_{i1} + k_{m11} \cdot k_{n11} \cdot \cos\varphi_{h1} + \sum_{f=R,S,T} \sum_{k \neq 1} (\gamma_{Ukf} \cdot \gamma_{Ikf} \cdot \cos\varphi_{kf}) = \\ &= \cos\varphi_{d1} + \gamma_{Si} \cdot \cos\varphi_{i1} + \gamma_{Sh} \cdot \cos\varphi_{h1} + \sum_{f=R,S,T} \sum_{k \neq 1} (\gamma_{Skf} \cos\varphi_{kf}) \end{aligned} \quad (6.17)$$

unde $k_{mi1}, k_{ni1}, k_{nai1}, k_{nai1}$ sunt coeficienții de disimetrie respectiv de asimetrie pe fundamentală, pentru tensiuni și curenți :

$$k_{mi1} = \frac{U_{i1}}{U_{d1}} \quad ; \quad k_{ni1} = \frac{I_{i1}}{I_{d1}} \quad ; \quad k_{nai1} = \frac{U_{h1}}{U_{d1}} \quad ; \quad k_{nai1} = \frac{I_{h1}}{I_{d1}} \quad (6.18)$$

$\gamma_{Ukf}, \gamma_{Ikf}$ - nivelul armonicii k de tensiune respectiv curent, pe faza f :

$$\gamma_{Ukf} = \frac{U_{kf}}{U_{d1f}} \quad ; \quad \gamma_{Ikf} = \frac{I_{kf}}{I_{d1f}} \quad (6.19)$$

$\gamma_{Si}, \gamma_{Sh}, \gamma_{Skf}$ - ponderile relative ale puterilor aparente inversă, homopolară și armonice față de puterea aparentă directă pe fundamentală.

$$\gamma_{Si} = \frac{S_{i1}}{S_{d1}} \quad ; \quad \gamma_{Sh} = \frac{S_{h1}}{S_{d1}} \quad ; \quad \gamma_{Skf} = \frac{S_{kf}}{S_{d1f}} \quad (6.20)$$

Se notează cu :

$$k_p^s = \cos\varphi_{d1} \quad (6.21)$$

- *factorul de putere fundamental sau de simetrie*, care ține cont de consumul de putere reactivă pe secvența directă a armonicii fundamentale,

$$k_p^n = \gamma_{Si} \cdot \cos\varphi_{i1} + \gamma_{Sh} \cdot \cos\varphi_{h1} \quad (6.22)$$

- *factorul de putere nesimetric* care ține seama de nesimetria regimului fundamentalei,

$$k_p^d = \sum_{f=R,S,T} \sum_{k>1} (\gamma_{Skf} \cos\varphi_{kf}) \quad (6.23)$$

- *factorul de putere deformant*, care ține seama de circulația puterilor active armonice pe toate cele trei faze.

Se poate scrie deci :

$$k_p = k_p^s + k_p^n + k_p^d \quad (6.24)$$

De regulă $k_p^n < 0$ și $k_p^d < 0$, astfel încât în regimuri reale, necompensate $k_p < \cos\varphi_{d1}$.

Valoarea *optimă a factorului de putere* k_p rămâne 1 în condițiile în care $k_p^n = 0$ și $k_p^d = 0$, obținerea lui realizându-se prin adoptarea simultană a celor trei măsuri: compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor. Cele trei măsuri nu sunt independente, depinzând de structura internă a consumatorului. În unele cazuri *factorul de putere poate deveni supraunitar*, fapt ce indică absorbția de putere activă nesimetrică și putere activă reziduală de la alte receptoare dezzechilibrate și deformante.

Într-o situație mai simplă când sistemul de tensiuni este mai puțin dezzechilibrat iar curbele tensiunilor de fază sunt puțin distorsionate *se poate defini un factor de putere avându-se în vedere pierderile de putere determinate de curenții nesimetrici și nesinusoidalii în rețeaua de alimentare*, astfel:

$$k_p = \sqrt{\frac{\Delta P_{min}}{\Delta P}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{c.e.f}}{\Delta P}} \quad (6.25)$$

unde $\Delta P_{c,e,f}$ sunt pierderile de putere pe linia de alimentare (elementul de rețea din amonte) în situația compensării puterii reactive, echilibrării și filtrării, adică:

$$\Delta P_{c,e,f} = 3I_{ld}^2 \cdot \cos\varphi_{ld}^2 \cdot R_l \quad (6.26)$$

R_l fiind rezistența pe fundamentală a liniei.

În ceea ce privește pierderile ΔP acestea au expresia:

$$\Delta P = 3 \sum_{k=1} \left(I_{dk}^2 + I_{ik}^2 + I_{hk}^2 \right) \cdot R_k + 9 \sum_{k=1} I_{hk}^2 \cdot R_{Nk} \quad (6.27)$$

R_{Nk} fiind rezistența conductorului neutru în planul armonicii k .

Înlocuind pe ΔP dat de relația (6.27) în expresia lui k_p dată de relația (6.25) se obține:

$$k_p = \frac{\cos\varphi_{d1}}{\sqrt{1 + \sum_{k>1} \gamma_{ldk}^2 + k_{n1}^2 \cdot \left[1 + \sum_{k>1} \gamma_{lik}^2 \right] + k_{n1}^2 \cdot \left[1 + \sum_{k>1} \gamma_{lhk}^2 \right] + 3 k_{n1}^2 \sum_{k>1} \gamma_{lhk}^2 \cdot \frac{R_{Nk}}{R_l}}} \quad (6.28)$$

unde $\gamma_{ldk}, \gamma_{lik}, \gamma_{lhk}$ sunt nivelurile armoniilor de curent de secvență directă, inversă și homopolară în planul armonicii k .

$$\gamma_{ldk} = \frac{I_{dk}}{I_{d1}} \quad ; \quad \gamma_{lik} = \frac{I_{ik}}{I_{i1}} \quad ; \quad \gamma_{lhk} = \frac{I_{hk}}{I_{h1}} \quad (6.29)$$

Dacă linia de alimentare este fără conductor neutru, curentul homopolar este nul, și toate relațiile de mai sus vor căpăta forme particulare.

Deși simplistă, întrucât nu consideră nesimetria și deformarea tensiunilor, relația (6.28) rămâne sugestivă din punct de vedere calitativ prin aceea că oferă o dependență directă a factorului de putere de gradul de nesimetrie și de nivelul armoniilor curenților.

6.2.2. Elemente de calcul

În cadrul analizei care urmează se va considera o rețea având o configurație concretă, simplă, prezentată în figura 6.1. Este vorba de un consumator echivalent dezechilibrat și deformant racordat într-o rețea de 20 kV, o linie electrică ce leagă consumatorul de sursă, aceasta din urmă fiind constituită de barele de medie tensiune ale unei stații de transformare.

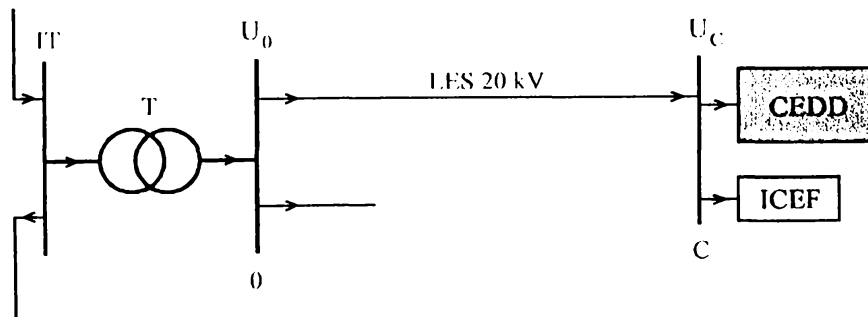


Fig. 6.1. Schema electrică simplificată a rețelei considerate pentru studiu.

CEDD - consumator echivalent dezechilibrat și deformant ;
ICEF - instalație de compensare-echilibrare-filtrare.

Se vor considera pe rând situațiile care pot interveni în practică :

- nu se intervine în nici un fel pentru ameliorarea regimului de funcționare ;
- se acționează doar pentru rezolvarea uneia dintre cele trei probleme ;
- se acționează pentru rezolvarea simultană a două dintre cele trei probleme ;
- se acționează pentru rezolvarea simultană a celor trei probleme.

Pentru fiecare dintre aceste situații se dimensionează instalațiile pentru compensare, se calculează circulația de curenți în ansamblul consumator - compensator, după care se determină indicatorii necesari analizei interdependenței acțiunilor de optimizare. Se vor folosi atât relațiile de calcul uzuale, cât și cele dezvoltate în capitolul al treilea, referitoare la echilibrarea prin compensare a sarcinilor dezechilibrate. În paragrafele care urmează se prezintă și celelalte relații necesare pentru elaborarea unei aplicații numerice.

Calculul au fost efectuate în condițiile adoptării unor ipoteze simplificatorii. Pentru început se precizează cele mai importante dintre acestea : *tensiunile sursei se constituie într-un sistem perfect simetric și echilibrat, unde corespunzătoare fiind nedeformate (perfect sinusoidale). De asemenea sursa se consideră de putere foarte mare (teoretic infinită, astfel încât caracteristicile amintite mai sus pentru sistemul tensiunilor sale să nu se modifice odată cu modificarea dezechilibrului sau a regimului deformant din curenții de sarcină.*

Rezultă că regimurile nesimetrice și deformante se manifestă în curenții din întreaga rețea și în tensiunile de la bornele consumatorului.

6.2.2.1. Cazul 1. Nu se intervine pentru ameliorarea regimului de funcționare.

În ipotezele de calcul precizate mai sus, "racordul" între regimurile simetrice și sinusoidale în curenți și cele dezechilibrate și nesinusoidale de asemenea în curenți, se poate face, așa cum s-a văzut, prin descompunerea armonică a curbilor curenților de fază, urmată de o descompunere a curenților armonici pe faze în componentele simetrice corespunzătoare.

Astfel, suma pierderilor de putere activă pe cele trei faze ale elementului de rețea din amonte de receptorul nesimetric și dezechilibrat, în exemplul considerat linia electrică subterană, poate fi scrisă cu expresia :

$$\Delta P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (I_{dk}^2 + I_{ik}^2) \cdot R_k \quad (6.30)$$

care este de fapt expresia (6.27) scrisă în condițiile rețelei cu trei conductoare. Rezistența electrică poate fi considerată aceeași în planul tuturor armonicilor, egală cu cea de secvență directă. Valoarea pierderilor calculate cu această expresie se va compara cu valoarea minimă, obținută în condițiile compensării totale a puterii reactive pe fundamentală, echilibrării perfecte a sarcinii pe fazele rețelei și filtrării tuturor armonicilor de curent, de ordin superior, injectate de consumator în rețea, calculate cu expresia (6.26).

Factorul de putere, calculat prin folosirea pierderilor de putere, cu relația (6.25), va fi obținut din relația (6.28) :

$$k_p = \frac{I_{d1} \cdot \cos\varphi_{d1}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{dk}^2 + I_{ik}^2)}} = \frac{\cos\varphi_{d1}}{\sqrt{1 + k_{n1}^2 + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(I_{dk}^2 + I_{ik}^2)}{I_{d1}^2}}} = \frac{\cos\varphi_{d1}}{\sqrt{1 + k_{n1}^2 \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{Iik}^2\right) + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{Idk}^2}} \quad (6.31)$$

Din analiza expresiei factorului de putere se constată că aceasta pune în evidență atât regimul nesimetric, prin intermediul coeficientului de disimetrie k_{n1} , cât și pe cel

nesinusoidal, prin nivelul curenților armonici de secvență directă și inversă pentru armonicile de rang mai mare decât unu, γ_{ldk} și γ_{lik} .

În ceea ce privește efectul celor trei elemente și anume circulația puterii reactive pe fundamentală, dezechilibrul curenților respectiv nesinusoidalitatea acestora asupra creșterii pierderilor în rețea, acesta este diferit. Dacă se consideră reducerea pierderilor prin aplicarea celor trei acțiuni de optimizare ca fiind :

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{min}} = \frac{1 + k_{ni1}^2 \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{lik}^2\right) + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{ldk}^2}{\cos^2 \varphi_{d1}} \quad (6.32)$$

se poate stabili sensibilitatea reducerii pierderilor cu fiecare dintre acțiunile amintite, calculând derivatele parțiale. Astfel, sensibilitatea reducerii pierderilor cu echilibrarea sarcinii pe fundamentală, este :

$$\frac{\partial (\Delta P / \Delta P_{min})}{\partial k_{ni1}} = 2 \cdot k_{ni1} \frac{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{lik}^2}{\cos^2 \varphi_{d1}} \quad (6.33)$$

apoi în raport cu atenuarea armonicilor :

$$\frac{\partial (\Delta P / \Delta P_{min})}{\partial \gamma_{lik}} = \frac{2 \cdot k_{ni1} \cdot \gamma_{lik}}{\cos^2 \varphi_{d1}} \quad (6.34)$$

respectiv :

$$\frac{\partial (\Delta P / \Delta P_{min})}{\partial \gamma_{ldk}} = \frac{2 \cdot \gamma_{ldk}}{\cos^2 \varphi_{d1}} \quad (6.35)$$

iar în raport cu îmbunătățirea factorului de putere pe fundamentală :

$$\frac{\partial (\Delta P / \Delta P_{min})}{\partial \cos \varphi_{d1}} = -\frac{2}{\cos^3 \varphi_{d1}} \left[1 + k_{ni1}^2 \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{lik}^2\right) + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{ldk}^2 \right] \quad (6.36)$$

Din analiza expresiilor (6.33÷6.36) precum și dacă se au în vedere valorile uzuale ale mărimilor ce intervin în aceste relații, rezultă că eficiența acțiunilor de optimizare sub aspectul reducerii pierderilor de putere este dată, în ordinea importanței, de :

- compensarea puterii reactive pentru îmbunătățirea factorului de putere;
- echilibrarea sarcinii;
- atenuarea armonicilor de curent.

6.2.2.2. Cazul 2. Se acționează numai pentru compensarea puterii reactive

Deoarece nu se ia în considerare prezența regimului dezechilibrat și nesinusoidal, pentru îmbunătățirea factorului de putere se efectuează o compensare capacitivă transversală simetrică. Valorile curenților de compensare, aceleași pe fiecare fază, se determină din condiția anulării componentei reactive a curentului de secvență directă corespunzător fundamentalei (după compensare): ($\cos \varphi_{d1}^c = 1$) :

$$I_m(I_{d1}^c) = 0 \quad (6.37)$$

Din care se obține conform relației (A6.6):

$$(I_{Rr1} + I_{C1}) + (I_{Sr1} + I_{C1}) + (I_{Tr1} + I_{C1}) = 0 \quad (6.38)$$

Rezultă:

$$I_{C1} = -\frac{1}{3}(I_{Rr1} + I_{Sr1} + I_{Tr1}) \quad (6.39)$$

În relațiile de mai sus $I_{Rr1}, I_{Sr1}, I_{Tr1}$ sunt curenții reactivi pe fundamentală de pe cele trei faze, iar I_{C1} curentul reactiv de compensare pe fundamentală. Relația (6.39) se poate obține și din condiția minimizării pierderilor de putere activă pe fundamentală, pe elementul de rețea din amonte.

$$\Delta P_1 = \left[I_{Ra1}^2 + (I_{Rr1} + I_{C1})^2 + I_{Sa1}^2 + (I_{Sr1} + I_{C1})^2 + I_{Ta1}^2 + (I_{Tr1} + I_{C1})^2 \right] R_1 = \min \quad (6.40)$$

Punând acum condiția:

$$\frac{\partial(\Delta P)}{\partial(I_{C1})} = 0 \quad (6.41)$$

se obțin pentru I_{C1} tocmai relația (6.39). Dacă compensarea se realizează cu ajutorul unui compensator Y, dimensionarea elementelor sale reactive se realizează chiar cu curentul de compensare rezultat prin aplicarea relației (6.39).

În acest caz, nu se intervine asupra componentei de secvență inversă pe fundamentală a curenților, în schimb componenta de secvență directă se reduce de la I_{d1} la $I_{d1}^c = I_{d1} \cos \varphi_{d1} = \text{Re}(\underline{I}_{d1})$, I_{d1} respectiv $\cos \varphi_{d1}$ fiind curentul de secvență directă respectiv factorul de putere pe fundamentală. Corespunzător, coeficientul de disimetrie pe fundamentală, după compensare, devine:

$$k_{m1} = \frac{I_{i1}}{I_{d1} \cos \varphi_{d1}} \quad (6.42)$$

creșcând cu atât mai mult cu cât factorul de putere înainte de compensare este mai mic.

Deci gradul de nesimetrie al regimului se accentuează.

6.2.2.3. Cazul 3. Se acționează numai pentru echilibrarea sarcinii

În acest caz se intervine asupra echilibrării sarcinii fără a se urmări îmbunătățirea factorului de putere sau atenuarea armonicilor. Așa cum s-a prezentat în capitolul 3, în rețelele trifazate cu trei conductoare este posibilă echilibrarea prin compensare a oricărui dezechilibru în regim normal de funcționare. Compensarea este nesimetrică și este posibilă cu ajutorul unui circuit în conexiune Δ , care conține numai susceptanțe, racordat în paralel cu rețeaua, în secțiunea în care se dorește echilibrarea.

În condițiile actuale, folosirea progreselor în electronica de putere și în automatizări, permite ca acest reglaj să se poată efectua on-line.

Curenții pe laturile compensatorului Δ se stabilesc din condiția anulării curenților de secvență inversă pe fundamentală, după compensare :

$$\begin{aligned} \text{Re}(\underline{I}_{i1}^c) &= 0 \\ \text{Im}(\underline{I}_{i1}^c) &= 0 \end{aligned} \quad (6.43)$$

Dar:
$$\underline{I}_{i1}^c = \underline{I}_{i1}^\Delta + \underline{I}_{i1}^S \quad (6.44)$$

Curentul de secvență inversă absorbit de sarcină pe fundamentală, calculat cu o relație similară cu (A6.6) este:

$$\underline{I}_{i1}^S = \frac{1}{6} \left[2I_{Ra1} - I_{Sa1} - I_{Ta1} + \sqrt{3}(I_{Sr1} - I_{Tr1}) \right] + j \frac{1}{6} \left[\sqrt{3}(I_{Sa1} - I_{Ta1}) - 2I_{Sr1} + I_{Sr1} + I_{Tr1} \right] \quad (6.45)$$

Curentul de secvență inversă absorbit de către compensatorul Δ pe fundamentală are o expresie similară cu (A6.24):

$$\underline{I}_{i1}^\Delta = \frac{1}{2} (I_{RS1}^\Delta - I_{TR1}^\Delta) + j \frac{1}{2\sqrt{3}} (-I_{RS1}^\Delta + 2I_{ST1}^\Delta - I_{TR1}^\Delta) \quad (6.46)$$

în care $I_{RS1}^\Delta, I_{ST1}^\Delta, I_{TR1}^\Delta$ sunt curenții reactivi pe fundamentală de pe laturile compensatorului Δ , necunoscutele problemei.

Pentru evitarea nedeterminării sistemului de două ecuații cu trei necunoscute care s-a format, se va folosi o relație suplimentară, independentă de primele două și anume cea rezultată din condiția ca circuitul Δ să nu intervină pe secvența directă a curenților din rețea (componenta de secvență directă corespunzătoare curenților pe fazele compensatorului să fie nulă):

$$I_{RS}^\Delta + I_{ST}^\Delta + I_{TR}^\Delta = 0 \quad (6.47)$$

Se obțin astfel pentru curenții de compensare soluțiile date de expresiile (3.70):

$$\begin{aligned} I_{RS1}^\Delta &= \frac{1}{3} (I_{Sa1} - I_{Ra1}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} (-I_{Rr1} - I_{Sr1} + 2I_{Tr1}) \\ I_{ST1}^\Delta &= \frac{1}{3} (I_{Ta1} - I_{Sa1}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} (2I_{Rr1} - I_{Sr1} - I_{Tr1}) \\ I_{TR1}^\Delta &= \frac{1}{3} (I_{Ra1} - I_{Ta1}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} (-I_{Rr1} + 2I_{Sr1} - I_{Tr1}) \end{aligned} \quad (6.48)$$

Curenții pe fazele compensatorului Δ , pe fundamentală, raportați fiecare la tensiunea de fază corespondentă se calculează cu expresiile (3.81):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{R1}^{\Delta*} &= \frac{1}{3} \left[-2I_{Ra1} + I_{Sa1} + I_{Ta1} + j(2I_{Rr1} - I_{Sr1} - I_{Tr1}) \right] \\ \underline{I}_{S11}^{\Delta*} &= \frac{1}{3} \left[-2I_{Sa1} + I_{Ta1} + I_{Ra1} + j(2I_{Sr1} - I_{Tr1} - I_{Rr1}) \right] \\ \underline{I}_{T1}^{\Delta*} &= \frac{1}{3} \left[-2I_{Ta1} + I_{Ra1} + I_{Sa1} + j(2I_{Tr1} - I_{Rr1} - I_{Sr1}) \right] \end{aligned} \quad (6.49)$$

În acest al doilea caz s-a obținut simetria perfectă pe fundamentala curenților pe fazele rețelei. Anulându-se factorul de disimetrie, factorul de putere al rețelei crește fără a fi însă modificat factorul de putere de secvență directă.

În schimb, întrucât fundamentala curentului se micșorează (prin anularea componentei de secvență inversă) nivelul armonicilor crește, deci regimul deformant în curenți se accentuează.

6.2.2.4. Cazul 4. Se acționează numai pentru filtrarea armonicilor de curent.

Soluția actuală, cel mai des întâlnită, datorită avantajelor tehnico-economice pe care le conferă la diminuarea regimului deformant produs de marii consumatori racordați în rețelele de distribuție, o constituie filtrele absorbante de armonici, care sunt de fapt circuite serie rezonante LC montate transversal, între rețea și pământ (derivație). Ne vom referi aici la varianta cea mai simplă a unui astfel de filtru, constituit în principal dintr-o singură inductivitate în serie cu o capacitate, numit *filtru trece bandă de ordinul 1*. (FTB1 fig.6.2.) [30], [82].

Observație. Nu se intenționează aici detalierea teoriei calculului și dimensionării filtrelor de armonici, ci doar de a prezenta foarte succint principiul funcționării și elementele de calcul de interes în contextul acestui subcapitol.

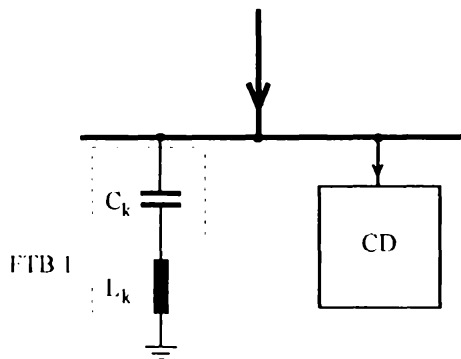


Fig. 6.2 Schema electrică monofilară a unui filtru trece-bandă de ordinul 1.

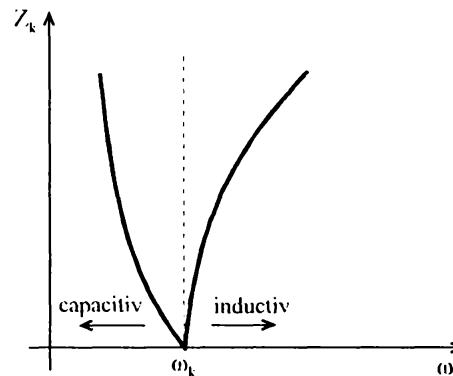


Fig. 6.3. Caracteristica impedanță echivalentă-pulsație pentru un FTB1 ideal ($R_k=0$).

Pentru fiecare armonică de curent ce se dorește scurtcircuitată, se folosește un astfel de circuit rezonant. Elementele fiecăruia se dimensionează astfel încât, pentru frecvența de rezonanță, care coincide cu frecvența armonicii de curent respective, să rezulte o impedanță practic nulă.

$$Z_k = k\omega_1 L - \frac{1}{k\omega_1 C} = 0 \quad (6.50)$$

unde:

Z_k este impedanța echivalentă a circuitului rezonant pentru armonică de ordinul k (s-au neglijat rezistențele echivalente ale bobinei, condensatoarelor și elementelor de legătură electrică).

ω_1 - pulsația fundamentalei de curent.

Pulsația :

$$\omega_k = k\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6.51)$$

este chiar pulsația de rezonanță a circuitului LC.

Se observă că pentru pulsații mai mici decât cea de rezonanță $\omega < \omega_k$, $Z_k < 0$ deci are caracter capacitiv și pentru pulsații mai mari decât cea de rezonanță, $\omega > \omega_k$, $Z_k > 0$ având caracter inductiv. Alături de caracteristică Z_k în funcție de pulsație este prezentată în figura 6.3.

Circuitul rezonant este parcurs de:

- 1° - curentul corespunzător fundamentalei - față de care prezintă caracter capacitiv,
- 2° - curentul corespunzător armonicii pe care are loc rezonanța (scurtcircuitat) - față de care prezintă o impedanță practic nulă,

3° - curenții corespunzători armonicilor care există în rețea dar pentru care nu sunt prevăzute circuite rezonante, față de care caracterul impedanței depinde de ordinul armonicii.

De obicei, filtrele absorbante se pun pentru armonicile cu amplitudinile cele mai mari, care corespund în general ordinelor celor mai mici 5,7,..., într-o succesiune crescătoare a acestora [30], [35], [42].

Considerând deci un circuit rezonant oarecare, se poate presupune că există circuite rezonante (în funcțiune) pentru toate armonicile de rang inferior și că amplitudinea curenților armonici de rang superior prin circuitul rezonant considerat este neglijabilă, deoarece acesta prezintă pentru frecvențe superioare celei de rezonanță o reactanță inductivă relativ mare, ce crește cu ordinul armonicii.

De aceea, analiza solicitărilor termice și electrice a elementelor circuitului rezonant se face în ipoteza că acesta *este parcurs numai de către curentul corespunzător fundamentalei și de către curentul corespunzător armonicii pe care are loc rezonanța.*

Stabilirea valorilor inductivităților și capacităților filtrelor se face prin aplicarea unor algoritmi care se pot diferenția în primul rând în funcție de rolul filtrelor din punctul de vedere al compensării puterii reactive pe fundamentală. Toate circuitele rezonante vor avea pe frecvența fundamentalei caracter capacitiv, deci ele vor produce, vrând-nevrând, o compensare capacitivă transversală a rețelei. Vom diferenția deci două tipuri principale de criterii de dimensionare a circuitelor rezonante:

A - pentru circuite cu rol principal de filtrare ;

B - pentru circuite cu dublu rol: compensare - filtrare.

După această scurtă trecere în revistă a principiilor de funcționare ale filtrelor absorbante, să ne întoarcem în contextul acestui paragraf.

În cazul de față nu se ia în considerare nici circulația puterii reactive, nici dezechilibrul curenților de sarcină și se acționează numai pentru filtrarea armonicilor de curent. (evident prin montarea de filtre absorbante trifazate simetrice). Pentru dimensionarea filtrelor se va folosi un criteriu de tip A.

Deși este o soluție mai rar întâlnită, ea poate fi luată în considerare în situații limită, când regimul deformant în curent este foarte pronunțat. Chiar dacă nu se urmărește și compensarea puterii reactive, filtrul va debita în rețea putere reactivă pe fundamentală. De aceea, criteriul de dimensionare a filtrului, mai precis a capacității din componența sa, *este minimizarea puterii reactive capacitive instalate* (ceea ce, pe lângă un cost minim al bateriei, conduce la o influență minimă asupra circulației puterii reactive din rețea):

$$Q_c = \min \quad (6.52)$$

Accastă putere reactivă va avea două componente, corespunzătoare celor doi curenți, precizați mai sus - curentul corespunzător fundamentalei și curentul corespunzător armonicii k pe care are loc rezonanța:

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{ck} = U_c^2 \cdot \omega_1 \cdot C + \frac{I_k^2}{k \cdot \omega_1 \cdot C} \quad (6.53)$$

unde:

Q_{c1} - puterea reactivă furnizată de condensatorul filtrului pe fundamentală;

Q_{ck} - puterea reactivă furnizată de condensatorul filtrului pe armonica k ;

U_c - tensiunea la bornele condensatorului;

I_k - curentul armonic ce urmează a fi filtrat.

Tensiunea la bornele condensatorului este mai mare decât tensiunea de fază a rețelei :

$$U_c = U_f \frac{k^2}{k^2 - 1} \quad (6.54)$$

Efectuând acum derivata parțială în funcție de capacitate, a expresiei puterii reactive capacitive instalate (6.28) și anulând-o, se obține expresia capacității condensatorului filtrului

$$C' = \sqrt{\frac{1}{k}} \frac{I_k (k^2 - 1)}{U_1 \cdot \omega_1 \cdot k^2} \quad (6.55)$$

Inductivitatea bobinei filtrului, L , se determină imediat, din condiția de rezonanță a circuitului serie LC al filtrului:

$$L = \frac{1}{\omega_k^2 C'} = \frac{1}{k^2 \cdot \omega_1^2 \cdot C'} \quad (6.56)$$

Prin montarea de filtre se atenuează evident regimul deformant din rețea, dar pentru că pe fundamentală acestea devin surse de putere reactivă, ele realizează o îmbunătățire a factorului de putere al ansamblului consumator - filtru.

Din același motiv, întrucât condensatoarele dispuse pe cele trei faze sunt identice, practic asistăm la compensarea componentei de secvență directă a curentului de sarcină. *Deci realizându-se micșorarea valorilor efective ale acestora, gradul de nesimetrie a curenților se accentuează.*

6.2.2.5. Cazul 5. Se acționează pentru compensarea puterii reactive și echilibrarea sarcinii

Este o situație în care regimul de funcționare al rețelei se ameliorează considerabil. Se acționează ca și cum nu ar exista regim deformant. Prin urmare, toate relațiile scrise în complex corespund fundamentalei. Așa cum s-a precizat în capitolul al treilea, în rețelele cu trei conductoare, cu ajutorul unui compensator în conexiune Δ ce conține numai susceptanțe, se poate realiza atât simetrizarea sarcinii pe fazele rețelei, cât și compensarea (reglarea circulației) puterii reactive - în cazul de față, pe fundamentală.

Considerând cazul simetrizării sarcinii și compensării integrale a puterii reactive ($\cos \varphi_{d1}^c = 1$), curenții de compensare pe laturile triunghiului, pe fundamentală, sunt dați de relațiile (3.68):

$$\begin{aligned} I_{RS1}^{\Delta} &= \frac{1}{3} (I_{Sa1} - I_{Ra1}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} (-2I_{Rr1} - 2I_{Sr1} + I_{Tr1}) \\ I_{ST1}^{\Delta} &= \frac{1}{3} (I_{Ta1} - I_{Sa1}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} (I_{Rr1} - 2I_{Sr1} - 2I_{Tr1}) \\ I_{TR1}^{\Delta} &= \frac{1}{3} (I_{Ra1} - I_{Ta1}) + \frac{1}{3\sqrt{3}} (-2I_{Rr1} + I_{Sr1} - 2I_{Tr1}) \end{aligned} \quad (6.57)$$

Curenții pe fazele compensatorului, raportați fiecare la tensiunea fazei corespundente, se calculează cu relațiile (3.82):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{R1}^{\Delta*} &= \frac{1}{3} (-2I_{Ra1} + I_{Sa1} + I_{Ta1}) + jI_{Rr1} \\ \underline{I}_{S1}^{\Delta*} &= \frac{1}{3} (I_{Ra1} - 2I_{Sa1} + I_{Ta1}) + jI_{Sr1} \\ \underline{I}_{T1}^{\Delta*} &= \frac{1}{3} (I_{Ra1} + I_{Sa1} - 2I_{Ta1}) + jI_{Tr1} \end{aligned} \quad (6.58)$$

Evident că exact același lucru este posibil cu ajutorul a două compensatoare distincte, unul simetric, în conexiune Y, dimensionat cu relațiile prezentate la cazul 2, cu care se realizează compensarea totală a puterii reactive pe secvența directă (a fundamentalei) și un compensator în conexiune Δ, dimensionat cu relațiile prezentate la cazul 3, cu care se anulează componenta de secvență inversă a curenților de sarcină (se realizează simetrizarea pe fundamentală). Nu utilizarea practică a două compensatoare distincte este de interes ci doar o comparație teoretică a acțiunilor întreprinse pentru optimizarea regimului, prin aplicarea acțiunilor care vizează una, două sau trei efecte.

Regimul deformant în curent se accentuează, întrucât curentul pe fundamentală își micșorează valoarea, ceea ce conduce la creșterea nivelului armonicilor de curent.

6.2.2.6. Cazul 6. Se acționează pentru compensarea puterii reactive și filtrarea armonicilor de curent

Este o situație frecvent întâlnită în practică și constă în integrarea bateriilor de condensatoare folosite pentru compensarea puterii reactive pe fundamentală, în filtre de armonici, de regulă de tip FTB1, descrise la paragraful 6.2.2.4.

De fapt, avem de-a face cu filtre trifazate, în conexiune Y, pentru dimensionarea cărora se folosesc criteriile de tip B, adică filtrele vor îndeplini și rolul compensării puterii reactive pe fundamentală.

Valoarea capacității bateriei de condensatoare a filtrului se determină din condiția ca pe fundamentală, curentul absorbit de filtru (I_{c1}) să fie tocmai curentul necesar compensării componentei imaginare a curentului de secvență directă, dat de relația (6.39).

Filtrul va debita deci pe fiecare fază, pe fundamentală, puterea reactivă:

$$Q = U_f \cdot I_{c1} \quad (6.59)$$

Se disting aici două situații:

a) Se filtrează o singură armonică I_k , deci filtrul conține o singură unitate care trebuie să realizeze și compensarea puterii reactive.

În acest caz se poate scrie:

$$Q = \frac{U_f^2}{X_{c1} - X_{L1}} = \frac{U_f^2}{\frac{1}{\omega_1 C_k} - \omega_1 L_k} \quad (6.60)$$

în care, dacă se înlocuiește L_k exprimat din condiția de acord la rezonanță a filtrului:

$$L_k = \frac{1}{k^2 \omega_1^2 C_k} \quad (6.61)$$

se obține:

$$Q = \frac{k^2}{k^2 - 1} U_f^2 \cdot \omega_1 \cdot C_k \quad (6.62)$$

de unde:

$$C_k = \frac{k^2 - 1}{k^2} \cdot \frac{I_{c1}}{U_f \cdot \omega_1} \quad (6.63)$$

În relațiile de mai sus, $(X_{c1} - X_{L1})$ este reactanța capacitivă echivalentă a filtrului pe fundamentală, calculată ca diferență între reactanțele corespunzătoare fundamentalei, ale capacității C_k și inductivității L_k ale filtrului, iar U_f tensiunea de fază a rețelei.

b) Se filtrează mai multe armonici ($k=5,7,\dots,m$) deci filtrul va conține m unități, puterea reactivă necesară compensării pe fundamentală, fiind distribuită între acestea.

Una dintre metodele de rezolvare a dimensionării filtrelor conform acestui criteriu, constă în montarea aceleiași bobine, de inductivitate L , pe fiecare circuit rezonant.

Puterea reactivă pe fază necesară pentru compensarea pe fundamentală, se va scrie ca o sumă a puterilor reactive corespunzătoare tuturor circuitelor rezonante:

$$Q = \sum_{k=5,7,\dots}^m \frac{U_f^2}{\omega_1 C_k} = \sum_{k=5,7,\dots}^m \frac{k^2}{k^2 - 1} U_f^2 \cdot \omega_1 \cdot C_k = \frac{U_f^2}{L} \sum_{k=5,7,\dots}^m \frac{1}{k^2 - 1} \quad (6.64)$$

Se deduce astfel expresia inductivității bobinelor din componența filtrelor:

$$L = \frac{U_f^2}{Q} \sum_{k=5,7,\dots}^m \frac{1}{k^2 - 1} \quad (6.65)$$

și apoi, din condiția de rezonanță scrisă pentru fiecare filtru, capacitățile condensatoarelor acestora C_k ($k=1,2,\dots,m$)

Se constată că atât în cazul a) cât și în cazul b) dimensionarea capacităților și inductivităților filtrelor nu depinde în mod direct de valorile efective ale curenților armonici, acestea intervenind doar la verificările la solicitări electrice și termice.

Se poate concluziona că prin compensarea puterii reactive și filtrarea armonicilor, valorile efective ale curenților pe cele trei faze se micșorează. De fapt compensarea fiind simetrică, nu este afectată componenta de secvență inversă a curenților din rețea. Deci coeficientul de disimetrie k_{ni} crește, adică dezechilibrul se accentuează.

6.2.2.7. Cazul 7. Se acționează pentru compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor de curent

S-a demonstrat mai sus că întreprinderea unei singure acțiuni de optimizare dintre cele trei nu este pe deplin avantajoasă. Așa cum rezultă și din tabelul 6.1., de regulă se elimină cauza pentru care s-a aplicat măsura respectivă în timp ce celelalte perturbații se accentuează sau nu se modifică. Nici abordarea simultană a câte două dintre cele trei aspecte nu rezolvă în totalitate problema pentru că de regulă eliminarea a două dintre perturbații conduce la accentuarea celei de-a treia.

Tabelul 6.1. Sinteza simplificată a interdependenței acțiunilor ce vizează compensarea puterii reactive, simetrizarea sarcinii și filtrarea armonicilor.

Efect asupra:→	Circulației de putere reactivă	Nesimetriei curenților	Regimului nesinusoidal în curenți
Acțiunea↓			
Compensarea puterii reactive	se elimină	se accentuează	se accentuează
Echilibrarea sarcinii	nu se modifică	se elimină	se accentuează
Filtrarea armonicilor de curent	se reduce	se accentuează	se elimină

Situația cea mai favorabilă, care conduce de fapt la optimizarea regimului de funcționare al rețelei până la unul foarte apropiat de cel ideal, se obține în mod evident, prin acționarea pentru rezolvarea simultană a celor trei probleme.

Acest lucru se poate realiza prin folosirea a două compensatoare, unul în conexiune Y și celălalt în conexiune Δ . Primul este obligatoriu atunci când se dorește filtrarea

armonicilor de curent iar cel de-al doilea pentru simetrizare. Fiecare dintre ele poate îndeplini și funcția de compensare a puterii reactive pe fundamentală.

Se disting astfel două posibilități de dimensionare a celor două compensatoare și anume:

1° - Compensatorul Y îndeplinește atât funcția de filtrare cât și pe cea de compensare a puterii reactive pe fundamentală până la nivelul cerut, iar compensatorul Δ îndeplinește numai funcția de echilibrare a sarcinii.

Suntem deci în situația unei combinații a cazurilor 3 și 6 prezentate anterior. Compensarea puterii reactive pe fundamentală va fi realizată de fapt de către unitățile trifazate ale filtrului, fiecare dintre acestea fiind acordată pe una dintre frecvențele armonice, dimensionarea capacităților din componența lor făcându-se astfel încât suma puterilor reactive debitate pe secvența directă a fundamentalei să fie chiar puterea reactivă necesară pentru compensare. Aceasta rămâne însă apoi constantă, indiferent de sarcina consumatorului, ceea ce poate conduce, în golurile de sarcină, la supracompensări ale puterii reactive.

Această soluție de compensare este deci eficientă în cazul aplicării ei în secțiuni de rețea cu variații mici ale sarcinii.

2° - Compensatorul Y este de asemenea constituit din unități de filtrare, dimensionate simetric, de data aceasta din condiția ca puterea reactivă capacitivă instalată să fie minimă (cazul 4 - rol principal de filtrare), compensatorului Δ revenindu-i funcția ca pe lângă echilibrare să realizeze și restul de compensare a puterii reactive pe secvența directă a fundamentalei, până la nivelul dorit (cazul 5 de mai sus), cu scopul îmbunătățirii factorului de putere sau reglarea tensiunii. Datorită posibilității realizării compensatorului Δ cu susceptanțe variabile, descrise în capitolul anterior și în ANEXA 10 și deci a reglajului automat, această soluție de compensare prezintă o flexibilitate și o eficiență considerabil mai mare.

Din punct de vedere teoretic, cele două metode de dimensionare sunt absolut similare, dar din punct de vedere practic, aplicarea uneia sau alteia trebuie să constituie rezultatul unei analize atente, pe baza unor criterii tehnico-economice. Un astfel de criteriu îl constituie mărimea puterilor reactive instalate în bobinele și condensatoarele necesare celor două compensatoare și deci costul acestora. Din acest motiv, ambele metode sunt utilizate în cadrul aplicației numerice.

6.2.3. Aplicație numerică

6.2.3.1. Descriere

Pentru a completa concluziile și aprecierile calitative cu unele cantitative, s-a elaborat o aplicație numerică, prezentată în cele ce urmează. Schema electrică monofilară simplificată este cea din figura 6.1.

Se cunosc curenții pe fazele consumatorului echivalent, corespunzători fundamentalei și armonicii a cincea, pentru simplificare considerată singura armonică prezentă în undele acestora. Desigur că atât curenții de pe fundamentală cât și cei de pe armonică a cincea s-au considerat constituiți în sisteme trifazate dezechilibrate și în plus, fără componentă de secvență homopolară (inexistentă în rețelele cu trei conductoare). Așa cum se știe sistemul trifazat al curenților de pe armonică a cincea se constituie într-un sistem de secvență inversă, componenta de secvență directă aferentă apărând doar în cazul unui dezechilibru și fiind în general mai mică decât cea de secvență inversă. Programul scris în BP pentru

efectuarea calculelor conexe acestei aplicații, conține o procedură care generează ambele sisteme trifazate de curenți cu caracteristicile amintite.

Au fost studiate trei variante pentru curenții pe fundamentală ai sarcinii (modificând mai întâi componenta de secvență inversă și apoi componenta reactivă a curentului de secvență directă) și pentru fiecare dintre acestea câte două variante de sisteme trifazate dezechilibrate de curenți pe armonica a cincea, în total deci șase variante considerate semnificative.

Atât curenții de sarcină cât și rezultatele complete ale calculelor sunt prezentate în **tabelele 6.2÷6.7.**

Pentru sarcină (consumatorul echivalent) se cunosc și se determină :

$I_{R1}^{s*}, I_{S1}^{s*}, I_{T1}^{s*}$	- curenții de sarcină pe fază corespunzători frecvenței fundamentale;
I_{d1}^s, I_{i1}^s	- componentele de secvență directă și inversă ai curenților de sarcină pe fundamentală;
$\cos\varphi_{d1}^s$	- factorul de putere al sarcinii pe secvența directă a fundamentalei;
k_{m1}^s	- coeficientul de disimetrie al sarcinii pe fundamentală;
$I_{R5}^{s*}, I_{S5}^{s*}, I_{T5}^{s*}$	- curenții de sarcină pe fază corespunzători armonicii a cincea;
I_{d5}^s, I_{i5}^s	- componentele de secvență directă și inversă ai curenților de sarcină pe armonica a cincea;
ΔP	- pierderile totale de putere activă pe elementul de rețea din amonte (L.S), produse de către curenții de sarcină;
ΔP_{min}	- minimul pierderilor de putere activă rezultate prin aplicarea tuturor acțiunilor de optimizare;
$\Delta P - \Delta P_{min}$	- reducerea pierderilor de putere activă;
k_p^s	- factorul de putere al sarcinii (calculat pe baza pierderilor de putere activă);
$\gamma_{Id5}^s, \gamma_{Ii5}^s$	- nivelurile curenților armonici de secvență directă și inversă, pentru armonica a cincea;

Atât curenții de fază pe fundamentală cât și cei aferenți armonicii a cincea au fost exprimați prin raportare la tensiunile de fază corespondente de pe fundamentală, **la sursă** (barele de medie tensiune ale stației de transformare). Așa cum s-a precizat deja, aceste tensiuni se consideră simetrice și sinusoidale, iar sursa se consideră suficient de puternică pentru ca aceste caracteristici ale tensiunilor la bornele sale să nu se modifice odată cu modificarea gradului de dezechilibru sau de deformare ale curenților de sarcină.

Linia electrică de legătură dintre sursă și consumatorul echivalent este subterană, construită cu cabluri monofazate de tip $\Lambda 2YSY 12/20$ kV, având secțiunea $S=95$ mm², parametrii echivalenți longitudinali unitari de secvență directă : $R_{d10}=0,372$ Ω /km , $X_{d10}=0,138$ Ω /km ([21]) și lungimea $L=5$ km. Se neglijează parametrii echivalenți transversali atât pentru frecvența fundamentală cât și pentru cele corespunzătoare armonicilor de ordin superior.

Relațiile de calcul pe baza cărora s-a întocmit programul amintit mai sus, au fost prezentate în cadrul acestui subcapitol, în capitolul al treilea și în ANEXA 6. Este vorba despre calculul de dimensionare a elementelor de bază ale instalației de compensare-echilibrare-filtrare, calculul circulației de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator, acesta din urmă având pe rând funcțiile descrise la cazurile 2÷7 tratate mai sus și anume :

- 1°- compensarea integrală a puterii reactive pe secvența directă a fundamentalei, realizată cu un compensator Y simetric;
- 2°- echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei de alimentare prin anularea curentului de secvență inversă pe fundamentală, realizată cu un compensator Δ, asimetric;
- 3°- filtrarea curenților de pe armonica a 5-a, realizată cu un FTBI trifazat simetric, conexiune Y, cu rol principal de filtrare;
- 4°- compensare și echilibrare, (de fapt funcțiile 1° și 2°), realizate cu un compensator Δ;
- 5°- compensare și filtrare, realizată cu un FTBI trifazat, simetric (ce cumulează de fapt funcțiile 1° și 3°);
- 6°- compensare, echilibrare și filtrare, realizată cu două compensatoare: unul în Y, care este de fapt un FTBI și celălalt în Δ. Cele două compensatoare cumulează astfel funcțiile 1°, 2° și 3°, dimensionarea lor făcându-se în cele două variante, prezentate mai sus.

În figura 6.4. se ilustrează schemele electrice simplificate ale instalațiilor de compensare-echilibrare-filtrare aplicate conform criteriilor prezentate mai sus și notațiile aferente.

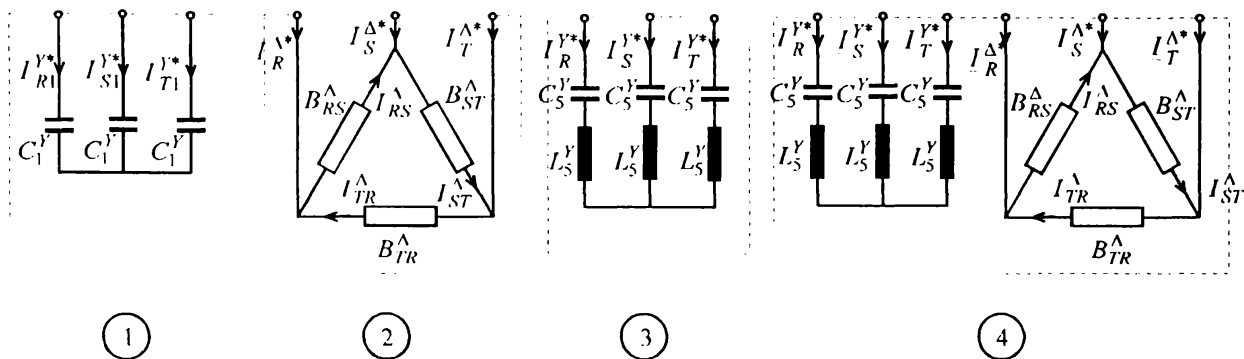


Fig. 6.4. Schemele electrice simplificate ale celor patru tipuri de instalații : tip 1 - compensare; tip 2 - echilibrare și compensare+echilibrare; tip 3 - filtrare și compensare+filtrare; tip 4 - compensare+filtrare+echilibrare.

Ipotezelor simplificatoare referitoare la tensiuni, li se adaugă următoarele:

- filtrele și compensatoarele folosesc elemente reactive ideale în sensul că se neglijează rezistențele electrice corespunzătoare pierderilor de putere activă în aceste elemente și în plus sunt liniare (nu conduc la accentuarea regimului deformant);
- filtrele realizează o filtrare perfectă a curenților de pe armonica a 5-a;
- se consideră regimuri staționare (nu se consideră efectele comutației statice folosite în cazul susceptanțelor variabile);
- în cazul compensatoarelor Y respectiv Δ dimensionate pentru a interveni numai pe secvența directă respectiv inversă a fundamentalei curenților în rețea, se neglijează influența acestora asupra circulației curenților pe armonicile de rang superior.

În cazul fiecărei variante de curenți de sarcină s-au calculat:

Pentru compensatorul Y sau FTBI:

- C_1^Y - valoarea capacității în cazul compensatorului Y;
- C_5^Y, L_5^Y - valorile capacității și inductivității în cazul FTBI pentru armonica a 5-a ;
- $I_{R1}^{Y*}, I_{S1}^{Y*}, I_{T1}^{Y*}$ - valorile curenților pe fază corespunzători fundamentalei ;
- I_{d1}^{Y*}, I_{i1}^{Y*} - valorile curenților de secvență corespunzători curenților de fază pe fundamentală.

Pentru compensatorul Δ :

- $I_{RS1}^{\Delta}, I_{ST1}^{\Delta}, I_{TR1}^{\Delta}$ - valorile efective ale curenților de compensare necesari pe fundamentală;
- C_{RS1}, \dots, L_{TR1} - valorile capacităților sau inductivităților corespunzătoare acestora ;
- $I_{R1}^{\Delta}, I_{S1}^{\Delta}, I_{T1}^{\Delta}$ - valorile curenților pe fază corespunzătorii fundamentalei ;
- $I_{d1}^{\Delta}, I_{i1}^{\Delta}$ - valorile curenților de secvență corespunzătorii curenților de fază pe fundamentală ;

Pentru elementul de rețea din amonte (linia de alimentare), parcurs de curenții ansamblului consumator-compensator:

- $I_{R1}^{\Delta}, I_{S1}^{\Delta}, I_{T1}^{\Delta}$ - valorile curenților pe fază corespunzătorii fundamentalei ;
- I_{d1}, I_{i1} - valorile curenților de secvență corespunzătorii curenților de fază pe fundamentală;
- k_{m1} - valoarea raportului de disimetrie a curenților pe fundamentală ;
- $\gamma_{ld5}; \gamma_{li5}$ - valorile nivelurilor curenților armonici de secvență directă și inversă ;
- ΔP - pierderile totale de putere activă pe elementul de rețea din amonte (LES) ;
- ΔP_{min} - minimul pierderilor de putere activă pe elementul de rețea din amonte, posibil în condițiile aplicării tuturor acțiunilor de optimizare ;
- $\Delta P, \Delta P_{min}$ - reducerea pierderilor de putere activă ;
- k_p - factorul de putere calculat pe baza pierderilor de putere activă pe elementul de rețea din amonte (relația 6.28 scrisă pentru rețelele fără conductor neutru) :

$$k_p = \frac{\cos\varphi_{d1}}{\sqrt{1 + \sum_{k>1} \gamma_{ldk}^2 + k_{m1}^2 \cdot \left[1 + \sum_{k>1} \gamma_{lik}^2 \right]}} = \frac{\cos\varphi_{d1}}{\sqrt{1 + \gamma_{ld5}^2 + k_{m1}^2 \cdot \left[1 + \gamma_{li5}^2 \right]}} \quad (6.66)$$

Rezultatele complete ale calculelor sunt prezentate în tabelele 6.2÷6.7.

6.2.3.2. Interpretarea rezultatelor

1° Atunci când se acționează numai pentru compensarea integrală a puterii reactive pe secvența directă a fundamentalei se obțin cele mai mari valori pentru capacitatea bateriei de condensatoare. Compensarea este simetrică și pe fiecare fază compensatorul absoarbe un curent capacitiv egal cu componenta reactivă inductivă a curentului de secvență directă pe fundamentală. Efectul este micșorarea curentului de secvență directă pe fundamentală absorbit din rețea de către ansamblul consumator-compensator în condițiile în care, componenta de secvență inversă pe fundamentală rămâne nemodificată. Aceasta conduce la creșterea coeficientului de disimetrie pe fundamentală și a nivelului curenților armonici de secvență directă (pe armonica a 5-a) ceea ce ar avea un efect de micșorare a factorului de putere față de situația în care nu se ia nici o măsură de optimizare. Efectul predominant îl are însă creșterea până la valoarea maximă a factorului de putere pe secvența directă, datorită compensării totale a puterii reactive, ceea ce va face ca și factorul de putere global să crească în mod considerabil. Micșorarea pronunțată a valorii efective a curentului de secvență directă pe fundamentală este regăsită bineînțeles în micșorarea de asemenea pronunțată a pierderilor de putere activă.

Tabelul 6.3.

varianta 1-2

IR1s*= 90.0000-j 32.7573 A
IS1s*= 83.5929-j 30.3017 A
IT1s*= 36.9615-j 55.9808 A

Id1s= 70.1848-j 59.6799 A
Ii1s= 19.8152+j 26.9226 A
Id1s= 92.1282 A Ii1s= 33.4286 A
cosφ1s= **0.7618** kni1s= 0.3628

IR5s*= 1.6506+j 22.1410 A
IS5s*= 20.0000-j 5.3590 A
IT5s*= -12.9904-j 7.5000 A

Id5s= 2.8868+j 3.0940 A
Ii5s= -1.2361+j 19.0470 A
Id5s= 4.2316 A Ii5s= 19.0871 A
γId5s= 0.0459 γIi5s= 0.5710

kpP= 0.7640
kps= **0.7023**
ΔP=55729.085 W
ΔPmin=27486.550 W
ΔP/ΔPmin=2.03

knu1= 0.00583
knu5= 4.5106
γU5=0.142357
ΔU= 0.0049

	Compensare	Echilibrare	Filtrare	Comp.+ echilibrare	Comp.+ filtrare	Comp.+filtr.+echil.	Filtr.+ comp.+ echil.
Y	C ^Y 1= 16.4516 μF I ^Y R1*= 0+j 59.6799 A I ^Y S1*= 0+j 59.6799 A I ^Y T1*= 0+j 59.6799 A I ^Y d1= 0+j 59.6799 A I ^Y i1= 0-j 0 A I ^Y d1= 59.6799 A I ^Y i1= 0 A		C ^Y 5= 2.8512 μF L ^Y 5= 0.1421 H I ^Y R1*= 0+j 10.7739 A I ^Y S1*= 0+j 10.7739 A I ^Y T1*= 0+j 10.7739 A I ^Y d1= 0+j 10.7739 A I ^Y i1= 0-j 0 A I ^Y d1= 10.7739 A I ^Y i1= 0 A		C ^Y 5= 15.7936 μF L ^Y 5= 0.0257 H I ^Y R1*= 0+j 59.6799 A I ^Y S1*= 0+j 59.6799 A I ^Y T1*= 0+j 59.6799 A I ^Y d1= 0+j 59.6799 A I ^Y i1= 0-j 0 A I ^Y d1= 59.6799 A I ^Y i1= 0 A	C ^Y 5= 15.7936 μF L ^Y 5= 0.0257 H I ^Y R1*= 0+j 59.6799 A I ^Y S1*= 0+j 59.6799 A I ^Y T1*= 0+j 59.6799 A I ^Y d1= 0+j 59.6799 A I ^Y i1= 0-j 0 A I ^Y d1= 59.6799 A I ^Y i1= 0 A	C ^Y 5= 2.8512 μF L ^Y 5= 0.1421 H I ^Y R1*= 0+j 10.7739 A I ^Y S1*= 0+j 10.7739 A I ^Y T1*= 0+j 10.7739 A I ^Y d1= 0+j 10.7739 A I ^Y i1= 0-j 0 A I ^Y d1= 10.7739 A I ^Y i1= 0 A
Δ		I ^Δ RS1= -4.2714 A I ^Δ ST1= -31.0876 A I ^Δ TR1= 35.3590 A CRS= 0.67982 μF CST= 4.94774 μF LTR= 1.80045 H I ^Δ R1*= -19.8152-j 26.9226 A I ^Δ S1*= -13.4081+j 30.6218 A I ^Δ T1*= 33.2233-j 3.6992 A I ^Δ R1= 33.4286 A I ^Δ S1= 33.4286 A I ^Δ T1= 33.4286 A I ^Δ d1= 0+j 0.0000 A I ^Δ i1= -19.8152-j 26.9226 A I ^Δ d1= 0 A I ^Δ i1= 33.4286 A		I ^Δ RS1= -38.7277 A I ^Δ ST1= -65.5438 A I ^Δ TR1= 0.9028 A CRS= 6.16370 μF CST= 10.43162 μF LTR= 70.51929 H I ^Δ R1*= -19.8152+j 32.7573 A I ^Δ S1*= -13.4081+j 90.3017 A I ^Δ T1*= 33.2233+j 55.9808 A I ^Δ R1= 38.2843 A I ^Δ S1= 91.2917 A I ^Δ T1= 65.0971 A I ^Δ d1= 0+j 59.6799 A I ^Δ i1= -19.8152-j 26.9226 A I ^Δ d1= 59.6799 A I ^Δ i1= 33.4286 A		I ^Δ RS1= -4.2714 A I ^Δ ST1= -31.0876 A I ^Δ TR1= 35.3590 A CRS= 0.67982 μF CST= 4.94774 μF LTR= 1.80045 H I ^Δ R1*= -19.8152-j 26.9226 A I ^Δ S1*= -13.4081+j 30.6218 A I ^Δ T1*= 33.2233-j 3.6992 A I ^Δ R1= 33.4286 A I ^Δ S1= 33.4286 A I ^Δ T1= 33.4286 A I ^Δ d1= 0+j 0.0000 A I ^Δ i1= -19.8152-j 26.9226 A I ^Δ d1= 0 A I ^Δ i1= 33.4286 A	I ^Δ RS1= -32.5073 A I ^Δ ST1= -59.3235 A I ^Δ TR1= 7.1231 A CRS= 5.17370 μF CST= 9.44162 μF LTR= 8.93742 H I ^Δ R1*= -19.8152+j 21.9834 A I ^Δ S1*= -13.4081+j 79.5278 A I ^Δ T1*= 33.2233+j 45.2068 A I ^Δ R1= 29.5958 A I ^Δ S1= 80.6501 A I ^Δ T1= 56.1021 A I ^Δ d1= 0+j 48.9060 A I ^Δ i1= -19.8152-j 26.9226 A I ^Δ d1= 48.9060 A I ^Δ i1= 33.4286 A
A	IR1*= 90.0000+j 26.9226 A IS1*= 83.5929-j 30.6218 A IT1*= 36.9615+j 3.6992 A Id1= 70.1848-j 0 A Ii1= 19.8152+j 26.9226 A Id1= 70.1848 A Ii1= 33.4286 A kni1= 0.4763 knu1= 0.00581 γId5= 0.0603 knu5= 4.5106 γIi5= 0.5710 γU5= 0.141845 kpP= 0.9982 kp= 0.8756 ΔP=35854.832 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.30 ΔU= 0.0014	IR1*= 70.1848-j 59.6799 A IS1*= 70.1848-j 59.6799 A IT1*= 70.1848-j 59.6799 A Id1= 70.1848-j 59.6799 A Ii1= 0-j 0 A Id1= 92.1282 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0.0459 knu5= 4.5106 γIi5=... γU5=0.142360 kpP= 0.7653 kp= 0.7452 ΔP=49493.606 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.80 ΔU= 0.0049	IR1*= 90.0000-j 21.9834 A IS1*= 83.5929-j 79.5278 A IT1*= 36.9615-j 45.2068 A Id1= 70.1848-j 48.9060 A Ii1= 19.8152+j 26.9226 A Id1= 85.5436 A Ii1= 33.4286 A kni1= 0.3908 knu1= 0.00583 γId5= 0 knu5= ... γIi5= 0 γU5= 0 kpP= 0.8212 kp= 0.7706 ΔP=46283.502 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.68 ΔU= 0.0142	IR1*= 70.1848-j 0 A IS1*= 70.1848-j 0 A IT1*= 70.1848-j 0 A Id1= 70.1848-j 0 A Ii1= 0+j 0.0000 A Id1= 70.1848 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0.0603 knu5= 4.5106 γIi5=... γU5=0.141847 kpP= 0.9999 kp= 0.9633 ΔP=29619.352 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.08 ΔU= 0.0014	IR1*= 90.0000+j 26.9226 A IS1*= 83.5929-j 30.6218 A IT1*= 36.9615+j 3.6992 A Id1= 70.1848-j 0 A Ii1= 19.8152+j 26.9226 A Id1= 70.1848 A Ii1= 33.4286 A kni1= 0.4763 knu1= 0.00581 γId5= 0 knu5= ... γIi5= 0 γU5= 0 kpP= 0.9983 kp= 0.9028 ΔP=33722.029 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.23 ΔU= 0.0113	IR1*= 70.1848-j 0 A IS1*= 70.1848+j 0.0000 A IT1*= 70.1848-j 0.0000 A Id1= 70.1848-j 0.0000 A Ii1= 0-j 0 A Id1= 70.1848 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0 knu5= ... γIi5= ... γU5= 0 kpP= 1.0000 kp= 1.0000 ΔP=27486.550 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.00 ΔU= 0.0113	IR1*= 70.1848-j 0 A IS1*= 70.1848-j 0 A IT1*= 70.1848-j 0 A Id1= 70.1848-j 0 A Ii1= 0+j 0.0000 A Id1= 70.1848 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0 knu5= ... γIi5= ... γU5= 0 kpP= 1.0000 kp= 1.0000 ΔP=27486.550 W ΔPmin=27486.550 W ΔP/ΔPmin=1.00 ΔU= 0.0113

Tabelul 6.2.

varianta 1-1

IR1s*= 90.0000-j 32.7573 A
IS1s*= 83.5929-j 90.3017 A
IT1s*= 36.9615-j 55.9808 A

Id1s= 70.1848-j 59.6799 A
Ii1s= 19.8152+j 26.9226 A
Id1s= 92.1282 A

Ii1s= 33.4286 A
Ii1s= 92.1282 A
Ii1s= 33.4286 A
cos ϕ d1s= **0.7618** kni1s= 0.3628

IR5s*= 9.6852+j 23.2757 A
IS5s*= 20.0000-j 1.7498 A
IT5s*= -6.8301+j 1.8301 A

Id5s= 7.6184+j 7.7854 A
Ii5s= 2.0669+j 15.4904 A

Ii5s= 10.8927 A
Ii5s= 15.6277 A
 γ Id5s= 0.1182 γ Ii5s= 0.4675

kpP= 0.7637
kp= **0.7030**

Δ P=55621.126 W
 Δ Pmin=27486.550 W
 Δ P/ Δ Pmin=2.02

knu1= 0.00583
knu5= 1.4347
 γ U5=0.066799
DU= 0.0126

	Compensare	Echilibrare	Filtrare	Comp.+ echilibrare	Comp.+ filtrare	Comp.+filtr.+echil.	Filtr.+ comp.+ echil.
Y	$C^Y_1 = 16.4516 \mu F$ $I^Y_{R1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 59.6799 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$		$C^Y_5 = 3.2375 \mu F$ $L^Y_5 = 0.1252 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$		$C^Y_5 = 15.7936 \mu F$ $L^Y_5 = 0.0257 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 59.6799 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$	$C^Y_5 = 15.7936 \mu F$ $L^Y_5 = 0.0257 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 59.6799 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$	$C^Y_5 = 3.2375 \mu F$ $L^Y_5 = 0.1252 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$
Δ		$I^{\Delta}_{RS1} = -4.2714 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -31.0876 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 35.3590 A$ $CRS = 0.67982 \mu F$ $CST = 4.94774 \mu F$ $LTR = 1.80045 H$ $I^{\Delta}_{R1} = -19.8152-j 26.9226 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.4081+j 30.6218 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 33.2233-j 3.6992 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 33.4286 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 33.4286 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 33.4286 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 - j 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -19.8152-j 26.9226 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 33.4286 A$		$I^{\Delta}_{RS1} = -38.7277 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -65.5438 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 0.9028 A$ $CRS = 6.16370 \mu F$ $CST = 10.43162 \mu F$ $LTR = 70.51929 H$ $I^{\Delta}_{R1} = -19.8152+j 32.7573 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.4081+j 90.3017 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 33.2233+j 55.9808 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 38.2843 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 91.2917 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 65.0971 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 + j 59.6799 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -19.8152-j 26.9226 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 59.6799 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 33.4286 A$		$I^{\Delta}_{RS1} = -4.2714 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -31.0876 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 35.3590 A$ $CRS = 0.67982 \mu F$ $CST = 4.94774 \mu F$ $LTR = 1.80045 H$ $I^{\Delta}_{R1} = -19.8152-j 26.9226 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.4081+j 30.6218 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 33.2233-j 3.6992 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 33.4286 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 33.4286 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 33.4286 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 - j 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -19.8152-j 26.9226 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 33.4286 A$	$I^{\Delta}_{RS1} = -31.6646 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -58.4807 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 7.9658 A$ $CRS = 5.03958 \mu F$ $CST = 9.30750 \mu F$ $LTR = 7.99191 H$ $I^{\Delta}_{R1} = -19.8152+j 20.5238 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.4081+j 78.0682 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 33.2233+j 43.7472 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 28.5284 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 79.2112 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 54.9327 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 + j 47.4464 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -19.8152-j 26.9226 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 47.4464 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 33.4286 A$
A	$IR1^* = 90.0000+j 26.9226 A$ $IS1^* = 83.5929-j 30.6218 A$ $IT1^* = 36.9615+j 3.6992 A$ $Id1 = 70.1848-j 0 A$ $Ii1 = 19.8152+j 26.9226 A$ $Id1 = 70.1848 A$ $Ii1 = 33.4286 A$ $kni1 = 0.4763$ $knu1 = 0.00581$ $\gamma Id5 = 0.1552$ $knu5 = 1.4347$ $\gamma Ii5 = 0.4675$ $\gamma U5 = 0.066558$ $kpP = 0.9978$ $kp = 0.8769$ $\Delta P = 35746.873 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.30$ $\Delta U = 0.0091$	$IR1^* = 70.1848-j 59.6799 A$ $IS1^* = 70.1848-j 59.6799 A$ $IT1^* = 70.1848-j 59.6799 A$ $Id1 = 70.1848-j 59.6799 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 92.1282 A$ $Ii1 = 0 A$ $kni1 = 0$ $knu1 = 0$ $\gamma Id5 = 0.1182$ $knu5 = 1.4347$ $\gamma Ii5 = \dots$ $\gamma U5 = 0.06680$ $kpP = 0.7650$ $kp = 0.7460$ $\Delta P = 49385.647 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.80$ $\Delta U = 0.0127$	$IR1^* = 90.0000-j 20.5238 A$ $IS1^* = 83.5929-j 78.0682 A$ $IT1^* = 36.9615-j 43.7472 A$ $Id1 = 70.1848-j 47.4464 A$ $Ii1 = 19.8152+j 26.9226 A$ $Id1 = 84.7176 A$ $Ii1 = 33.4286 A$ $kni1 = 0.3946$ $knu1 = 0.00583$ $\gamma Id5 = 0$ $knu5 = \dots$ $\gamma Ii5 = 0$ $\gamma U5 = 0$ $kpP = 0.8290$ $kp = 0.7706$ $\Delta P = 46283.502 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.68$ $\Delta U = 0.0141$	$IR1^* = 70.1848-j 0 A$ $IS1^* = 70.1848-j 0 A$ $IT1^* = 70.1848-j 0 A$ $Id1 = 70.1848-j 0 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 70.1848 A$ $Ii1 = 0 A$ $kni1 = 0$ $knu1 = 0$ $\gamma Id5 = 0.1552$ $knu5 = 1.4347$ $\gamma Ii5 = \dots$ $\gamma U5 = 0.066559$ $kpP = 0.9995$ $kp = 0.9651$ $\Delta P = 29511.394 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.07$ $\Delta U = 0.0091$	$IR1^* = 90.0000+j 26.9226 A$ $IS1^* = 83.5929-j 30.6218 A$ $IT1^* = 36.9615+j 3.6992 A$ $Id1 = 70.1848-j 0 A$ $Ii1 = 19.8152+j 26.9226 A$ $Id1 = 70.1848 A$ $Ii1 = 33.4286 A$ $kni1 = 0.4763$ $knu1 = 0.00581$ $\gamma Id5 = 0$ $knu5 = \dots$ $\gamma Ii5 = 0$ $\gamma U5 = 0$ $kpP = 1.0000$ $kp = 0.9028$ $\Delta P = 33722.029 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.23$ $\Delta U = 0.0113$	$IR1^* = 70.1848-j 0 A$ $IS1^* = 70.1848-j 0 A$ $IT1^* = 70.1848-j 0 A$ $Id1 = 70.1848-j 0 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 70.1848 A$ $Ii1 = 0 A$ $kni1 = 0$ $knu1 = 0$ $\gamma Id5 = 0$ $knu5 = \dots$ $\gamma Ii5 = \dots$ $\gamma U5 = 0$ $kpP = 1.0000$ $kp = 1.0000$ $\Delta P = 27486.550 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.00$ $DU = 0.0113$	$IR1^* = 70.1848-j 0 A$ $IS1^* = 70.1848-j 0 A$ $IT1^* = 70.1848-j 0 A$ $Id1 = 70.1848-j 0 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 70.1848 A$ $Ii1 = 0 A$ $kni1 = 0$ $knu1 = 0$ $\gamma Id5 = 0$ $knu5 = \dots$ $\gamma Ii5 = \dots$ $\gamma U5 = 0$ $kpP = 1.0000$ $kp = 1.0000$ $\Delta P = 27486.550 W$ $\Delta Pmin = 27486.550 W$ $\Delta P/\Delta Pmin = 1.00$ $\Delta U = 0.0113$

Tabelul 6.4

varianta 2-1

IR1s*= 72.8000-j 42.0311 A	Id1s= 70.4547-j 59.3516 A	IR5s*= 9.6852+j 23.2757 A	Id5s= 7.6184+j 7.7854 A	kpP= 0.7673	knu1= 0.00305
IS1s*= 84.2820-j 70.0430 A	Ii1s= 2.3453+j 17.3205 A	IS5s*= 20.0000-j 1.7498 A	Ii5s= 2.0669+j 15.4904 A	kps= 0.7363	knu5= 1.4347
IT1s*= 54.2820-j 65.9808 A	Id1s= 92.1221 A	Ii1s= 17.4786 A	Id5s= 10.8927 A	ΔP=51084.075 W	γU5=0.066801
cosφd1s= 0.7648	kni1s= 0.1897		γId5s= 0.1182	ΔPmin=27698.356 W	ΔU= 0.0127
			γIi5s= 0.8941	ΔP/ΔPmin=1.84	

	Compensare	Echilibrare	Filtrare	Comp.+ echilibrare	Comp.+ filtrare	Comp.+filtr.+techil.	Filtr.+ comp.+ echil.
Y	$C^Y_1 = 16.3611 \mu F$ $I^Y_{R1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 59.3516 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$		$C^Y_5 = 3.2375 \mu F$ $L^Y_5 = 0.1252 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$		$C^Y_5 = 15.7067 \mu F$ $L^Y_5 = 0.0258 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 59.3516 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$	$C^Y_5 = 15.7067 \mu F$ $L^Y_5 = 0.0258 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 59.3516 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$	$C^Y_5 = 3.2375 \mu F$ $L^Y_5 = 0.1252 H$ $I^Y_{R1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{S1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{T1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{d1} = 0 + j 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 - j 0 A$ $I^Y_{d1} = 12.2335 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$
Δ		$I^{\Delta}_{RS1} = 7.6547 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = 20.0000 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 12.3453 A$ LRS= 8.31673 H CST= 3.18310 μF LTR= 5.15677 H $I^{\Delta}_{R1} = -2.3453-j 17.3205 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.8273+j 10.6914 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 16.1727+j 6.6292 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 17.4786 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 17.4786 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 17.4786 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 - j 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -2.3453-j 17.3205 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 17.4786 A$		$I^{\Delta}_{RS1} = -26.6120 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -54.2667 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = -21.9214 A$ CRS= 4.23543 μF CST= 8.63681 μF CTR= 3.48889 μF $I^{\Delta}_{R1} = -2.3453+j 42.0311 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.8273+j 70.0430 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 16.1727+j 65.9808 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 42.0965 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 71.3948 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 67.9339 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 + j 59.3516 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -2.3453-j 17.3205 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 59.3516 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 17.4786 A$		$I^{\Delta}_{RS1} = 7.6547 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -20.0000 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 12.3453 A$ LRS= 8.31673 H CST= 3.18310 μF LTR= 5.15677 H $I^{\Delta}_{R1} = -2.3453-j 17.3205 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.8273+j 10.6914 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 16.1727+j 6.6292 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 17.4786 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 17.4786 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 17.4786 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 - j 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -2.3453-j 17.3205 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 17.4786 A$	$I^{\Delta}_{RS1} = -19.5489 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -47.2036 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = -14.8583 A$ CRS= 3.11131 μF CST= 7.51269 μF CTR= 2.36477 μF $I^{\Delta}_{R1} = -2.3453+j 29.7976 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -13.8273+j 57.8094 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 16.1727+j 53.7472 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 29.8897 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 59.4401 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 56.1277 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 + j 47.1181 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -2.3453-j 17.3205 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 47.1181 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 17.4786 A$
A	$IR1^* = 72.8000+j 17.3205 A$ $IS1^* = 84.2820-j 10.6914 A$ $IT1^* = 54.2820-j 6.6292 A$ $Id1 = 70.4547-j 0 A$ $Ii1 = 2.3453+j 17.3205 A$ $Id1 = 70.4547 A$ $Ii1 = 17.4786 A$ kni1= 0.2481 knu1= 0.00304 γId5= 0.1546 knu5= 1.4347 γIi5= 0.8941 γU5= 0.066562 kpP= 0.9987 kp= 0.9388 ΔP=31427.893 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.13 ΔU= 0.0091	$IR1^* = 70.4547-j 59.3516 A$ $IS1^* = 70.4547-j 59.3516 A$ $IT1^* = 70.4547-j 59.3516 A$ $Id1 = 70.4547-j 59.3516 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 92.1221 A$ $Ii1 = 0 A$ kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0.1182 knu5= 1.4347 γIi5= --- γU5= 0.066802 kpP= 0.7679 kp= 0.7490 ΔP=49379.382 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.78 ΔU= 0.0127	$IR1^* = 72.8000-j 29.7976 A$ $IS1^* = 84.2820-j 57.8094 A$ $IT1^* = 54.2820-j 53.7472 A$ $Id1 = 70.4547-j 47.1181 A$ $Ii1 = 2.3453+j 17.3205 A$ $Id1 = 84.7583 A$ $Ii1 = 17.4786 A$ kni1= 0.2062 knu1= 0.00305 γId5= 0 knu5= --- γIi5= 0 γU5= 0 kpP= 0.8325 kp= 0.8141 ΔP=41791.275 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.53 ΔU= 0.0142	$IR1^* = 70.4547-j 0 A$ $IS1^* = 70.4547-j 0 A$ $IT1^* = 70.4547-j 0 A$ $Id1 = 70.4547-j 0 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 70.4547 A$ $Ii1 = 0 A$ kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0.1546 knu5= 1.4347 γIi5= --- γU5= 0.066562 kpP= 0.9995 kp= 0.9653 ΔP=29723.200 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.07 ΔU= 0.0092	$IR1^* = 72.8000+j 17.3205 A$ $IS1^* = 84.2820-j 10.6914 A$ $IT1^* = 54.2820-j 6.6292 A$ $Id1 = 70.4547-j 0 A$ $Ii1 = 2.3453+j 17.3205 A$ $Id1 = 70.4547 A$ $Ii1 = 17.4786 A$ kni1= 0.2481 knu1= 0.00304 γId5= 0 knu5= --- γIi5= 0 γU5= 0 kpP= 0.9992 kp= 0.9706 ΔP=29403.049 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.06 ΔU= 0.0113	$IR1^* = 70.4547-j 0 A$ $IS1^* = 70.4547-j 0 A$ $IT1^* = 70.4547-j 0 A$ $Id1 = 70.4547-j 0 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 70.4547 A$ $Ii1 = 0 A$ kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0 knu5= --- γIi5= --- γU5= 0 kpP= 1.0000 kp= 1.0000 ΔP=27698.356 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.00 ΔU= 0.0113	$IR1^* = 70.4547-j 0 A$ $IS1^* = 70.4547-j 0 A$ $IT1^* = 70.4547-j 0 A$ $Id1 = 70.4547-j 0 A$ $Ii1 = 0 - j 0 A$ $Id1 = 70.4547 A$ $Ii1 = 0 A$ kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0 knu5= 0 γIi5= --- γU5= 0 kpP= 1.0000 kp= 1.0000 ΔP=27698.356 W ΔPmin=27698.356 W ΔP/ΔPmin=1.00 ΔU= 0.0113

Tabelul 6.6

varianta 3-1

IR1s*= 79.1400-j 13.9545 A	Id1s= 70.1827-j 32.7098 A	IR5s*= 9.6852+j 23.2757 A	Id5s= 7.6184+j 7.7854 A	kpP= 0.9055	knu1= 0.00362
IS1s*= 81.9466-j 49.8446 A	Ii1s= 8.9573+j 18.7552 A	IS5s*= 20.0000-j 1.7498 A	Ii5s= 2.0669+j 15.4904 A	kps= 0.8517	knu5= 1.4347
IT1s*= 49.4615-j 34.3301 A	Id1s= 77.4309 A Ii1s= 20.7844 A	IT5s*= -6.8301+j 1.8301 A	Id5s= 10.8927 A Ii5s= 15.6277 A	$\Delta P=37890.469 W$	$\gamma U5=0.066691$
cosϕd1s= 0.9064	kn1s= 0.2684		$\gamma Id5s= 0.1407$ $\gamma Ii5s= 0.7519$	$\Delta Pmin=27484.907 W$	$\Delta U= 0.0111$
				$\Delta P/\Delta Pmin=1.38$	

	Compensare	Echilibrare	Filtrare	Comp.+ echilibrare	Comp.+ filtrare	Comp.+filtr.+techil.	Filtr.+ comp.+ echil.
Y	$C^Y_1= 9.0169 \mu F$ $I^Y_{R1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{S1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{T1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{d1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{i1}= 0-j 0 A$ $I^Y_{d1}= 32.7098 A$ $I^Y_{i1}= 0 A$		$C^Y_5= 3.2375 \mu F$ $L^Y_5= 0.1252 H$ $I^Y_{R1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{S1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{T1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{d1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{i1}= 0-j 0 A$ $I^Y_{d1}= 12.2335 A$ $I^Y_{i1}= 0 A$		$C^Y_5= 8.6562 \mu F$ $L^Y_5= 0.0468 H$ $I^Y_{R1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{S1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{T1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{d1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{i1}= 0-j 0 A$ $I^Y_{d1}= 32.7098 A$ $I^Y_{i1}= 0 A$	$C^Y_5= 8.6562 \mu F$ $L^Y_5= 0.0468 H$ $I^Y_{R1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{S1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{T1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{d1}= 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{i1}= 0-j 0 A$ $I^Y_{d1}= 32.7098 A$ $I^Y_{i1}= 0 A$	$C^Y_5= 3.2375 \mu F$ $L^Y_5= 0.1252 H$ $I^Y_{R1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{S1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{T1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{d1}= 0+j 12.2335 A$ $I^Y_{i1}= 0-j 0 A$ $I^Y_{d1}= 12.2335 A$ $I^Y_{i1}= 0 A$
Δ		$I^{\Delta}_{RS1}= 1.8710 A$ $I^{\Delta}_{ST1}= -21.6567 A$ $I^{\Delta}_{TR1}= 19.7857 A$ $LRS=34.02494 H$ $CST= 3.44677 \mu F$ $LTR= 3.21758 H$ $I^{\Delta}_{R1}= -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{S1}= -11.7639+j 17.1349 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 20.7212+j 1.6204 A$ $I^{\Delta}_{R1}= 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{S1}= 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 0+j 0.0000 A$ $I^{\Delta}_{i1}= -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 0 A$ $I^{\Delta}_{i1}= 20.7844 A$		$I^{\Delta}_{RS1}= -17.0140 A$ $I^{\Delta}_{ST1}= -40.5417 A$ $I^{\Delta}_{TR1}= 0.9007 A$ $CRS= 2.70785 \mu F$ $CST= 6.45241 \mu F$ $LTR=70.68356 H$ $I^{\Delta}_{R1}= -8.9573+j 13.9545 A$ $I^{\Delta}_{S1}= -11.7639+j 49.8446 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 20.7212+j 34.3301 A$ $I^{\Delta}_{R1}= 16.5820 A$ $I^{\Delta}_{S1}= 51.2140 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 40.0989 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 0+j 32.7098 A$ $I^{\Delta}_{i1}= -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 32.7098 A$ $I^{\Delta}_{i1}= 20.7844 A$		$I^{\Delta}_{RS1}= 1.8710 A$ $I^{\Delta}_{ST1}= -21.6567 A$ $I^{\Delta}_{TR1}= 19.7857 A$ $LRS=34.02494 H$ $CST= 3.44677 \mu F$ $LTR= 3.21758 H$ $I^{\Delta}_{R1}= -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{S1}= -11.7639+j 17.1349 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 20.7212+j 1.6204 A$ $I^{\Delta}_{R1}= 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{S1}= 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 0+j 0.0000 A$ $I^{\Delta}_{i1}= -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 0 A$ $I^{\Delta}_{i1}= 20.7844 A$	$I^{\Delta}_{RS1}= -9.9509 A$ $I^{\Delta}_{ST1}= -33.4786 A$ $I^{\Delta}_{TR1}= 7.9637 A$ $CRS= 1.58374 \mu F$ $CST= 5.32829 \mu F$ $LTR= 7.99402 H$ $I^{\Delta}_{R1}= -8.9573+j 17.210 A$ $I^{\Delta}_{S1}= -11.7639+j 37.6111 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 20.7212+j 22.0966 A$ $I^{\Delta}_{R1}= 9.1211 A$ $I^{\Delta}_{S1}= 39.4079 A$ $I^{\Delta}_{T1}= 30.2923 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 0+j 20.4762 A$ $I^{\Delta}_{i1}= -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1}= 20.4762 A$ $I^{\Delta}_{i1}= 20.7844 A$
A	$IR1^*= 79.1400+j 18.7552 A$ $IS1^*= 81.9466-j 17.1349 A$ $IT1^*= 49.4615-j 1.6204 A$ $Id1= 70.1827-j 0 A$ $Ii1= 8.9573+j 18.7552 A$ $Id1= 70.1827 A$ $Ii1= 20.7844 A$ $kn1= 0.2961$ $knu1=0.00361$ $\gamma Id5= 0.1552$ $knu5= 1.4347$ $\gamma Ii5= 0.7519$ $\gamma U5=0.066559$ $kpP= 0.9986$ $kp= 0.9279$ $\Delta P= 31920.269 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.16$ $\Delta U= 0.0091$	$IR1^*= 70.1827-j 32.7098 A$ $IS1^*= 70.1827-j 32.7098 A$ $IT1^*= 70.1827-j 32.7098 A$ $Id1= 70.1827-j 32.7098 A$ $Ii1= 0-j 0 A$ $Id1= 77.4309 A$ $Ii1= 0 A$ $kn1= 0$ $knu1= 0$ $\gamma Id5= 0.1407$ $knu5= 1.4347$ $\gamma Ii5=---$ $\gamma U5=0.066692$ $kpP= 0.9064$ $kp= 0.8801$ $\Delta P= 35479.951 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.29$ $\Delta U= 0.0111$	$IR1^*= 79.1400-j 1.7210 A$ $IS1^*= 81.9466-j 37.6111 A$ $IT1^*= 49.4615-j 22.0966 A$ $Id1= 70.1827-j 20.4762 A$ $Ii1= 8.9573+j 18.7552 A$ $Id1= 73.1087 A$ $Ii1= 20.7844 A$ $kn1= 0.2843$ $knu1=0.00362$ $\gamma Id5= 0$ $knu5= ---$ $\gamma Ii5= 0$ $\gamma U5= 0$ $kpP= 0.9588$ $kp= 0.9234$ $\Delta P= 32234.982 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.17$ $\Delta U= 0.0125$	$IR1^*= 70.1827-j 0 A$ $IS1^*= 70.1827-j 0 A$ $IT1^*= 70.1827-j 0 A$ $Id1= 70.1827-j 0 A$ $Ii1= 0-j 0 A$ $Id1= 70.1827 A$ $Ii1= 0 A$ $kn1= 0$ $knu1= 0$ $\gamma Id5= 0.1552$ $knu5= 1.4347$ $\gamma Ii5=---$ $\gamma U5=0.066559$ $kpP= 0.9995$ $kp= 0.9651$ $\Delta P= 29509.751 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.07$ $\Delta U= 0.0091$	$IR1^*= 79.1400+j 18.7552 A$ $IS1^*= 81.9466-j 17.1349 A$ $IT1^*= 49.4615-j 1.6204 A$ $Id1= 70.1827-j 0 A$ $Ii1= 8.9573+j 18.7552 A$ $Id1= 70.1827 A$ $Ii1= 20.7844 A$ $kn1= 0.2961$ $knu1=0.00361$ $\gamma Id5= 0$ $knu5= ---$ $\gamma Ii5= 0$ $\gamma U5= 0$ $kpP= 0.9991$ $kp= 0.9588$ $\Delta P= 29895.425 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.09$ $\Delta U= 0.0113$	$IR1^*= 70.1827-j 0 A$ $IS1^*= 70.1827-j 0 A$ $IT1^*= 70.1827-j 0 A$ $Id1= 70.1827-j 0 A$ $Ii1= -0.0000-j 0 A$ $Id1= 70.1827 A$ $Ii1= 0 A$ $kn1= 0$ $knu1= 0$ $\gamma Id5= 0$ $knu5= ---$ $\gamma Ii5= ---$ $\gamma U5= 0$ $kpP= 1.0000$ $kp= 1.0000$ $\Delta P= 27484.907 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.00$ $\Delta U=0.0113$	$IR1^*= 70.1827-j 0 A$ $IS1^*= 70.1827-j 0 A$ $IT1^*= 70.1827-j 0 A$ $Id1= 70.1827-j 0 A$ $Ii1= 0+j 0.0000 A$ $Id1= 70.1827 A$ $Ii1= 0 A$ $kn1= 0$ $knu1= 0$ $\gamma Id5= 0$ $knu5= ---$ $\gamma Ii5= ---$ $\gamma U5= 0$ $kpP= 1.0000$ $kp= 1.0000$ $\Delta P= 27484.907 W$ $\Delta Pmin= 27484.907 W$ $\Delta P/\Delta Pmin=1.00$ $\Delta U=0.0113$

Tabelul 6.7

varianta 3-2

IR1s*= 79.140-j 13.9545 A
IS1s*= 81.9466-j 49.8446 A
IT1s*= 49.4615-j 34.3301 A

Id1s= 70.1827-j 32.7098 A
Ii1s= 8.9573+j 18.7552 A
Id1s= 77.4309 A Ii1s= 20.7844 A
cosφd1= 0.9064 kni1s= 0.2684

IR5s*= 1.6506+j 22.1410 A
IS5s*= 20-j 53.590 A
IT5s*= 12.9904-j 7.500 A

Id5s= 2.8868+j 3.0940 A
Ii5s= -1.2361+j 19.0470 A
Id5s= 4.2316 A Ii5s= 19.0871 A
γId5s= 0.0546 γIi5s= 0.9183

kpP= 0.9059 knu1= 0.0362
kpS= 0.8505 knu5= 4.5106
ΔP= 37996.428 W γU5= 0.142128
ΔPmin= 27484.907 W ΔU= 0.033
ΔP/ΔPmin=1.38

	Compensare	Echilibrare	Filtrare	Comp.+ echilibrare	Comp.+ filtrare	Comp.+filtr.+echil.	Filtr.+ comp.+ echil.
Y	$C^Y_1 = 9.0169 \mu F$ $I^Y_{R1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{S1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{T1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{d1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{i1} = 0-j 0 A$ $I^Y_{d1} = 32.7098 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$		$C^Y_5 = 2.8512 \mu F$ $L^Y_5 = 0.1421 H$ $I^Y_{R1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{S1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{T1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{d1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{i1} = 0-j 0 A$ $I^Y_{d1} = 10.7739 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$		$C^Y_5 = 8.6562 \mu F$ $L^Y_5 = 0.0468 H$ $I^Y_{R1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{S1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{T1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{d1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{i1} = 0-j 0 A$ $I^Y_{d1} = 32.7098 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$	$C^Y_5 = 8.6562 \mu F$ $L^Y_5 = 0.0468 H$ $I^Y_{R1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{S1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{T1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{d1} = 0+j 32.7098 A$ $I^Y_{i1} = 0-j 0 A$ $I^Y_{d1} = 32.7098 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$	$C^Y_5 = 2.8512 \mu F$ $L^Y_5 = 0.1421 H$ $I^Y_{R1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{S1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{T1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{d1} = 0+j 10.7739 A$ $I^Y_{i1} = 0-j 0 A$ $I^Y_{d1} = 10.7739 A$ $I^Y_{i1} = 0 A$
Δ		$I^{\Delta}_{RS1} = 1.8710 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -21.6567 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 19.7857 A$ LRS=34.02494 H CST= 3.44677 μF LTR= 3.21758 H $I^{\Delta}_{R1} = -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -11.7639+j 17.1349 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 20.7212+j 1.6204 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0+j 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 20.7844 A$		$I^{\Delta}_{RS1} = -17.0140 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -40.5417 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 0.907 A$ CRS= 2.70785 μF CST= 6.45241 μF LTR=70.68356 H $I^{\Delta}_{R1} = -8.9573+j 13.9545 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -11.7639+j 49.8446 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 20.7212+j 34.3301 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 16.5820 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 51.2140 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 40.0989 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0+j 32.7098 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 32.7098 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 20.7844 A$		$I^{\Delta}_{RS1} = 1.8710 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -21.6567 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 19.7857 A$ LRS=34.02494 H CST= 3.44677 μF LTR= 3.21758 H $I^{\Delta}_{R1} = -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -11.7639+j 17.1349 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 20.7212+j 1.6204 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 20.7844 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0+j 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 20.7844 A$	$I^{\Delta}_{RS1} = -10.7936 A$ $I^{\Delta}_{ST1} = -34.3214 A$ $I^{\Delta}_{TR1} = 7.1210 A$ CRS= 1.71786 μF CST= 5.46241 μF LTR= 8.9405 H $I^{\Delta}_{R1} = -8.9573+j 3.1806 A$ $I^{\Delta}_{S1} = -11.7639+j 39.0707 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 20.7212+j 23.5562 A$ $I^{\Delta}_{R1} = 9.5052 A$ $I^{\Delta}_{S1} = 40.8033 A$ $I^{\Delta}_{T1} = 31.3729 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 0+j 21.9358 A$ $I^{\Delta}_{i1} = -8.9573-j 18.7552 A$ $I^{\Delta}_{d1} = 21.9358 A$ $I^{\Delta}_{i1} = 20.7844 A$
A	IR1*= 79.140+j 18.7552 A IS1*= 81.9466-j 17.1349 A IT1*= 49.4615-j 1.6204 A Id1= 70.1827-j 0 A Ii1= 8.9573+j 18.7552 A Id1= 70.1827 A Ii1= 20.7844 A kni1= 0.2961 knu1=0.0361 γId5= 0.0603 knu5= 4.5106 γIi5= 0.9183 γU5=0.141846 kpP= 0.9990 kp= 0.9264 ΔP= 32028.227 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.17 ΔU= 0.014	IR1*= 70.1827-j 32.7098 A IS1*= 70.1827-j 32.7098 A IT1*= 70.1827-j 32.7098 A Id1= 70.1827-j 32.7098 A Ii1= 0-j 0 A Id1= 77.4309 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0.0546 knu5= 4.5106 γIi5=... γU5=0.142129 kpP= 0.9068 kp= 0.8788 ΔP= 35587.910 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.29 ΔU= 0.033	IR1*= 79.140-j 3.1806 A IS1*= 81.9466-j 39.0707 A IT1*= 49.4615-j 23.5562 A Id1= 70.1827-j 21.9358 A Ii1= 8.9573+j 18.7552 A Id1= 73.5309 A Ii1= 20.7844 A kni1= 0.2827 knu1= 0.0362 γId5= 0 knu5= ... γIi5= 0 γU5= 0 kpP= 0.9534 kp= 0.9185 ΔP= 32580.416 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.18 ΔU= 0.0126	IR1*= 70.1827-j 0 A IS1*= 70.1827-j 0 A IT1*= 70.1827-j 0 A Id1= 70.1827-j 0 A Ii1= 0-j 0 A Id1= 70.1827 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0.0603 knu5= 4.5106 γIi5=... γU5=0.141847 kpP= 0.9999 kp= 0.9633 ΔP= 29617.709 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.08 ΔU=0.014	IR1*= 79.140+j 18.7552 A IS1*= 81.9466-j 17.1349 A IT1*= 49.4615-j 1.6204 A Id1= 70.1827-j 0 A Ii1= 8.9573+j 18.7552 A Id1= 70.1827 A Ii1= 20.7844 A kni1= 0.2961 knu1=0.0361 γId5= 0 knu5= ... γIi5= 0 γU5= 0 kpP= 0.9991 kp= 0.9588 ΔP= 29895.425 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.09 ΔU= 0.0113	IR1*= 70.1827-j 0 A IS1*= 70.1827-j 0 A IT1*= 70.1827-j 0 A Id1= 70.1827-j 0 A Ii1= 0-j 0 A Id1= 70.1827 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0 knu5= ... γIi5= ... γU5= 0 kpP= 1.00 kp= 1.00 ΔP= 27484.907 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.00 ΔU=0.0113	IR1*= 70.1827-j 0 A IS1*= 70.1827-j 0 A IT1*= 70.1827-j 0 A Id1= 70.1827-j 0 A Ii1= 0+j 0 A Id1= 70.1827 A Ii1= 0 A kni1= 0 knu1= 0 γId5= 0 knu5= ... γIi5= ... γU5= 0 kpP= 1.00 kp= 1.00 ΔP= 27484.907 W ΔPmin= 27484.907 W ΔP/ΔPmin=1.00 ΔU=0.0113

2° Dacă se acționează numai pentru echilibrarea sarcinii, compensatorul Δ folosit de data aceasta, va absorbi pe fiecare fază un curent egal și de sens contrar cu cel corespunzător sistemului trifazat de curenți de secvență inversă ai sarcinii, anulându-i. Pe fiecare fază a ansamblului consumator-compensator va rezulta același curent, (dacă se raportează fiecare la tensiunea de fază corespondentă), egal cu curentul de secvență directă al sarcinii. Efectul este anulara coeficientului de disimetrie în curenți al ansamblului consumator-compensator și creșterea astfel a factorului de putere. În general prin anulara componentei de secvență inversă pe fundamentală se micșorează însă într-o măsură mai mică pierderile de putere activă din rețeaua de alimentare decât prin anulara componentei reactive din curentul de secvență directă pe fundamentală.

3° Prin acționarea numai cu scopul filtrării curenților armonici ai sarcinii, deși filtrele sunt dimensionate cu scop principal de filtrare, ele vor efectua și o compensare capacitivă transversală simetrică pe fundamentală, determinând o creștere a factorului de putere pe secvența directă a fundamentalei. Astfel, deși coeficientul de disimetrie pe fundamentală se mărește (deoarece se micșorează curentul de secvență directă pe fundamentală prin compensarea unei părți din componenta sa inductivă) și se anulează nivelul curenților armonici de secvență directă și inversă, factorul de putere global se mărește față de situația neaplicării nici unei măsuri de optimizare.

Se poate concluziona din cele observate până aici și din exemplele considerate că aplicând acțiuni de optimizare care vizează scopuri singulare, o clasificare în ordinea eficienței din punct de vedere al reducerii pierderilor de putere activă ar fi :

- compensarea simetrică a puterii reactive pe secvența directă a fundamentalei;
- filtrarea curenților armonici ;
- echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei, pe fundamentală.

Acceasi este însă și ordinea mărimilor puterilor reactive instalate în compensatoare, deci a costurilor. Dacă vom privi cu atenție vom constata că eficiența filtrării este dată în principal de compensarea parțială a puterii reactive pe fundamentală, produsă de către circuitele rezonante. Acest lucru se poate constata cu ușurință prin compararea efectelor acțiunilor care urmăresc compensare+echilibrare respectiv compensare+filtrare.

4° În cazul acționării pentru obținerea simultană a compensării și echilibrării sarcinii pe fundamentală, compensatorul Δ absoarbe pe fundamentală un sistem trifazat de curenți pe fază ce se pot descompune într-un sistem simetric de curenți de secvență directă care, după cum se vede, au numai componentă reactivă, egală și de semn contrar celei a curentului de secvență directă pe fundamentală a sarcinii și un sistem simetric de curenți de secvență inversă având și componentă activă și reactivă, egali și de semn contrar celor ai sarcinii.

Curenții pe fază ai ansamblului consumator-compensator conțin pe fundamentală numai componente de secvență directă (fiind simetrici) de valoare egală cu componenta activă a curentului de secvență directă pe fundamentală a sarcinii. Crește deci până la valoarea maximă factorul de putere pe secvența directă a fundamentalei, se anulează coeficientul de disimetrie al curenților din rețea, rezultând astfel o creștere a factorului de putere global, deși nivelul curentului armonic de secvență directă crește.

5° Atunci când se acționează pentru obținerea simultană a compensării și filtrării, filtrul trifazat folosit în acest scop este simetric, absorbind pe fundamentală un sistem trifazat de curenți pe fază, a căror componentă de secvență directă este egală și de semn contrar componentei reactive a curentului de secvență directă pe fundamentală al sarcinii. Coeficientul de disimetrie pe fundamentală al ansamblului consumator-compensator crește și nivelul curenților armonici de secvență directă și inversă se anulează, dar ea și în cazul

precedent, creșterea factorului de putere pe fundamentală dictează asupra factorului de putere global, obținându-se o creștere a valorii acestuia.

Comparând cazurile 4 și 5 din punct de vedere al afectului asupra pierderilor de putere activă, se constată că dintre cele două acțiuni și anume echilibrarea sau filtrarea este mai eficientă aplicarea uneia sau alteia, după cum componenta de secvență inversă pe fundamentală respectiv regimul deformant din curenții de sarcină au o prezență mai pregnantă în curenții de sarcină.

6° Dacă se acționează cu scopul obținerii simultane a compensării puterii reactive și echilibrării sarcinii pe fundamentala curenților dar și pentru filtrarea armonicilor de curent, prin folosirea de data aceasta a celor două compensatoare (Y și Δ), dimensionate în două variante așa cum s-a arătat mai sus, rezultă:

- filtrul (compensatorul Y) fiind simetric intervine pe fundamentală numai pe secvența directă, în primul caz realizând compensarea integrală a puterii reactive (până la $\cos\varphi_{d1} = 1$) și doar parțială în cel de-al doilea ; de fapt dimensionarea filtrelor și modul de intervenție al lor asupra circulației de curenți sunt identice cu cazurile *compensare+filtrare*, respectiv *filtrare*, prezentate mai sus;

- compensatorul Δ în ambele cazuri simetrizează sarcina rețelei pe fundamentală, pe fazele sale curenții de secvență inversă pe fundamentală fiind același, egal și de semn contrar curentului de secvență inversă al sarcinii. Diferența între cele două cazuri se manifestă pe secvența directă a fundamentalei : în primul caz compensatorul Δ nu intervine, compensarea puterii reactive pe secvența directă fiind făcută în întregime de către filtru iar în al doilea caz el intervine doar cu diferența între necesarul de reactiv pentru compensarea până la $\cos\varphi_{d1} = 1$ și cantitatea furnizată de filtru.

Ambele variante conduc la aceleași efecte, care, oglindite sub forma indicatorilor caracteristici, înseamnă :

- anularea coeficienților de disimetrie din curenți ;
- anularea nivelului armonic pe secvența directă ;
- maximizarea factorului de putere global care devine egal cu cel corespunzător de pe secvența directă a fundamentalei ;
- micșorarea pierderilor de putere activă până la nivelul minim.

Există însă, în afară de diferența funcțională amintită mai sus și una care ține de aspectul economic și anume : pentru construirea compensatoarelor dimensionate prin cea de-a doua metodă este necesară o putere reactivă instalată mult mai mică, în special la tipul inductiv, ceea ce se constituie într-un al doilea avantaj major față de primul caz. O comparație cantitativă din acest punct de vedere se poate vedea la paragraful 6.3.3.

6.3. Analiza interdependenței dintre compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor de curent din perspectiva calității tensiunii.

6.3.1. Punerea problemei

Calitatea tensiunii în nodurile de consum ale rețelelor electrice de distribuție este unul dintre instrumentele principale folosite pentru aprecierea bunei funcționări a rețelei respective, fiind influențată în permanență de echilibrul energetic al ansamblului sursă-rețea-consumator.

Cei mai importanți parametri pentru evaluarea cantitativă a calității tensiunii într-un nod de consum al rețelei, sunt :

- valoarea efectivă a tensiunii și abaterea tensiunii față de o valoare impusă, de obicei egală cu tensiunea nominală la nivelul respectiv;
- coeficienții de nesimetrie inversă și homopolară ai tensiunii ;
- nivelul armonicilor de tensiune ;
- coeficientul de distorsiune.

Cum tensiunile în nodurile unei rețele sunt date de fapt de căderile de tensiune produse de curenții care parcurg diferitele elemente de rețea, calitatea tensiunii este influențată indirect de acești doi factori. De aceea acțiunile întreprinse pentru optimizarea regimurilor de funcționare ale rețelei prin folosirea unor mijloace care modifică circulația de curenți, va avea inevitabil efect și asupra calității tensiunii. Iată de ce, analiza efectelor acțiunilor de optimizare descrise în subcapitolele anterioare, trebuie să includă și calitatea tensiunii.

6.3.2. Elemente de calcul

În acest subcapitol ne propunem să stabilim relațiile analitice pentru parametrii care definesc calitatea tensiunii într-un nod consumator, în cazul unei rețele de configurație și sarcină date și apoi legătura dintre acești parametri și cei care ilustrează circulația de curenți, astfel încât să se poată face joncțiunea cu efectele acțiunilor de optimizare descrise mai sus.

Se consideră aceeași rețea simplă, ilustrată în figura 6.1. și aceleași ipoteze de calcul : un consumator nesimetric și deformant este alimentat printr-o linie electrică presupusă simetrică, dintr-o rețea (un sistem) de putere foarte mare (teoretic infinită), ce asigură tensiuni de fază sinusoidale, simetrice, de succesiune directă.

Referința pentru calculul fazorial care urmează, o constituie fazorul tensiunii fazei R la sursă, considerată ca fiind situată în axa reală.

a) *Abaterea tensiunii consumatorului U_c față de tensiunea nominală, în mărimi de fază, este :*

$$\Delta U = \frac{U_n - U_c}{U_n} \quad (6.67)$$

Dacă ne referim la abaterea tensiunii U_c față de tensiunea U_0 , cunoscută, aceasta poate fi scrisă astfel :

$$\Delta U_0 = \frac{U_0 - U_c}{U_n} \quad (6.68)$$

Datorită însă nesimetriei și deformării curenților de sarcină, expresia analitică a tensiunii U_c este foarte dificil de exprimat. Se pleacă de la expresia cunoscută :

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} U_k^2} \quad (6.69)$$

în care U_k ($k = 2, \infty$) sunt valorile efective ale armonicilor tensiunii de fază la bornele consumatorului. Deoarece acestea au însă pe fiecare fază alte valori, pentru a ieși din impas se lucrează cu valori medii ale acestora [114]:

$$U_1^2 = \frac{1}{3}(U_{R1}^2 + U_{S1}^2 + U_{T1}^2) = U_{d1}^2 + U_{i1}^2 + U_{h1}^2 \quad (6.70)$$

Pe fundamentală se trece astfel la calculul în componente simetrice, U_{d1}, U_{i1}, U_{h1} fiind componentele simetrice ale tensiunilor de fază, pe fundamentală. Urmează explicitarea fiecăreia dintre acestea :

$$\underline{U}_{d1} = \underline{U}_0 - \Delta \underline{U}_{d1} \quad (6.71)$$

$$\Delta \underline{U}_{d1} = \underline{I}_{d1} \cdot \underline{Z}_{d1} = \Delta U_{d1} + j \cdot \delta U_{d1} \quad (6.72)$$

$$\Delta U_{d1} = I_{d1a} \cdot R_{d1} + I_{d1r} \cdot X_{d1} \quad (6.73)$$

$$\delta U_{d1} = I_{d1a} \cdot X_{d1} - I_{d1r} \cdot R_{d1} \quad (6.74)$$

$$|\Delta \underline{U}_{d1}| = \sqrt{\Delta U_{d1}^2 + \delta U_{d1}^2} = I_{d1} \cdot Z_1 \quad (6.75)$$

$$U_{d1} = \sqrt{(U_0 - \Delta U_{d1})^2 + \delta U_{d1}^2} \quad (\underline{U}_0 = U_0) \quad (6.76)$$

$$I_{d1} = \sqrt{I_{d1a}^2 + I_{d1r}^2} \quad (6.77)$$

$$Z_1 = Z_{d1} = \sqrt{R_{d1}^2 + X_{d1}^2} \quad (6.78)$$

$$\underline{U}_{i1} = \Delta \underline{U}_{i1} = \underline{I}_{i1} \cdot \underline{Z}_{i1} = \Delta U_{i1} + j \cdot \delta U_{i1} \quad (6.79)$$

$$\Delta U_{i1} = I_{i1a} \cdot R_{i1} + I_{i1r} \cdot X_{i1} \quad (6.80)$$

$$\delta U_{i1} = I_{i1a} \cdot X_{i1} - I_{i1r} \cdot R_{i1} \quad (6.81)$$

$$U_{i1} = \sqrt{\Delta U_{i1}^2 + \delta U_{i1}^2} = I_{i1} \cdot Z_1 \quad (6.82)$$

$$I_{i1} = \sqrt{I_{i1a}^2 + I_{i1r}^2} \quad (6.83)$$

$$Z_1 = Z_{i1} = \sqrt{R_{i1}^2 + X_{i1}^2} = Z_{d1} \quad (6.84)$$

$$\underline{U}_{h1} = \Delta \underline{U}_{h1} = \underline{I}_{h1} \cdot \underline{Z}_{h1} = 0 \quad (\underline{I}_{h1} = 0) \quad (6.85)$$

În relațiile de mai sus, mărimile care intervin au următoarele semnificații :

$$\underline{I}_{d1} = I_{d1a} - j \cdot I_{d1r}$$

$\underline{I}_{i1} = I_{i1a} - j \cdot I_{i1r}$ fazorii curenților de secvență directă respectiv inversă (de referință - corespunzători fazei R) pe fundamentală, care circulă pe linia de alimentare, exprimați prin cele două componente, activă și reactivă, rezultate prin raportare la tensiunea fazei R a sursei ;

$\underline{Z}_{d1} = R_{d1} + j \cdot X_{d1} = \underline{Z}_{i1} = \underline{Z}_1$ impedanța de secvență directă (inversă) longitudinală a liniei electrice în planul fundamentalei și componentele sale : rezistivă respectiv reactivă ;

La scrierea relațiilor (6.79) s-a avut în vedere că consumatorul dezechilibrat poate fi considerat ca sursă ideală de curenți (puteri) de secvență inversă [56]. În aceste condiții, având în vedere și faptul că tensiunea sursei nu conține componentă nesimetrică, componenta nesimetrică a tensiunii la bornele consumatorului în planul fundamentalei, U_{i1} , este tot mai căderea de tensiune de secvență inversă pe linia electrică.

Pe armonicile superioare se folosesc de asemenea valori medii [53]:

$$U_k = \frac{1}{3}(U_{kR} + U_{kS} + U_{kT}) \quad (6.86)$$

$$\underline{U}_{kf} = \Delta \underline{U}_{kf} = \underline{I}_{kf} \cdot \underline{Z}_k = \Delta U_{kf} + j \cdot \delta U_{kf} \quad f = R, S, T \quad (6.87)$$

$$\Delta U_{kf} = I_{kfa} \cdot R_k + I_{kfr} \cdot X_k \quad (6.88)$$

$$\delta U_{kf} = I_{kfa} \cdot X_k - I_{kfr} \cdot R_k \quad (6.89)$$

$$U_{kf} = \sqrt{\Delta U_{kf}^2 + \delta U_{kf}^2} = I_{kf} \cdot Z_k \quad (6.90)$$

$$U_k = \frac{1}{3} \sum_{f=R,S,T} (I_{kf} \cdot Z_k) = I_k \cdot Z_k \quad (6.91)$$

$$I_k = \frac{1}{3} \sum_{f=R,S,T} I_{kf} \quad (6.92)$$

mărimile ce intervin având următoarele semnificații :

$\underline{I}_{kf} = I_{kfa} - j \cdot I_{kfr}$ - fazorii curenților fazei f în planul armonicii k și componentele lor active respectiv reactive, rezultate prin raportare la tensiunea fazei corespondente a sursei în planul fundamentalei ;

$\underline{Z}_k = R_k + j \cdot X_k$ - impedanța longitudinală a liniei în planul armonicii k ; de obicei la liniile electrice de distribuție se poate considera $R_l \approx R_k$, doar reactanța depinzând de rangul armonicii : pentru armonici de ordinul $k=3p \pm 1$ se poate considera $X_k \approx k \cdot X_l$;

I_k - valoarea efectivă medie a curenților armonici de pe linie.

Relația (6.87) este valabilă în ipoteza considerării consumatorului nelinier ca sursă ideală de curenți armonici (de secvență directă și inversă) [59],[70]. În aceste condiții, având în vedere și faptul că tensiunea sursei nu conține componentă armonică, componenta armonică a tensiunii la bornele consumatorului, U_k , este tocmai căderea de tensiune armonică pe linia electrică.

S-au neglijat parametrii echivalenți transversali atât pe fundamentală cât și în planul armonicii k .

Se poate acum scrie tensiunea nodului consumator sub forma :

$$U_c = \sqrt{\left[U_0 - (I_{d1a} R_1 + I_{d1r} X_1) \right]^2 + (I_{d1a} X_1 - I_{d1r} R_1)^2 + (I_{d1} Z_1)^2 + \frac{1}{9} \sum_{k=2}^{\infty} \left[\sum_{f=R,S,T} (I_{kf} Z_k) \right]^2} \quad (6.93)$$

b) *Coefficienții de disimetrie* ai tensiunii la bornele consumatorului se pot calcula atât pe fundamentală cât și în planul armonicii k , cu relațiile :

$$k_{m1} = \frac{U_{i1}}{U_{d1}} = \frac{\Delta U_{i1}}{U_{d1}} \approx \frac{\Delta U_{i1}}{U_0 - \Delta U_{d1}} = \frac{I_{i1} \cdot Z_1}{U_0 - I_{d1} (\cos \varphi_{d1}^* R_1 + \sin \varphi_{d1}^* X_1)} = \frac{k_{m1} \cdot Z_1}{Z_0 - (\cos \varphi_{d1}^* R_1 + \sin \varphi_{d1}^* X_1)} \quad (6.94)$$

$$k_{mk} = \frac{U_{ik}}{U_{dk}} = \frac{\Delta U_{ik}}{\Delta U_{dk}} = \frac{I_{ik}}{I_{dk}} = k_{mik} \quad (6.95)$$

unde :

φ_{d1}^* este unghiul de defazaj al fazorului curențului de secvență directă care circulă pe linie, față de tensiunea fazei R pe fundamentală (axa reală) ;

Z_0 - impedanța echivalentă de secvență directă a rețelei în planul fundamentalei în nodul de alimentare, văzută dinspre linie ;

U_{dk}, U_{ik} - componentele de secvență directă și inversă ale tensiunii U_c în planul armonicii k ;
 I_{dk}, I_{ik} - componentele de secvență directă și inversă ale curenților pe fazele liniei, în planul armonicii k ;
 k_{ml}, k_{nk} - coeficienții de disimetrie ai curenților pe linie în planul fundamentalei, respectiv al armonicii de rang k ;

c) Nivelul armoniilor de tensiune în nodul C se calculează cu relația :

$$\begin{aligned} \gamma_{Uk} &= \frac{U_k}{U_1} \approx \frac{\Delta U_k}{U_{d1}} \approx \frac{\Delta U_k}{U_0 - \Delta U_{d1}} = \\ &= \frac{I_k \cdot Z_k}{U_0 - I_{d1} (R_1 \cos \varphi_{d1}^* + X_1 \sin \varphi_{d1}^*)} \approx \gamma_{Ik} \frac{Z_k}{Z_0 - (R_1 \cos \varphi_{d1}^* + X_1 \sin \varphi_{d1}^*)} \end{aligned} \quad (6.96)$$

în care cu γ_{Ik} este notat nivelul mediu al armoniilor curenților pe fazele liniei.

Analizând relațiile (6.94 ÷ 6.96) se constată că atât coeficienții de nesimetrie ai tensiunii, cât și nivelul armonicii k de tensiune depind de coeficienții de disimetrie și respectiv de rangul armonicii k de curent corespunzători prin intermediul unor coeficienți egali cu raportul dintre impedanța de secvență inversă a liniei și impedanța de secvență directă a consumatorului în planul fundamentalei sau al armonicii de rang k . Acești coeficienți sunt subunitari în planul fundamentalei și unitari sau supraunitari în planul armonicii k .

În ceea ce privește armonicile de tensiune, acestea sunt atenuate sau amplificate față de cele similare de curent dependent de faptul că raportul dintre impedanța armonică a liniei și cea de secvență directă a consumatorului este sub sau supraunitar.

Se poate acum calcula și *factorul de putere definit pe baza gradului de utilizare a puterii active*, prezentat în paragraful 6.2.1. Relația de calcul este (6.16) în care însă nu intervine componenta corespunzătoare secvenței homopolare :

$$k_{pp} = \frac{3U_{d1}I_{d1} \cos \varphi_{d1} + 3U_{i1}I_{i1} \cos \varphi_{i1} + \sum_{f=R,S,T} \sum_{k \neq 1} (U_{kf}I_{kf} \cos \varphi_{kf})}{3U_{d1}I_{d1}} \quad (6.97)$$

unde :

$\varphi_{d1}, \varphi_{i1}$ sunt unghiurile de defazaj între curenții de secvență corespunzători curenților de fază ai ansamblului consumator-compensator în planul fundamentalei și tensiunile de secvență corespundente de la bornele acestuia;
 φ_{kf} - unghiurile de defazaj între curenții armonicii pe faze și tensiunile armonice corespundente, la bornele ansamblului consumator-compensator.

6.3.3. Aplicație numerică

O imagine cantitativă asupra calității tensiunii într-o rețea ce funcționează în regim dezechilibrat și deformant a fost oferită de aplicația numerică descrisă în subcapitolul precedent, prin completarea programului cu relațiile de calcul care permit evaluarea calității tensiunii în nodul consumator. În rezultatele calculelor sunt așadar incluse :

k_{ml}, k_{m5} - coeficienții de disimetrie ai tensiunii în planul fundamentalei respectiv al armonicii a cincea la bornele consumatorului echivalent (ansamblului consumator-compensator) ;

- γ_{U5} - nivelul armonicii a cincea a tensiunii la bornele consumatorului echivalent ;
 ΔU - abaterea tensiunii la bornele consumatorului echivalent, față de tensiunea de referință ;
 k_{pp} - factorul de putere calculat pe baza puterilor (relația 6.97), la bornele consumatorului echivalent.

Rezultatele calculelor sunt prezentate tot în tabelele 6.2.-6.7. Interpretarea lor din punctul de vedere al calității tensiunii și influenței acțiunilor de optimizare asupra parametrilor ce o definesc, este următoarea :

Cazul 1. Nu se intervine pentru ameliorarea regimului de funcționare.

Tensiunea la bornele consumatorului echivalent are componente în planul fundamentalei și în planul armonicilor $k > 1$, $k \neq 3p$. În planul fundamentalei există o componentă de secvență directă, principală, rezultată din tensiunea pe barele sistemului din care se scade pierderea de tensiune determinată pe linie de curentul de secvență directă pe fundamentală I_{d1} și o componentă de secvență inversă corespunzătoare pierderii de tensiune determinată de curentul de secvență inversă I_{i1} pe impedanța liniei Z_l în planul fundamentalei. Cu cât I_{i1} și respectiv Z_l sunt de valoare mai mare, cu atât și componenta tensiunii de secvență inversă va fi mai mare.

În planul armonicilor k , tensiunea U_c prezintă componente armonice corespunzător pierderilor de tensiune armonice determinate de curenții I_k pe impedanța armonică a liniei Z_k . Mărimea acestor componente depinde de mărimea lui I_k și Z_k , acesta din urmă fiind determinată de rangul armonicii k .

Este posibil ca la un consumator dezechilibrat și/sau neliniar alimentat de la o rețea puternică, deși valoarea efectivă a tensiunii este cuprinsă în limitele admisibile, funcționarea unor categorii de receptoare, de exemplu a mașinilor rotative, să fie perturbată. Aceasta din cauza prezenței în tensiune a unei componente însemnate de secvență inversă și/sau a unor componente armonice semnificative. (Funcționarea receptorilor termici nu este perturbată într-o astfel de situație). Concluzia este că, *deși uneori abaterea tensiunii se poate încadra în limitele admisibile, calitatea tensiunii rămâne necorespunzătoare*. Prin urmare, pentru o caracterizare completă a calității tensiunii într-un nod, se impune ca pe lângă valoarea tensiunii și respectiv abaterea tensiunii în nodul respectiv să fie determinate valorile coeficienților de disimetrie pe fundamentală și pe armonici și nivelul armonicilor.

Cazul 2. Se acționează numai pentru compensarea puterii reactive.

Prin anularea componentei reactive a curentului de secvență directă pe fundamentală, s-a micșorat valoarea efectivă a acestuia și deci căderea de tensiune corespunzătoare. Ca urmare abaterea tensiunii nodului consumator se reduce, tensiunea efectivă a acestuia crescând pe seama componentei de secvență directă. Coeficientul de disimetrie k_{m1} scade, la fel și rangul armonicilor de tensiune γ_{Uk} . Se poate afirma că tensiunea la bornele consumatorului și-a îmbunătățit calitatea.

În schimb, pe linie curentul de secvență directă reducându-se, crește coeficientul de disimetrie k_{m1} , la fel și nivelul armonicilor de curent γ_{Ik} . Prin urmare atât nesimetria cât și deformarea curenților care circulă în rețea s-a accentuat.

Deci creșterea calității tensiunii la bornele consumatorului s-a realizat practic prin scăderea calității curenților furnizați de sursă.

Cazul 3. Se acționează numai pentru echilibrarea sarcinii

Prin anularea componentei de secvență inversă pe fundamentală a curentului ce circulă pe linie se anulează și componenta de secvență inversă a tensiunii la bornele consumatorului.

Valoarea efectivă a acesteia scade deci crește abaterea tensiunii și nivelul armonicilor. Prin urmare, regimul nesimetric în tensiune și curent se atenuează, dar se accentuează regimul nesinusoidal. Pierderile de putere pe linie și factorul de putere la bornele consumatorului echivalent se modifică, scad sau cresc dependent de ponderea pe care o au cele două aspecte: nesimetria și respectiv regimul nesinusoidal. Amplificarea regimului deformant devine însă periculoasă sub aspectul apariției unor fenomene de rezonanță armonică [30].

Cazul 4. Se acționează pentru filtrarea armonicilor de curent.

Pe lângă faptul că componentele armonice de rang k ale curentului vehiculat prin rețea și ale tensiunii pe barele consumatorului sunt anulate, datorită micșorării curentului pe fundamentală (prin compensarea parțială a componentei sale reactive) se reduce pierderea de tensiune pe linie în planul fundamentalei; deci este posibil ca tensiunea la bornele consumatorului să crească, coeficientul de disimetrie să scadă, nivelul armonicilor fiind nul. Calitatea tensiunii se îmbunătățește. Dacă nivelul curenților armonici este mare, este posibil ca ponderea componentelor armonice să fie mare și prin filtrarea armonicilor, tensiunea în nodul consumator să scadă, așa cum se întâmplă de altfel în majoritatea exemplelor prezentate.

Cazul 5. Se compensează puterea reactivă și se echilibrează sarcina

Tensiunea nodului consumator se modifică pe scema creșterii componentei U_{d1} și a anulării componentei inverse U_{i1} . De regulă efectul compensării este preponderent și valoarea efectivă a tensiunii U_c crește. Ca urmare scade nivelul armonicilor de tensiune, deci calitatea tensiunii crește. În schimb, deoarece valoarea pe fundamentală a curenților de linie scade, regimul deformant în curenții care circulă în rețea se accentuează.

Cazul 6. Se acționează pentru compensarea puterii reactive și pentru filtrarea armonicilor de curent.

Prin compensarea puterii reactive și filtrarea armonicilor se reduce pierderea de tensiune pe linie în planul fundamentalei, crește componenta de secvență directă a tensiunii la bornele consumatorului, se anulează nivelul armonicilor de tensiune și se reduce și gradul (coeficientul) de disimetrie. În schimb, curenții pe linie devin sinusoidali dar mai nesimetrice, coeficientul de disimetrie crescând ca valoare.

Cazul 7. Se acționează pentru compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor de curent.

Abordarea unui singur aspect din cele trei nu este în totalitate avantajoasă. Deși, după cum rezultă și din tabelul 6.8, prin compensarea puterii reactive calitatea tensiunii se îmbunătățește, pierderile de putere pe linie scad, iar factorul de putere crește; calitatea curenților care circulă între sursă și consumator se înrăutățește, gradul de nesimetrie pe fundamentală și de deformare al acestora accentuându-se.

Deci pe lângă criteriile impuse inițial în procesul de analiză a interdependenței dintre cele trei aspecte a intervenit și calitatea curenților care circulă pe linia de alimentare a consumatorului, definită prin gradul de nesimetrie (disimetrie) în planul fundamentalei și prin nivelul armonicilor. O calitate necorespunzătoare a acestor curenți ar putea periclita siguranța în funcționare a rețelei, mai ales prin fenomenele de rezonanță armonică.

Prin urmare, calitatea tensiunii nodului consumator nu poate fi analizată independent de aceea a curenților care circulă în rețeaua de alimentare.

Dacă se abordează două aspecte: compensare cu echilibrare sau compensare cu filtrare, nici în aceste situații nu se asigură toate dezideratele menționate mai sus.

O soluționare completă a problemelor propuse se poate asigura numai dacă rezolvarea celor trei aspecte se face simultan

Tabelul 6.8. Efectele măsurilor de compensare a puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor

Măsura	Calitatea tensiunii			Circulația de putere reactivă	Nesimetria curenților pe linie	Deformarea curenților pe linie	Pierderile de putere	Factorul de putere
	ΔU	k_{nrl}	γ_{Uk}					
	U_c							
Compensarea puterii reactive	scade	scade	scade	se reduce	se accentuează	se accentuează	scad	crește
	crește							
Echilibrarea sarcinii	crește	se anulează	crește	nu se modifică	se elimină	se accentuează	nu se poate preciza	nu se poate preciza
	scade							
Filtrarea armonicilor de curent	nu se poate preciza	nu se poate preciza	se anulează	se reduce	se accentuează	se elimină	scad	crește
	nu se poate preciza							

De remarcat că din cauza anulării componentelor inversă și armonice ale tensiunii nodului consumator, este posibil ca scăderea pierderii de tensiune pe linie în planul fundamentalei să nu conducă la o creștere sensibilă a valorii efective a tensiunii la bornele consumatorului. În schimb, coeficientul de disimetrie și nivelul armonicilor, tensiunii și curenților pe linie sunt nuli, deci calitatea tensiunii la bornele consumatorului și a curenților forțați de sursă este optimă.

Referindu-ne la o parte din rezultatele numerice ale aplicației, mai precis a celor corespunzătoare variantei 1-1 (tabelul 6.2.), se desprind următoarele observații:

- deși curenții absorbiți de consumator sunt dezechilibrați, $k_{nrl}=36,28\%$, nesinusoidali ($\gamma_{Id5}=11,82\%$, $\gamma_{U5}=46,75\%$) abaterea tensiunii la bornele consumatorului este relativ mică ($\Delta U = 1,26\%$), nesimetria tensiunii pe fundamentală relativ redusă ($k_{nrl} = 0,583\%$), nivelul armonicii a 5-a a tensiunii este relativ pronunțat ($\gamma_{U5} = 6,68\%$);
- prin amplasarea puterii reactive pe fundamentală, abaterea tensiunii s-a redus la 0,91%, nesimetria tensiunilor și nivelul armonicii a 5-a au rămas practic neschimbate; în schimb, s-a accentuat nesimetria curenților ($k_{nrl}=47,63\%$) și gradul lor de deformare ($\gamma_{Id5}= 15,52\%$). Pierderile de putere pe linie s-au redus sensibil ($\Delta P/\Delta P_{min} = 1,3$);
- prin echilibrarea sarcinii abaterea tensiunii crește foarte puțin ($\Delta U = 1,27\%$), nesimetria tensiunilor și curenților dispăre pe fundamentală ($k_{nrl} = 0$, $k_{nrl} = 0$), deformarea rămâne practic neschimbată atât în tensiuni ($\gamma_{U5}=6,68\%$), cât și în curenți ($\gamma_{Id5} = 11,82\%$). Pierderile de putere sunt relativ mari ($\Delta P/\Delta P_{min} = 1,8$);
- prin filtrarea armonicilor de curent abaterea tensiunii crește ($\Delta U = 1,41\%$) și se accentuează nesimetria curenților ($k_{nrl} = 39,46\%$). Pierderile de putere rămân încă de valoare relativ ridicată ($\Delta P/\Delta P_{min} = 1,68$).
- prin compensare și echilibrare, abaterile tensiunilor se reduc sensibil ($\Delta U = 0,91\%$), pierderile de putere și factorul de putere sunt foarte aproape de valorile optimă ($\Delta P/\Delta P_{min} = 1,07$, $k_{pp} = 0,995$, $k_p=0,9651$), dar se mai menține regimul deformant relativ pronunțat ($\gamma_{Id5} = 15,52\%$, $\gamma_{U5} = 6,65\%$);
- prin compensare și filtrare abaterea tensiunii este relativ redusă ($\Delta U = 1,13\%$), dar nu prezintă valoarea optimă ($\Delta U = 0,91\%$), nesimetria persistă în tensiuni ($k_{nrl} = 47,63\%$). Pierderile de putere deși reduse, ($\Delta P/\Delta P_{min} = 1,23$) nu au valoarea minimă ($\Delta P/\Delta P_{min} = 1$);
- prin compensare, filtrare și echilibrare pierderea de tensiune se reduce ($\Delta U = 1,13\%$), fără a atinge valoarea optimă, dar tensiunile devin simetrice și sinusoidale, la fel și curenții. Pierderile de putere se reduc la valoarea optimă (minimă), la fel și factorul de putere atinge valoarea 1. Curenții pe linia de alimentare sunt simetrici și sinusoidali.

Pentru aprecierea eficienței economice a acțiunilor de ameliorare ale regimurilor de funcționare ale rețelei, este necesară și o comparație între puterile reactive ce trebuie instalate în cele două compensatoare, folosite individual sau simultan, conform celor descrise mai sus. Determinarea lor se poate face prin aplicarea următoarelor relații :

- în cazul compensatorului Y folosit numai pentru compensarea simetrică a puterii reactive pe fundamentală:

$$Q_C^Y = 3 \cdot U_f^2 \cdot \omega \cdot C_1^Y \quad (6.98)$$

- în cazul FTBI :

$$Q_C^Y = 3 \cdot U_{C1}^2 \cdot \omega \cdot C_5^Y \quad Q_L^Y = 3 \cdot U_{L1}^2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot L_5^Y} \quad (6.99)$$

în care U_{C1} , U_{L1} sunt tensiunile pe fundamentală aplicate condensatorului respectiv bobinei [35]:

$$U_{C1} = U_{f1} \cdot \frac{k^2}{k^2 - 1} \quad (6.100)$$

$$U_{L1} = U_{C1} - U_{f1} = U_{f1} \cdot \frac{1}{k^2 - 1} \quad (6.101)$$

U_{f1} fiind tensiunea de fază pe fundamentală.

- în cazul compensatorului Δ :

$$Q_C^\Delta = U_f^2 \cdot \omega \cdot (C_{RS} + C_{ST} + C_{TR}) \quad (6.102)$$

$$Q_L^\Delta = U_f^2 \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \left(\frac{1}{L_{RS}} + \frac{1}{L_{ST}} + \frac{1}{L_{TR}} \right) \quad (6.103)$$

Cu aceste relații și considerând tensiunea de fază pe fundamentală ca fiind egală cu cea nominală, rezultă valorile aproximative din tabelul 6.9. (aplicate în cazul variantei 1-1).

Tabelul 6.9. Puterile reactive necesare pentru compensare (în kvar), față în față cu eficiența compensării, exprimată prin reducerea pierderilor.

	Compensare	Echilibrare	Filtrare	Comp.+echil.	Comp.+filtr.	Comp.+filtr.+echil	Filtr.+comp.+echil
Q_C^Y	-2078,7	-	-441,4	-	-2153,4	-2153,4	-441,4
Q_L^Y	-	-	17,6	-	86,0	86,0	17,6
Q_C^Δ	-	-707,2	-	-2085,4	-	-707,2	-1802,9
Q_L^Δ	-	707,2	-	18,1	-	707,2	159,3
$Q_C^Y + Q_C^\Delta$	-2078,7	-707,2	-441,4	-2085,4	-2153,4	-2860,6	-2244,3
$Q_L^Y + Q_L^\Delta$	-	707,2	17,6	18,1	86,0	793,2	176,9
$\Delta P \quad \Delta P_{min}$	1,30	1,80	1,68	1,07	1,23	1,00	1,00

Prima observație care se poate face se referă la compararea celor două metode de dimensionare ale compensatoarelor folosite în situația în care se urmărește obținerea simultană a celor trei efecte : metoda a doua este mai economică, necesitând o putere reactivă mai redusă cu 21,5 % la tipul capacitiv (2244,3 kvar față de 2860,6 kvar) și cu 77,7 % la tipul inductiv (176,9 kvar față de 793,2 kvar), în condițiile obținerii aceluiași rezultat.

O ierarhizare a celorlalte acțiuni din punct de vedere al eficienței economice necesită calcule mai complexe, prin aplicarea unuia dintre criteriile obiective cunoscute în literatura de specialitate. Sunt necesare informații suplimentare referitoare la costul puterilor reactive unitare instalate, prețul energiei electrice pierdute în rețeaua de alimentare, daunele provocate atât furnizorului cât și consumatorului datorită calității necorespunzătoare a energiei electrice , etc., care nu fac obiectul lucrării de față.

Capitolul 7

CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

7.1. Concluzii generale

Optimizarea rețelelor electrice de distribuție este o problemă extrem de complexă, de mari dimensiuni.

După ce în *primul capitol* al lucrării de față sunt precizate principalele variabile, restricții și funcții obiectiv ale acestei probleme, atenția autorului este polarizată spre domeniul perturbațiilor ce apar în regimurile normale de funcționare al rețelelor de distribuție.

Aria de interes este restrânsă o dată în plus în *capitolul al doilea*, în care autorul dezvoltă subiectul studiului regimurilor permanente dezechilibrate și deformante ale rețelelor electrice, de altfel un subiect de prim plan în preocupările sale științifice, stabilind astfel “îmaginea de fond” în care sunt reliefate elementele centrale ale acestei lucrări.

Este vorba despre dezvoltarea și validarea experimentală a modelelor matematice aferente echilibrării rețelelor electrice de distribuție prin compensarea reactivă transversală a sarcinilor echivalente dezechilibrate și analizarea acestei metode din perspectiva integrării ei între cele destinate reglajului circulației puterii reactive și atenuării regimului deformant.

Acest demers vizează fundamentarea fenomenologică și matematică a unor sisteme complexe, de tip FACTS, care, în condițiile dinamicii actuale din domeniul electronicii de putere, automatizării și informaticii, pot constitui instrumente extrem de eficiente în controlul și reglajul on-line, necesar unei funcționări optime a rețelelor de distribuție aparținând unui viitor mai mult sau mai puțin apropiat.

Astfel, *capitolul al treilea* este dedicat dezvoltării matematice a metodei de echilibrare prin compensare reactivă transversală, în rețelele de distribuție cu trei conductoare. Principalele concluzii ce se pot evidenția aici sunt:

- sarcina trifazată echivalentă dezechilibrată, având orice fel de caracter și orice grad de dezechilibru, poate fi transformată într-o sarcină perfect simetrică, pur rezistivă sau cu un factor de putere oarecare, impus, prin compensare reactivă transversală ;
- compensatorul are în mod necesar o schemă echivalentă în Δ , a cărei principală calitate constă în aceea că, în anumite condiții, sistemul celor trei curenți pe fazele sale formează un sistem de secvență inversă ;
- schema echivalentă a compensatorului conține numai elemente reactive, susceptanțe, valoarea și caracterul lor depinzând de parametrii echivalenței ai sarcinii nesimetrice, pe care o compensează ;

- pentru valorile susceptanțelor de compensare, stabilite din condiția ca ansamblul consumator-compensator să se constituie într-o sarcină simetrică (anularea curentului de secvență inversă al consumatorului), există o infinitate de soluții; de aceea determinarea lor a fost făcută succesiv prin aplicarea uneia dintre următoarele condiții complementare:
 - compensarea totală a puterii reactive absorbite din rețea;
 - compensarea parțială a puterii absorbite, până la un factor de putere impus;
 - reglarea tensiunii pe barele consumatorului;
 - instalarea unei puteri reactive minime în compensator;
 - minimizarea pierderilor de putere activă în rețeaua de alimentare;
- efectuând calculul circulației de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator cu ajutorul componentelor de secvență, se evidențiază mecanismul compensării:
 - compensatorul se poate descompune în două compensatoare fictive: unul simetric Δ_d căruia îi corespunde un sistem trifazat de curenți pe faze de secvență directă, egal și de semn contrar componentei reactive a componentei de secvență directă a sarcinii și unul nesimetric Δ_i , pe fazele căruia se formează un sistem trifazat de curenți de secvență inversă, egal și de semn contrar celui al sarcinii;
 - ansamblul consumator-compensator absoarbe din rețea un sistem trifazat simetric de curenți cu caracter pur rezistiv, de secvență directă, identic de fapt cu sistemul trifazat al componentelor active ale curenților de secvență directă ai sarcinii, dinaintea compensării;
- exprimarea circulației de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator, în componente de fază conduce la următoarele concluzii:
 - pe fiecare fază compensatorul furnizează un curent a cărui componentă reactivă este egală și de sens contrar cu componenta reactivă a curentului de sarcină pe faza respectivă;
 - componentele active ale curenților de pe fazele compensatorului sunt pozitive sau negative, fiind chiar diferența dintre componenta activă a curentului de secvență directă a sarcinii (care constituie încărcarea pe fiecare fază a rețelei după compensare) și componenta activă a fiecărui curent pe fazele sarcinii în parte;
 - calculul în componente de fază a circulației de puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator, conduce la explicarea mecanismului energetic al echilibrării, astfel :
 - pe fiecare fază compensatorul debitează o putere reactivă egală și de sens contrar puterii reactive pe faza respectivă a sarcinii, anulând-o;
 - pe unele faze compensatorul absoarbe putere activă iar pe altele debitează ;
 - pe ansamblul celor trei faze compensatorul nu modifică însă circulația de putere activă ;
 - se poate spune că el face o redistribuire a puterii active între fazele rețelei, echilibrând-o.
- deoarece poate interveni și asupra circulației de putere reactivă pe secvența directă echilibrarea se poate face simultan cu îmbunătățirea factorului de putere până la o valoare impusă, sau cu reglarea tensiunii în secțiunea de interes;
- minimizarea puterii reactive instalate în elementele compensatorului se obține în condițiile în care acesta nu intervine în circulația de reactiv pe secvența directă, realizând numai echilibrarea.

Al patrulea capitol abordează problema dezvoltării modelului matematic corespunzător echilibrării rețelelor de distribuție cu patru conductoare, prin compensare reactivă transversală. Deoarece, așa cum s-a dovedit în capitolul al treilea, îmbunătățirea factorului

de putere și simetrizarea sarcinii sunt acțiuni interdependente, înainte de a trata simultaneitatea aplicării lor cu scopul simetrizării totale și compensării totale a puterii reactive a sarcinii, s-au abordat și situații intermediare, plecând de la aplicarea următoarelor criterii suplimentare principale:

- îmbunătățirea factorului de putere fără a lua în considerare prezența regimului dezechilibrat;
- echilibrarea sarcinii, fără a urmări îmbunătățirea factorului de putere;
- îmbunătățirea factorului de putere și micșorarea nesimetriei;
- minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare;

Din multitudinea de criterii folosite pentru dimensionarea compensatoarelor, ne oprim aici asupra celui mai semnificativ: simetrizarea totală a sarcinii și maximizarea factorului de putere, care a fost de altfel dezvoltat și în cadrul lucrării. Concluziile cele mai importante sunt după cum urmează:

- pentru obținerea simetrizării sarcinii în rețeaua electrică din amonte, sunt necesare două compensatoare trifazate: unul în conexiune Y_0 și celălalt în conexiune Δ . Rolul lor, demonstrat în cadrul acestui capitol și explicat prin mecanismul compensării, este pe scurt, următorul: compensatorul Δ este necesar pentru compensarea curentului de secvență inversă, iar compensatorul Y_0 este necesar pentru compensarea curentului homopolar a sarcinii, fiind singurul care poate forma un sistem trifazat de curenți de secvență homopolară (bineînțeles legătura la conductorul neutru este obligatorie);
- pentru dimensionarea celor două compensatoare cu scopul amintit, există o infinitate de soluții ; sunt necesare deci criterii suplimentare stabilite din condițiile practice de funcționare a lor ; în lucrarea de față s-au studiat următoarele:
 - intervenția compensatorului Δ numai în circulația curenților de secvență inversă;
 - minimizarea pierderilor de putere activă în compensatoare;
 - minimizarea puterii reactive instalate pentru compensare.

Observațiile care urmează se referă la rezultatele aplicării primului dintre aceste subcriterii.

- Calculul circulației de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator, efectuat în componente de fază permite explicarea mecanismului compensării după cum urmează:
 - ca și în cazul anterior, deși nu conține decât elemente reactive (susceptanțe inductive și capacitive), compensatorul Δ intervine și asupra circulației de putere activă pe fazele rețelei : pe unele absoarbe, pe altele debitează putere activă (dar suma algebrică a puterilor active pe fazele compensatorului este nulă). Se poate afirma deci că compensatorul Δ realizează o redistribuire a sarcinii active între fazele rețelei, echilibrându-le. Folosind o expresie îndrăzneță se poate afirma că *“se produce o compensare a puterii active”*.
 - la compensarea puterii reactive până la nivelul dorit contribuie atât compensatorul Δ cât și compensatorul Y_0 ;
 - compensatorul Δ pe unele faze absoarbe reactiv iar pe altele debitează, fără a afecta circulația de reactiv pe ansamblul rețelei, în timp ce compensarea efectivă a puterii reactive a sarcinii este efectuată de compensatorul Y_0 .
 - compensatorul Y_0 nu intervine asupra circulației de putere activă;
 - prin compensare s-au anulat curenții de secvență inversă, homopolară și componenta reactivă a curentului de secvență directă ; după compensare curenții pe fazele rețelei sunt pur activi, egali între ei și egali cu componenta activă a curentului de secvență directă al sarcinii;

- curentul pe conductorul neutru al compensatorului Y_0 este egal și de sens contrar celui de pe conductorul neutru al sarcinii, compensându-l;
- mecanismul compensării, din perspectiva circulației de curenți exprimate cu ajutorul componentelor simetrice, evidențiază următoarele :
 - cele două compensatoare se pot descompune în patru compensatoare fictive : Δ_i , Y_d , Δ_h , Y_h ;
 - compensatorul Δ_i , anulează curentul de secvență inversă al sarcinii, având o structură identică cu cea din cazul rețelei cu trei conductoare ;
 - compensatorul Y_d , are o structură simetrică, anulând componenta reactivă a curentului de secvență directă a sarcinii ;
 - curentul de secvență homopolară al sarcinii este anulat de către un compensator mixt Δ_h+Y_h ; această structură mixtă este necesară deoarece trebuie anulată componenta activă a curentului de secvență homopolară, pentru care este necesară o schemă Λ și pentru ca totodată să se poată închide curenții de secvență homopolară de compensare, lucru posibil numai într-o schemă Y_0 .

Ambele modele matematice au fost transferate în programe de calcul scrise în Turbo Pascal ce au fost apoi folosite pentru aplicații numerice în rețele cu diferite variante ale structurii sarcinii echivalente dezechilibrate, aplicații urmate de analize cantitative ale rezultatelor.

În *capitolul al cincilea* autorul și-a propus și a reușit cu succes, după cum se poate constata, confirmarea experimentală a două elemente teoretice :

- modelele matematice ale simetrizării sarcinii unei rețele prin compensare reactivă transversală în secțiunea de interes ;
- posibilitatea obținerii acestei simetrizări, prin folosirea unor compensatoare realizate cu susceptanțe variabile, în perspectiva integrării lor în sisteme de reglaj automat.

Pentru aceasta s-au efectuat un număr de patru experimente, primele trei într-o rețea trifazată fără conductor neutru și ultimul într-o rețea trifazată cu conductor neutru.

În ceea ce privește modelele matematice dezvoltate în capitolele anterioare, se poate afirma o validare punct cu punct a concluziilor acestora.

De o importanță la fel de mare, este și confirmarea în același timp a soluției de realizare a compensatoarelor pentru simetrizare cu ajutorul susceptanțelor variabile concepute cu dispozitive de comutație statică.

Având o construcție simetrică, compensatoarele cu susceptanțe variabile vor interveni însă diferit pe fazele rețelei, comanda deschiderii tiristoarelor din componența lor fiind efectuată individual, în funcție de componentele curenților de sarcină. Prin includerea lor în sisteme de reglare automată, realizate la nivelul actual al performanțelor elementelor de calcul și de execuție, se poate obține practic o compensare on-line, ceea ce poate contribui decisiv la obținerea unui regim optim de funcționare al unei rețele.

Algoritmul procesului de reglaj al unui astfel de sistem, care se va concretiza în stabilirea legilor de comandă ale tiristoarelor, poate avea deci la bază unul dintre modelele matematice dezvoltate în această lucrare.

Capitolul al șaselea tratează problema compensării puterii reactive în rețelele de distribuție ce funcționează în regimuri dezechilibrate și deformante, sub aspectul analizei interdependenței dintre cele trei acțiuni caracteristice optimizării funcționării acestora : compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor de curent. Această interdependență este mai întâi privită prin prisma circulației de curenți, a calității acestora și

a factorului de putere definit pe baza pierderilor de putere activă. În a doua parte a capitolului, perspectiva este alta : cea a calității tensiunii în rețea.

Celelalte aspecte legate de compensarea puterii reactive în rețelele electrice ce funcționează în regimuri dezechilibrate și deformante, cum ar fi : studierea condițiilor de rezonanță între rețea și instalația de compensare și dimensionarea acesteia din urmă cu restricția evitării rezonanței, verificarea și protecția filtrelor la solicitările electrice și termice, etc., nu au constituit obiectul lucrării de față.

Pentru prezentarea analizei s-a considerat un consumator neliniar și dezechilibrat alimentat printr-o linie electrică simetrică și liniară cu trei conductoare, de la un sistem puternic (teoretic de putere infinită). Consumatorul a fost asimilat în aceste condiții cu o sursă ideală de curenți de secvență inversă în planul fundamentalei și respectiv de curenți armonici I_k în planul armonicii de rang k . Atât tensiunea de secvență inversă cât și cea armonică la bornele consumatorului apar în acest fel ca și căderi de tensiune în rețeaua de alimentare. Această modalitate de exprimare a componentelor tensiunii a permis stabilirea dependenței dintre componentele tensiunii la bornele consumatorului, curenții ce parcurg rețeaua de alimentare și parametrii acesteia.

Indicatorii pe baza cărora s-a făcut examinarea efectelor acțiunilor de optimizare au fost : coeficienții de disimetrie ai curenților și tensiunilor pe fundamentală și pe armonici, nivelele componentelor simetrice ale armonicilor curenților și tensiunilor, factorul de putere într-o dublă definiție : prin intermediul pierderilor de putere activă în rețeaua de alimentare respectiv ca grad de utilizare a puterii active disponibile, pierderea de putere activă, respectiv de tensiune în rețeaua de alimentare și reducerea pierderilor de putere activă.

Analiza interdependenței acțiunilor de optimizare s-a efectuat pentru diferite variante ale sarcinii echivalente (modificând valorile componentelor de secvență directă și inversă ale curenților pe fundamentală și pe armonicile superioare) și considerând aplicate succesiv următoarelor variante de acțiuni de optimizare :

- compensarea puterii reactive pe fundamentală ;
- echilibrarea sarcinii rețelei pe fundamentală ;
- filtrarea armonicilor de curent ;
- compensarea puterii reactive și echilibrarea sarcinii pe fundamentală ;
- compensarea puterii reactive pe fundamentală și filtrarea armonicilor de curent ;
- compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii pe fundamentală și filtrarea armonicilor de curent.

Analiza a evidențiat următoarele concluzii principale :

- acțiunea de optimizare care determină cele mai bune rezultate în ceea ce privește regimul de funcționare al rețelei, este în mod evident cea care conduce la obținerea simultană a celor trei obiective. Efectele aplicării acesteia, măsurate prin intermediul indicatorilor caracteristici, înseamnă :
 - anularea coeficienților de disimetrie din curenți și tensiuni ;
 - anularea nivelului armonic pe secvența directă a curenților și tensiunilor ;
 - maximizarea factorului de putere global ;
 - minimizarea pierderilor de putere activă în rețeaua de alimentare ;
- acțiunile întreprinse la bornele consumatorului afectează într-o mare măsură mărimea și calitatea curenților care circulă pe linia de alimentare, soluționarea completă a problemei reclamând și considerarea acestei circulații. Prin urmare, calitatea tensiunii nodului consumator trebuie analizată în strânsă legătură cu calitatea curenților ce străbat rețeaua de alimentare, respectiv a efectelor acestora.

- rezolvarea corectă a celor trei probleme presupune abordarea și soluționarea lor comună, asigurându-se astfel atât calitatea ridicată a tensiunii în nodurile de consum cât și a curenților care circulă în rețeaua de alimentare, în condițiile în care pierderile de putere activă în rețea sunt minime iar factorul de putere are valoarea maximă.

7.2. Principalele elemente de contribuție originală ale tezei de doctorat

Capitolul 1.

- ◆ Sinteza referitoare la problematica generală a optimizării funcționării rețelelor electrice de distribuție ;

Capitolul 2.

- ◆ Programul de calcul scris în limbajul Turbo Pascal, pentru prelucrarea numerică a semnalelor achiziționate, cu scopul determinării mărimilor caracteristice necesare analizei regimurilor permanente dezechilibrare și deformante ale rețelelor electrice ;

Capitolul 3.

- ◆ Dezvoltarea modelului matematic al compensării puterii reactive în rețelele electrice trifazate cu trei conductoare prin studierea următoarelor criterii :
 - compensarea parțială a puterii reactive absorbite, până la un factor de putere impus ;
 - minimizarea puterii reactive instalate în compensator ;
 - minimizarea pierderilor totale de putere activă din rețeaua de alimentare ;
- ◆ Dezvoltarea modelului matematic al compensării în condițiile aplicării criteriului a determinând :
 - curenții și elementele schemei de compensare exprimate prin intermediul curenților de sarcină ;
 - circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator, prin intermediul componentelor de secvență ale curenților de sarcină ;
 - diagrama fazorială ce ilustrează mecanismul compensării cu ajutorul componentelor de secvență ale curenților de sarcină arbitrar aleși ;
 - circulația de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată în componente de fază.
- ◆ Explicarea mecanismului compensării folosind circulația de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată în componente de fază;
- ◆ Program de calcul în BP pentru aplicația numerică ce ilustrează cantitativ circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator pentru toate criteriile de compensare dezvoltate în modelul matematic ;
- ◆ Comentarea și analiza comparativă a rezultatelor diverselor variante pentru care s-a făcut aplicația numerică ;
- ◆ Demonstrațiile matematice ale unor relații cu implicații indirecte asupra modelului matematic al compensării ;

- relațiile particulare pentru calculul trecerii schemei echivalente a unei sarcini din conexiune Δ în conexiune Y și invers (ANEXA 4) ;
- relațiile între elementele componente ale schemei echivalente în Y pentru o sarcină trifazată racordată într-o rețea fără conductor neutru (ANEXA 5).

Capitolul 4.

- ◆ Dezvoltarea modelului matematic al compensării puterii reactive în rețelele electrice trifazate cu patru conductoare prin studierea următoarelor criterii :
 - compensarea simetrică completă pe secvența directă ;
 - compensarea asimetrică pentru minimizarea pierderilor de putere activă în rețeaua de alimentare ;
 - echilibrarea sarcinii fără a urmări în mod special îmbunătățirea factorului de putere ;
 - micșorarea nesimetrice sarcinii prin anularea curentului de secvență homopolară și creșterea factorului de putere prin compensarea puterii reactive pe secvența directă ;
 - micșorarea nesimetrice sarcinii prin anularea curentului de secvență inversă și creșterea factorului de putere prin compensarea puterii reactive pe secvența directă ;
 - simetrizarea sarcinii și compensarea puterii reactive până la un factor de putere impus ;
 - minimizarea pierderilor totale de putere activă în rețeaua de alimentare.
- ◆ Dezvoltarea modelului matematic al compensării în condițiile aplicării criteriului **c3-1** determinând :
 - circulația de curenți și puteri în interiorul ansamblului consumator-compensator în componente de fază ;
 - curenții de compensare exprimați cu ajutorul componentelor de secvență ai curenților de sarcină ;
 - circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator exprimată în componente simetrice ;
 - susceptanțele de compensare exprimate în funcție de componentele de secvență ale curenților de sarcină ;
 - descompunerea celor două compensatoare în patru compensatoare fictive, pentru compensarea pe secvențe, calculul susceptanțelor pentru fiecare dintre acestea, construirea diagramelor fazoriale și explicarea mecanismului compensării ;
- ◆ Program de calcul în BP pentru aplicația numerică ce ilustrează cantitativ circulația de curenți în interiorul ansamblului consumator-compensator pentru toate criteriile de compensare dezvoltate matematic;
- ◆ Comentarea și analiza comparativă a rezultatelor diverselor variante pentru care s-a făcut aplicația numerică ;
- ◆ Demonstrațiile matematice ale unor relații cu implicații indirecte asupra modelului matematic al compensării : expresiile componentelor simetrice ale curenților pe fazele unor receptoare electrice trifazate (ANEXA 6) ;

Capitolul 5

- ◆ Elementele referitoare la realizarea determinărilor experimentale : concepția, dimensionarea și execuția circuitelor necesare pentru comanda tiristoarelor, pe baza cărora s-au obținut susceptanțele variabile (ANEXA 10) ;

- ◆ Concepția, dimensionarea, execuția montajului electric pentru modelarea și studierea regimului normal de funcționare al ansamblului consumator-compensator pentru ambele categorii de rețele, achiziția și prelucrarea rezultatelor achiziției ;
- ◆ Comentariile, observațiile și analiza comparativă a rezultatelor experimentale pentru validarea modelelor matematice dezvoltate în capitolele 3 și 4.

Capitolul 6

- ◆ Punerea problemei în sensul abordării interdependenței acțiunilor ce vizează compensarea puterii reactive (pentru îmbunătățirea factorului de putere sau reglarea tensiunii), echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei de alimentare și filtrarea armonicilor de curent debitate, acțiuni aplicate unui consumator echivalent dezechilibrat și deformant ;
- ◆ Folosirea indicatorilor de calitate ai tensiunii drept criteriu de analiză a acestei interdependențe ;
- ◆ Adoptarea structurii sistemului studiat : consumator neliniar și nesimetric - linie simetrică și liniară - sistem de putere infinită, pentru stabilirea relațiilor analitice și apoi a determinărilor numerice, care au stat la baza analizei interdependenței ;
- ◆ Demonstrarea pe modelul considerat a interdependenței dintre acțiunile de compensare, echilibrare, filtrare ;
- ◆ Demonstrarea pe modelul considerat a dependenței indicatorilor de calitate ai tensiunii de cei similari ai curenților din rețeaua de alimentare și a parametrilor rețelei ;
- ◆ Programul de calcul scris în limbajul Turbo Pascal, pentru aplicațiile numerice necesare evaluării cantitative a interdependenței acțiunilor de optimizare ;
- ◆ Stabilirea concluziei că nesimetria tensiunilor și a curenților nu trebuie analizată sub aspectul valorii efective globale, ci a valorii efective în planul fundamentalei sau a armonicii k ;
- ◆ Stabilirea concluziei că factorul de putere la bornele consumatorilor neliniari și dezechilibrați trebuie să exprime și calitatea curenților care circulă în rețelele de alimentare ale acestora (coeficienții de nesimetrie și nivelul armonicilor), stimulând astfel consumatorul la asigurarea unui consum îngrijit, “de calitate” a energiei electrice.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Buta, A., **Pană, A.**, *Identificarea și analiza regimului deformant în stațiile de transformare ce alimentează consumatori de tip tracțiune CFR.*, Al III-lea simpozion "Optimizarea dezvoltării și exploatații instalațiilor energetice", Iași, 1991, vol. I, pp. 248-251.
- [2] Buta, A., Ivașcu, C., Milca, L., **Pană, A.**, *L'analyse de la sensibilité du régime déformé des réseaux de distribution d'énergie électrique, un moyen de l'identification des régimes défavorables.*, Sesiunea științifică jubiliară a Institutului Politehnic Iași, oct. 1992, pp. 63-68.
- [3] Buta, A., Ivașcu, C., **Pană, A.**, *Asupra unei posibilități de caracterizare a regimurilor nesinusoidale de funcționare ale rețelelor electrice*, Analele Universității din Oradea - fascicola de energetică, 1993, pp. 207-213.
- [4] Ivașcu, C., Buta, A., Oprea, L., **Pană, A.**, *Considerații privind regimul nesimetric la unii consumatori din instalațiile aparținând FRE Constanța*, Simpozionul Național de Rețele Electrice, Suceava., 21-23 sept. 1994, pp. 132-138.
- [5] Buta, A., Ivașcu, C., **Pană, A.**, *Propagarea regimului nesinusoidal prin transformatoarele rețelelor electrice*, Conferința de Electroenergetică Timișoara., 17-18 nov. 1994, pp. 498-505.
- [6] Buta, A., Ivașcu, C., **Pană, A.**, *Propagation du régime non sinusoidal dans les réseaux de distribution à haute tension*, *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, Tom XI.I(XIV), fascicola 5, secția III, 1995, pp. 499-505
- [7] Ivașcu, C., Buta, A., **Pană, A.**, *Influence du consommateur "traction électrique interurbaine" sur le régime non symétrique d'un système électroénergétique*, *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, Tom XI.I(XIV), fascicola 5, secția III, 1995, pp. 508-512.
- [8] **Pană, A.**, Pană, C., *Aplicații ale sistemelor de achiziție și prelucrare a datelor la determinarea erorilor de măsură ale contoarelor de inducție în regim deformant*, *Proceedings of the Scientific Communication Meeting of "Aurel Vlaicu" University*, Third Edition, Arad 16th-17th May 1996 Vol. 8, pp 103-108.
- [9] **Pană, A.**, Buta, A., Ivașcu, C., *Sistem de achiziții și prelucrare a datelor pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale rețelelor electrice*, Simpozionul de informatică, Suceava, 23-24 mai 1996, Vol II, pp 10-17.
- [10] Buta, A., Ivașcu, C., **Pană, A.**, *Observații asupra comportării transformatoarelor electrice care funcționează în regim nesinusoidal*, Conferința internațională de transformatoare electrice CITE '96 - secțiunea "Contribuții la teoria transformatoarelor (TT)", București 9-10 mai 1996., pp. 34-37.

- [11] Ivaşcu, C., Buta, A., **Pană, A.**, *Implicații ale regimului nesimetric asupra funcționării unei rețele electrice*, Simpozionul Național de Rețele Electrice, Cluj-Napoca 2-4 oct. 1996, pp. 316-317.
- [12] Buta, A., Ivaşcu, C., **Pană, A.**, *Propagarea regimului nesinusoidal prin transformatoarele electrice ce alimentează receptori deformanți*, Conferința Națională de Energetică - CNE '96, Neptun-Olimp 1-5 sept. 1996, pp. 121-127.
- [13] Buta, A., **Pană, A.**, *Criterii pentru compensarea puterii în rețele cu sarcini dezechilibrate*, Energetica, vol. 45, 1997, nr. 5-6, pp. 289-294.
- [14] Buta, A., **Pană, A.**, *Îmbunătățirea factorului de putere și echilibrarea sarcinii, acțiuni interdependente în rețelele de distribuție performante*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" Timișoara, Tom 42(56), fascicola 1, 1997, pp 73-82.
- [15] Milca, L., Ticala, E., Buta, A., **Pană, A.**, *The experimental determination of static characteristics at deforming loads*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42(56), fascicola 2, 1997, pp 148-153.
- [16] Buta, A., Ivaşcu, C., Titihăzan, V., **Pană, A.**, *A new remarks regarding curent transformers functioning in nonsinusoidal conditions. Part I: Mathematical Model*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42(56), fascicola 2, 1997, pp. 82-86.
- [17] Buta, A., Ivaşcu, C., Titihăzan, V., **Pană, A.**, *A new remarks regarding curent transformers functioning in nonsinusoidal conditions. Part II: Measuring correction. Experimental determination*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42(56), fascicola 2, 1997, pp. 87-92.
- [18] Ticala, E., Buta, A., **Pană, A.**, *Evaluarea impedanțelor armonice în rețeaua de distribuție a FTDEE Reșița*, Simpozionul Național de Rețele Electrice., Pitești, 1998, vol. 1, pp. 334-342.
- [19] Ivaşcu, C., Buta, A., Titihăzan, V., **Pană, A.**, *Observații referitoare la funcționarea transformatoarelor de tensiune în regim nesinusoidal*, Simpozionul Național de Rețele Electrice, 9-10 sept. 1998, vol. 1, pp. 645-652.
- [20] **Pană, A.**, *Optimizarea funcționării rețelelor electrice de distribuție*, Referat de doctorat nr. 2, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1996.
- [21] Buta, A., **Pană, A.**, *Transportul și distribuția energiei electrice*, Îndrumător de proiectare, Litografia U.P. Timișoara, 1996.
- [22] Buta, A., **Pană, A.**, *Influența consumatorilor neechilibrați și deformanți asupra consumului de putere și al CPT înregistrat de IRE Timișoara*, Contract de cercetare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1990.
- [23] Buta, A., Ivaşcu, C., **Pană, A.**, *Identificarea și analiza regimurilor nesimetrice și nesinusoidale în rețeaua FRE Constanța*, Contract de cercetare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1992.

- [24] Buta, A., **Pană, A.**, *Analiza regimului nesimetric și deformant introdus de consumatorii CFR Teiuș și CFR Șibot - Tracțiune electrică, alimentați din stațiile FRET Alba-Iulia*, Contract de cercetare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1994.
- [25] Ivașcu, C., Buta, A., **Pană, A.**, *Determinarea regimului nesimetric și deformant la o parte din consumatorii și instalațiile aparținând FRET Constanța - CFR Constanța-tracțiune electrică*, Contract de cercetare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1995
- [26] Ivașcu, C., Buta, A., Titihăzan, V., **Pană, A.**, *Studiu privind comportarea transformatoarelor de măsură în regim nesinusoidal*, Contract de cercetare FRET Constanța - Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1996.
- [27] Buta, A., **Pană, A.**, *Studiu privind influența regimului deformant asupra instalațiilor de distribuție ale FRET Reșița*, Contract de cercetare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1996.
- [28] Alexa, D., Hrubaru, O., *Aplicații ale convertoarelor statice de putere*, Editura Tehnică, București, 1989.
- [29] Albert, H., Mihăilescu, A., *Pierderi de putere și energie în rețelele electrice*, Editura Tehnică, București, 1997.
- [30] Aric, A., Golovanov, C., Neguș, C., Golovanov, N., *Poluarea cu armonici a sistemelor electroenergetice funcționând în regim permanent simetric*, Editura Academiei Române, București, 1994.
- [31] Arseneau, R., Filipski, P., S., *Application of a three phase nonsinusoidal calibration systems for testing energy and demand meters under simulated test conditions*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 2, 1988, pp. 874-879.
- [32] Arrillaga, J., Juhlin, L., Lahtien, M., Ribeiro, P., Saravedra, A., R., *Modelisation de réseaux ca pour la conception des filtres ca-vue d'ensemble sur la modelisation des impedances*, CIGRE, ELECTRA, No.164, 1996, pp. 132-152.
- [33] Arrillaga, J., Bradley, D., A., Bodger, P., S., *Power system harmonics*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [34] Bagzouz, Y., Cox, M., D., *Optimal shunt compensation for unbalanced linear loads with nonsinusoidal supply voltages*, Electric Machines and Power Systems, vol. 19, no. 2, 1991, pp. 171-183.
- [35] Bălă, C., Țugui, I., Covrig, M., *Bobine de reactanță pentru electroenergetică*, Editura Tehnică, București, 1982.

- [36] Bercovici, M., Aric, A., Pocată, Al., *Rețele electrice. Calculul electric*, Editura Tehnică, București, 1974.
- [37] Budeanu, C., I., *Bazele electrotehnicii*, vol. I, Editura MI, București, 1957.
- [38] Buta, A., *L' alimentation symétrique des consommateurs, une solution du problème d'optimisation*, Buletinul Științific și Tehnic al I.P. "Traian Vuia" Timișoara, tom 29(43), 1984, pp. 65-66.
- [39] Buta, A., *Transportul și distribuția energiei electrice*, Universitatea Tehnică Timișoara, 1991.
- [40] Chen, C., Lin, E., C., Huang, C., L., *Reactive and harmonic current compensation for unbalanced three-phase systems using the synchronous detection method*, Electric Power Systems Research, vol. 26, no.3, 1993, pp. 163-170.
- [41] Cheng, T., H., Yih, H., Y., Chao, S., C., *Design of reactive power compensators for distribution systems with harmonic distortion*, Journal of the Chinese Institute of Engineers, vol. 17, ISS:3, 1994, pp. 357-366.
- [42] Chiuță, I., Conecini, I., *Compensarea regimului energetic deformant*, Editura Tehnică, București, 1989.
- [43] Czarnecki, L., S., *What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 36, 1987, pp. 834-837.
- [44] Czarnecki, L., S., *Minimisation of unbalanced and reactive currents in three-phase asymmetrical circuits with nonsinusoidal voltage*, IEEE Proceedings. Part B. Electric Power Applications, vol. 139, no. 4, 1992, pp. 347-354.
- [45] Czarnecki, L., S., *Power factor improvement of three-phase unbalanced loads with nonsinusoidal supply voltage*, European Transactions on Electrical Power Engineering (ETEP), vol. 3, no. 1, 1993, pp. 67-72.
- [46] Czarnecki, L., S., *Combined time domain and frequency-domain approach to hybrid compensation in unbalanced non-sinusoidal systems*, European Transactions on Electrical Power Engineering, vol. 4, no. 6, 1994, pp. 477-484.
- [47] Czarnecki, L., S., Hsu, S., M., *Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions*, IEEE Proceedings. Electric Power Applications, vol. 141, no. 4, 1994, pp. 177-185.
- [48] Czarnecki, L., S., Shin, M., H., Guangda, C., *Adaptive balancing compensator*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, 1995, pp. 1663-1669.
- [49] Czarnecki, L., S., *Power related phenomena in three-phase unbalanced systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, 1995, pp. 1168-1176.

- [50] Czarnecki, L., S., *Additional discussion to "Reactive power under nonsinusoidal conditions"*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 102, no. 4, 1983, pp. 874- 879.
- [51] Le Du, A., *Pour un reseau électrique plus performante : le projet FACTS*, Revue Générale de l'Electricité, no. 6, 1992, pp. 105-121.
- [52] Emanuel, A., E., *Energetical factors in power systems with nonlinear loads*, Archiv für Elektrotechnik, no. 59, 1977, pp. 183-189.
- [53] Emanuel, A., E., *Powers in non-sinusoidal situation : a review of definitions and physical meaning*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.5, no 3, 1990, pp. 630-636.
- [54] Emanuel, A., E., *On the definition of power factor and apparent power in unbalanced polyphase circuits with sinusoidal voltage and currents*, IEEE Transaction Power Delivery, vol. 8, no. 3, 1993, pp. 841-847
- [55] Iremia, M., *Tehnici noi în transportul energiei electrice. Aplicații ale electronicii de putere*, Editura Tehnică, București, 1997.
- [56] Girgis, A., A., *Measurement and characterisation of harmonic and high frequency distortion for a large industrial load*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 1, 1990, pp. 427-435.
- [57] Golovanov, C., *Aparate electrocasnice. Probleme de compatibilitate electromagnetică*, Editura ICPE, București, 1997.
- [58] Golovanov, N., Șora, I. și alții, *Electrotermie și electrotehnologii*, Editura Tehnică, București, 1997.
- [59] Filipski, P., S., Labaj, P., W., *Evaluation of reactive power meters in the presence of high harmonic distortion*, IEEE Transaction on Power Delivery, no. 4, 1992, pp. 1793-1799.
- [60] Filipski, P., S., *A new approach to reactive current and reactive power measurement in nonsinusoidal systems*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 29, 1980, pp. 423-426.
- [61] Frize, S., *Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current*, Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 53, no. 25, pp. 596-599.
- [62] Gueth, G., Enstedt, P., Rey, A., Menzies, R., W., *Individual phase control of a static compensator for load compensation and voltage balancing*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2, 1987, pp. 898-904.
- [63] Gyugyi, L., Otto, R., A., Putman, T., H., *Principles and applications of static thyristor-controlled shunt compensators*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 97, 1978, pp. 1935-1945.

- [64] Ionescu, T., G., Pavel, E., *Considerații privind normarea limitelor regimului dezechilibrat în sistemele electroenergetice*, Energetica, vol. 38, nr. 1, 1990, pp.27-33.
- [65] Ionescu, T., G., Pop, O., *Ingineria sistemelor de distribuție a energiei electrice*, Editura Tehnică, București, 1998.
- [66] Iordănescu, I., *Compensarea factorului de putere și atenuarea regimului deformant, acțiuni interdependente în sistemele energetice moderne*, Energetica, vol. 28, nr. 8, 1980, pp. 327-331.
- [67] Kimbark, E., W., *Direct current transmission*, vol. I, Wiley-Interscience, New-York, 1971.
- [68] King, B., Olejniczak, K., J., *An evaluation of static Var compensation strategies for voltage flicker mitigation in electric distribution systems*, Proceedings of the 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, oct. 16-18, Las Vegas, 1996, pp. 6-11.
- [69] Klopper, S., Wyk, J., D., Swart, P., H., *Series and parallel distortion compensation principles in power networks*, Proceedings of the 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, oct. 16-18, Las Vegas, 1996, pp. 33-39.
- [70] Kusters, A., Moore, W., *On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 99, 1980, pp. 1845-1850.
- [71] Ledwich, G., Georg, T., A., *Using phasors to analyse power system negative phase sequence voltages caused by unbalanced loads*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, 1994, pp. 1226-1232.
- [72] Lin, C., F., Chen, T., C., Huang, C., L., *A real-time calculation method for optimal reactive power compensator*, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 4, 1989, pp. 643-652.
- [73] Matlac, I., *Convertoare electroenergetice*, Editura Facla, Timișoara, 1987.
- [74] Mattavelli, P., Tenti, P., Willems, J., L., *Load-and line identification in multiphase systems : A compensation-oriented approach*, European Transactions on Electrical Power, vol. 6, no. 6, 1996, pp. 373-380.
- [75] Meynaud, P., *Pollution de la tension*, Revue Générale de l'Électricité, Tome 89, no. 9, 1980, pp. 595-611.
- [76] Meynaud, P., Bergeal, Y., Heikkila, M., *Harmoniques, parametres caractéristiques, methodes d'étude, estimation de valeurs existantes en réseau*, ELECTRA, no. 77, 1981, pp. 35-54.
- [77] Meynaud, P., Pene, P., Desquilbet, G., *Déséquilibre de tension*, Électricité de France, Direction des Études et des Recherches, Service Études de Réseaux, 1996.

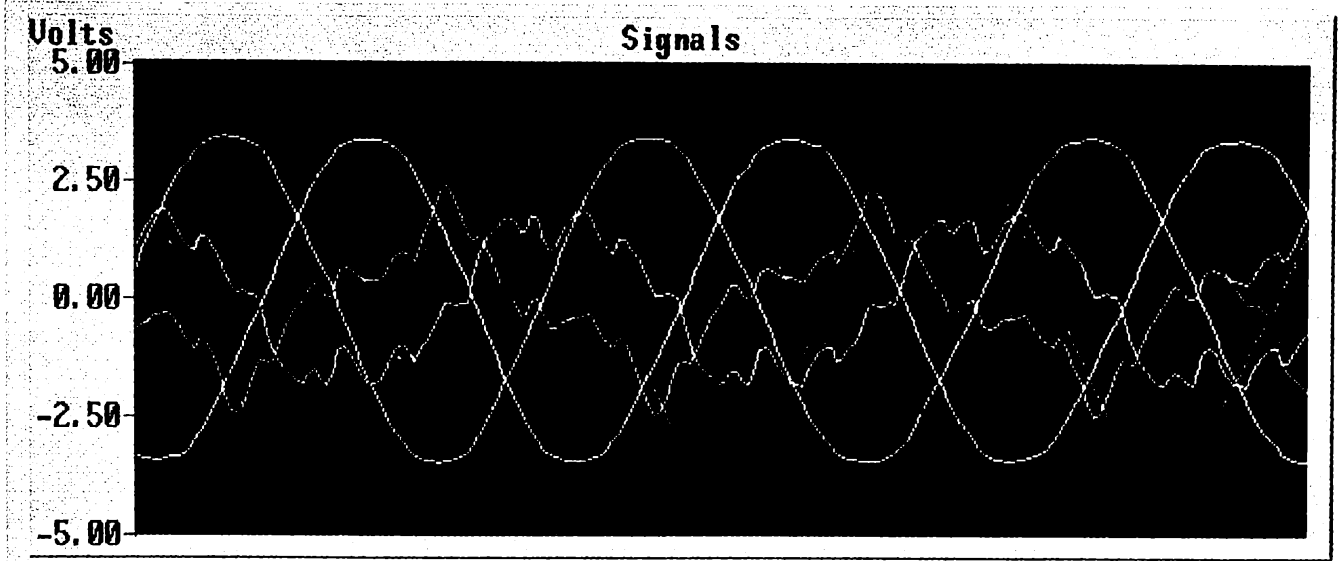
- [78] Meynaud, P., *Qualité de la tension dans les réseaux électriques. Creux de tension, flicker et harmoniques*, Techniques de l'Ingénieur, 1990.
- [79] Miculescu, Th., Iacobescu, Gh., Iordănescu, I., Gîrleşteanu, E., Ţenovici, R., *Utilizarea energiei electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980.
- [80] Mihăileanu, C., Potlog, D., M., *Goluri de tensiune în sisteme electroenergetice*, Editura Tehnică, București, 1979.
- [81] Moulet, S., Nicolas, M., Ollivier, D., Pernette, R., *Compensation d'énergie réactive : mode d'emploi*, Electricité de France. Les cahiers de l'ingénierie, 1995.
- [82] Mureșan, T. și alții, *Aparate și instalații pentru reducerea consumului de energie electrică în industrie*, Editura Facla, Timișoara, 1984.
- [83] Pocată, A., Aric, A., Crișan, O., Eremia, M., Alexandrescu, A., Buta, A., *Transportul și distribuția energiei electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [84] Pușcașu, S., Marcovici, J., *Mărimi și regimuri electrice nesinusoidale*, Editura "Scrisul Românesc", Craiova, 1974.
- [85] Reason, J., *Power quality : utilities begin to set up monitoring networks*, Electrical Word, vol. 209, no. 12, 1995, pp. 19-23.
- [86] Reid, W., E., *Power quality issues - standards and guidelines*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 3, 1996, pp. 625-632.
- [87] Robert, A., Delfandre, T., *Group de Travail CC 2, Guide pour l'évaluation de l'impédance harmonique du réseau*, CIGRE 3605. ELECTRA, No.167, 1996, pp.96-131.
- [88] Ruiz, J., Ortuondo, J., Palacios, N., *Real time power supply quality measurement and monitoring multichannel system*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, 1995, pp. 1190-1199.
- [89] Sakis, A., P., *Transmission level instrument transformers and transient event recorder characterisation for harmonic measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8., no. 3, 1993, pp. 1507-1517.
- [90] San, Y., L., Chi, J., W., *On-line reactive power compensation schemes for unbalanced three phase four wire distribution feeders*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, no. 4, 1993, pp. 1958-1965.
- [91] Schau, H., Stade, D., Malsch, M., *Harmonic compensation of converters in power systems with asymmetric loads*, Proceedings of the 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, oct. 16-18, Las Vegas, 1996, pp. 341-347.

- [92] Sfichi, R., *Calculul de dimensionare a unei instalații de filtrare-compensare în ipoteza egalității inductanțelor circuitelor filtrante*, Energetica, vol. 44, nr. 4, seria B, 1996, pp. 180-183.
- [93] Sgarzi, P., Théoleyre, S., *Optimisation des installations de compensation en présence d'harmoniques*, Revue Générale de l'Électricité, no. 6, 1988, pp. 12-17.
- [94] Sharon, D., *Power factor definitions and power transfer quality in nonsinusoidal situations*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 45, no. 3, 1996, pp. 728-733.
- [95] Simion, E., *Electrotehnică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978.
- [96] Smith, J., C., *Power quality : end users impacts*, Energy Engineering, vol. 88, no. 5, 1991, pp. 35-54.
- [97] Srinivasan, K., Emmanuel, A., E., *On separating customer and supply side harmonic contributions*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, 1996, pp. 1003-1012.
- [98] Szekely, I., Szabo, W., Munteanu, R., *Sisteme pentru achiziția și prelucrarea datelor*, Editura Mediamira, Cluj- Napoca, 1997.
- [99] Șora, C., *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- [100] Timotin, A., Hortopan, V., Ifrim, A., Preda, M., *Lecții de bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1970.
- [101] Țugulca, A., *Considerații privind efectele energetice ale regimului deformant*, Energetica, vol. 34, nr. 1, 1986, pp. 27-31.
- [102] Țugulca, A., *Considerații privind efectele energetice în regimurile armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate*, Energetica, vol. 34, nr. 3, 1986, pp. 121-129.
- [103] Țugulca, A., *Considerații referitoare la definirea factorului de putere pentru sistemele trifazate dezechilibrate*, Energetica, vol. 34, nr. 4, 1986, pp. 164-167.
- [104] Țugulca, A., *Factorul de putere în regim nesinusoidal și dezechilibrat*, Energetica, vol. 34, 1986, nr. 9, pp. 407-413.
- [105] Țugulca, A., *Criteria for the definition of the electric power quality and its measurement systems*, I:TEP, vol. 6, no. 5, 1996, pp. 357-363.
- [106] Vasiliu, Z., M., *Contribuții privind metode și sisteme de evaluare și limitare a gradului de poluare cu armonici a rețelelor electrice*, Teză de doctorat, Galați, 1996.
- [107] Vasu, E., Rao, V., Sankaran, P., *An optimisation criterion for three phase reactive power compensation*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, 1985, pp. 3216-3220.

- [108] Willems, J., L., *Current compensation in three-phase power systems*, European Transactions on Electrical Power Engineering, vol. 3, no. 1, 1993, pp. 61-66.
- [109] Wenyuan, X., Marti, J., R., Dommel, H., W., *Harmonic analysis of systems with static compensators*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 2, 1991, pp. 183-190.
- [110] * * * *Power system harmonics : an overview*, IEEE Working Group on Power System Harmonics, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 102, no. 8, 1983, pp. 2455-2460.
- [111] * * * *Qualité de l'alimentation électrique. Guide de désensibilisation aux perturbations sur les réseaux publics et privés*, Electricité de France. Les cahiers de l'ingénierie, 1990.
- [112] * * * *Qualité de l'alimentation électrique*, Cahiers français de l'électricité. Industrie, vol. 4, no. 12, 1993, pp. 42-46.
- [113] * * * *Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice*, PE 143/1994, ICEMIENERG București, 1994.
- [114] * * * *Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads*, IEEE Working Group on nonsinusoidal situations : Effects on meter performance and definitions of power, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 1, 1998, pp. 79-87.
- [115] * * * *PC-1PM-16 User Manual*, National Instruments, nov. 1993 edition, part no. 320287-01.
- [116] * * * *Catalog de produse LEM. 1993.*

ANEXA 1

**Instrumentul virtual folosit în cadrul experimentelor
și exemplu de fișier de date**



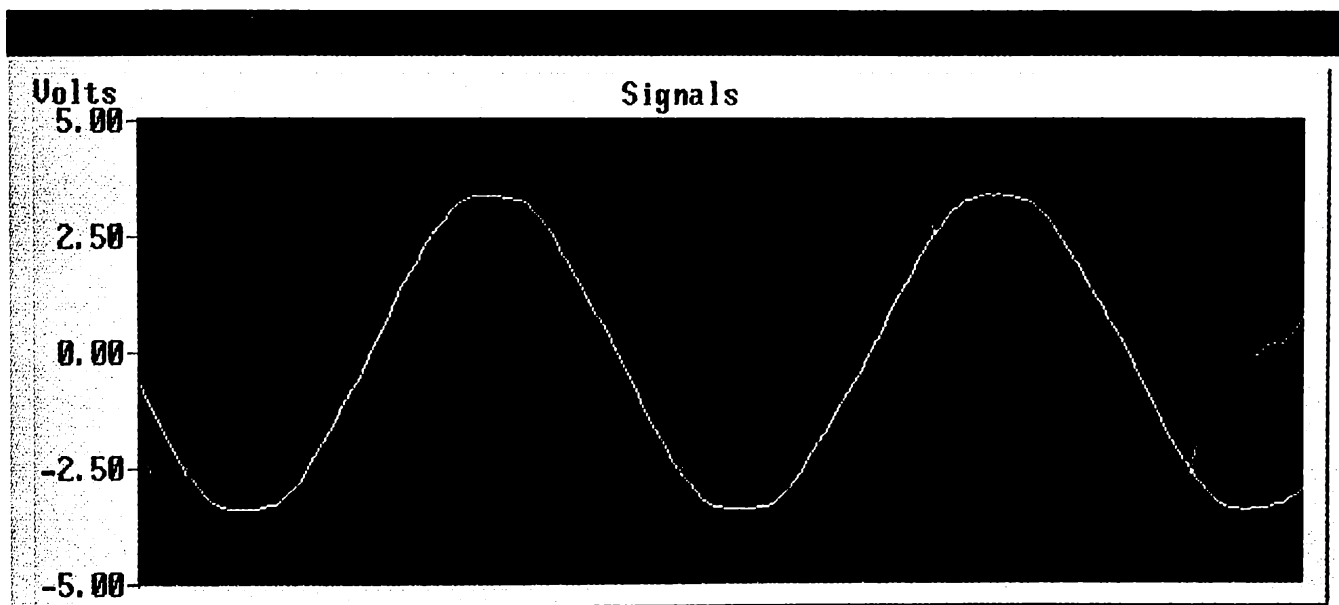
Ymax 5.00 OK Pause 0 1 2 3 4 5 6 7 Consecutive

Ymin -5.00 8 9 10 11 12 13 14 15 Most recent

On/Off One Shot Strip Chart Legend Chan Setup Sample Rate 100.300 Plot Error

Save to File Samples/Chan Average Scan Rate DAQ Error

Ignore lost data 200 2 0.00 Help Return



Ymax 5.00 OK Pause 0 1 2 3 4 5 6 7 Consecutive

Ymin -5.00 8 9 10 11 12 13 14 15 Most recent

On/Off One Shot Strip Chart Legend Chan Setup Sample Rate 100.500 Plot Error

Save to File Samples/Chan Average Scan Rate DAQ Error

Ignore lost data 200 2 0.00 Help Return

Date: 09-21-1995 Time: 20:36:13

CT Nord Trafo II 110

Sample Rate 35000

Scan Rate 0.0

5: I T Tr II 110 4: I R Tr II 110 3: I S Tr II 110 2: Tens T-N 110 1: Tens S-N
110 0: Tens R-N 110

Gain 1Gain 1Gain 1Gain 1Gain 1Gain 1Gain 1

-0.002	-0.071	-0.122	-0.171	1.316	-3.025	1.628
-0.002	-0.076	-0.115	-0.168	1.477	-3.027	1.475
-0.002	-0.081	-0.107	-0.168	1.631	-3.010	1.309
-0.002	-0.088	-0.098	-0.164	1.797	-3.005	1.152
0.000	-0.095	-0.088	-0.161	1.956	-2.981	0.977
-0.002	-0.103	-0.081	-0.161	2.104	-2.939	0.796
-0.002	-0.112	-0.068	-0.156	2.249	-2.886	0.608
-0.002	-0.125	-0.056	-0.156	2.390	-2.820	0.422
0.000	-0.137	-0.042	-0.154	2.517	-2.739	0.215
0.000	-0.149	-0.024	-0.151	2.642	-2.634	0.015
0.000	-0.159	-0.012	-0.146	2.747	-2.542	-0.186
-0.002	-0.168	0.000	-0.142	2.854	-2.432	-0.386
0.000	-0.176	0.015	-0.137	2.932	-2.317	-0.571
0.000	-0.181	0.027	-0.129	3.005	-2.209	-0.759
0.000	-0.186	0.039	-0.125	3.066	-2.090	-0.930
0.000	-0.188	0.049	-0.122	3.110	-1.943	-1.113
-0.002	-0.188	0.054	-0.115	3.132	-1.802	-1.287
-0.002	-0.188	0.061	-0.107	3.147	-1.646	-1.450
-0.002	-0.186	0.068	-0.098	3.145	-1.497	-1.611
0.000	-0.181	0.076	-0.090	3.127	-1.323	-1.770
-0.002	-0.176	0.085	-0.081	3.101	-1.147	-1.917
-0.002	-0.173	0.095	-0.068	3.057	-0.972	-2.063
-0.002	-0.168	0.105	-0.059	3.000	-0.776	-2.205
-0.002	-0.166	0.117	-0.046	2.922	-0.586	-2.334
-0.002	-0.164	0.129	-0.034	2.837	-0.391	-2.454
-0.002	-0.159	0.142	-0.024	2.737	-0.173	-2.571
-0.002	-0.156	0.154	-0.012	2.627	0.024	-2.673
-0.002	-0.151	0.164	0.002	2.507	0.220	-2.744
-0.002	-0.144	0.171	0.015	2.373	0.410	-2.810

-0.002	0.076	-0.183	-0.088	-1.084	-1.958	2.959
-0.002	0.068	-0.181	-0.098	-0.889	-2.107	2.908
-0.002	0.059	-0.183	-0.107	-0.691	-2.229	2.844
-0.002	0.046	-0.178	-0.117	-0.500	-2.366	2.766
-0.002	0.032	-0.176	-0.127	-0.298	-2.476	2.686
-0.002	0.020	-0.173	-0.137	-0.115	-2.573	2.605
0.000	0.005	-0.168	-0.146	0.078	-2.688	2.510
-0.002	-0.010	-0.164	-0.156	0.266	-2.771	2.415

ANEXA 2

Program pentru analiza numerică a semnalelor achiziționate și exemple de rezultate.

```
{S+,B-,D+,E+,F-,G-,I+,L+,N+,O-,R-,S+,V+,X+,Q-}
{$M 16384,0,655360}
unit TV RDEF2;
interfațe
uses Crt, Dos, Graph, Drivers, Memory, Views, Menus, Dialogs, MsgBox,
    Objects, StdDlg, App, Editors, TextView;
const
    Ho=480;
    Ve=640;
    ABuffSize :word = 50000;
    cmOpenRapTr      = 110;
    cmSaveRapTr      = 115;
type
    date=array [1..1000,1..8] of double;
    datel=^date;
    t1=array [1..8] of string[40];
    t2=array [1..20] of char;
    t3=array [1..8] of integer;
    t4=array [1..40,1..8] of real;
    t5=array [1..8] of extended;
    t6=array [1..1000] of extended;
    t6l=^t6;
    t7=array [1..40] of extended;
    defazaaj = record
        ncan1,ncan2:string[20];
        unghi:extended;
    end;
    PMyDialog = ^TMyDialog;
    TMyDialog = object(TDialog)
        procedure HandleEvent(var Event: TEvent); virtual;
        procedure OpenFisier kTr;virtual;
        procedure SaveFisier_kTr;virtual;
    end;
    InputData = record
        Data1 :string[10];
        Data2 :string[10];
    end;
    Polaritate = record
        CheckBoxData1,
        CheckBoxData2:word;
    end;
    MyDialogData = array[1..8] of string[10];
    SpatiuD = string[3];
const
    DialogData :MyDialogData =
        ( '30.1','30','29.5','63.36','55.44','59.28','1','1');
    SData:InputData = (
        Data1 :'0';
        Data2 :'0');
    SemnData :Polaritate = (
        CheckBoxData1 :0;
        CheckBoxData2 :0);
    SpatiuData : SpatiuD = ('3');
var
    S : TBufStream;
    FisierRapoarte:PathStr;
    canal:datel;
    i, j, o, k, kl, codl, n, pg, pO, pu, limmax, limmin, maxdef: integer;
    il, i2, i3, cu, ci, cradio: integer;
    ok, ok1, ok2, ver1, ver2: boolean;
    ok3: array [1..12] of boolean;
    f, g, FT, FT1, FT2, FT3: text;
    spatiu: string[8];
    tab: string[1];
    data: string[16];
```

```

ora:string[14];
comment:string[40];
numel:string[11];
nume2:string[9];
sir2,sir3:string[3];
car:t2;
numecan,sirl,mesaj,six,sim,sef:t1;
sr,sc,nr,s1,s2,s3,b1,Urs,Ust,Utr,Uh,Ud,Ui,Ih,Id,Ii,Ph,Pdir,Pii,Qh,Qdir,Qii,defh,defd,
defii,knsu,knsOu,kns2u,rnu,knsi,knsOi,kns2i,mi,fiUrs,fiUst,fiUtr,fiUh,fiUd,fiUi,fiIh,
fiId,fiIi,aa,bb,fi,sa,pa,qr,pd,Prr,Pss,Ptt,Qrr,Qss,Qtt,Ptot,Qtot,IRst,ISst,Itst,Ihst,Iist,
Idst,IRsta,IRstr,ISsta,ISstr,ITsta,ITstr,Ihsta,Ihstr,Idsta,Idstr,Iista,Iistr:extended;
a,a2,a1,prim:char;
puncte,k2,z1,z2,z3,z4,coef:t3;
ai,br,am,faza,e,NAM:t4;
VEf,VMed,def,FVirf,VMred,FForma,Rd,FDist,CDef,CFun,
max,maxi,maxl,min,mini,cor,cori,ksc,ktr,sla,s2b,fazan,fazanm,dfi:t5;
decalaj:array [1..12] of defazaj;
canalu:t61;
defi:t7;
p1,p2,p3,p4,p5:array [1..40,1..8] of pointer;
pam,qam,sam:array [1..40] of extended;
NumFisier,Numfisl : PathStr;

procedure CitireDate;
procedure NrPuncte;
procedure Fourier;
procedure ValEfCoef;
procedure RegNesim;
procedure Defazaje;
procedure Afisare;
procedure Grafice;
procedure Inversare_Polaritate;
procedure Semne;
procedure IntrodRapoarte(var Dialog:PMyDialog);

```

implementation

```

procedure TMyDialog.HandleEvent(var Event: TEvent);
begin
  Inherited HandleEvent(Event);
  if Event.What = evCommand then
    begin
      case Event.Command of
        cmOpenRapTr : OpenFisier_ktr;
        cmSaveRapTr : SaveFisier_ktr
      else Exit;
      end;
    end;
  end;
end;

procedure IntrodRapoarte(var Dialog:PMyDialog);
var
  PMyView :PView;
  R:TRect;
begin
  R.Assign(8,3,70,18);
  Dialog := New(PMyDialog, Init(R,' Valorile Rapoartelor de Transformare '));
  with Dialog^ do
    begin
      R.Assign(15,2,27,3);
      PMyView:=New(PInputLine, Init(R,10));
      Insert(PMyView);
      R.Assign(4,2,14,3);
      Insert(New(PLabel, Init(R,'ktr[~1~] = ',PMyView)));
      R.Assign(15, 4, 27, 5);
      PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
      Insert(PMyView);
      R.Assign(4, 4, 14, 5);
      Insert(New(PLabel, Init(R,'ktr[~2~] = ',PMyView)));
      R.Assign(15, 6, 27, 7);
      PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
      Insert(PMyView);
      R.Assign(4, 6, 14, 7);
      Insert(New(PLabel, Init(R,'ktr[~3~] = ', PMyView)));
      R.Assign(15, 8, 27, 9);
      PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
      Insert(PMyView);
      R.Assign(4, 8, 14, 9);
    end;
end;

```

```

    Insert(New(PLabel, Init(R, 'ktr[~4~] =', PMyView)));
    R.Assign(45, 2, 57, 3);
    PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
    Insert(PMyView);
    R.Assign(34, 2, 44, 3);
    Insert(New(PLabel, Init(R, 'ktr[~5~] =', PMyView)));
    R.Assign(45, 4, 57, 5);
    PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
    Insert(PMyView);
    R.Assign(34, 4, 44, 5);
    Insert(New(PLabel, Init(R, 'ktr[~6~] =', PMyView)));
    R.Assign(45, 6, 57, 7);
    PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
    Insert(PMyView);
    R.Assign(34, 6, 44, 7);
    Insert(New(PLabel, Init(R, 'ktr[~7~] =', PMyView)));
    R.Assign(45, 8, 57, 9);
    PMyView := New(PInputLine, Init(R,10));
    Insert(PMyView);
    R.Assign(34, 8, 44, 9);
    Insert(New(PLabel, Init(R, 'ktr[~8~] =', PMyView)));

    R.Assign(4, 11, 14, 13);
    Insert(New(PButton, Init(R, '~O~K', cmOK, bfDefault)));
    R.Assign(18, 11, 28, 13);
    Insert(New(PButton, Init(R, '~O~pen', cmOpenRapTr, bfDefault)));
    R.Assign(32, 11, 42, 13);
    Insert(New(PButton, Init(R, '~S~ave', cmSaveRapTr, bfDefault)));
    R.Assign(46, 11, 56, 13);
    Insert(New(PButton, Init(R, 'Cancel', cmCancel, bfNormal)));
end;
end;
procedure TMyDialog.OpenFisier_ktr;
var
    D:PFileDialog;
    Dialog:PMyDialog;
    w:word;
    c,code:integer;
begin
    FisierRapoarte:='*.ktr';
    { Application^.ExecuteDialog(New(PChDirDialog,Init(cdNormal,11),nil)); }
    D:=New(PFileDialog, Init('*.ktr', 'Open File', '~N~ame', fdOpenButton+fdReplaceButton, 10));
    if Application^.ExecuteDialog(D,@FisierRapoarte) <> cmCancel then
        begin
            {$I-}
            Assign(f, FisierRapoarte);
            Reset(f);
            {$I+}
            i:=0;
            while not seekEOF(f) do
                begin
                    inc(i);
                    read(f,ktr[i]);
                end;
            System.Close(f);
            c:=i;
        end
        else begin
            MessageBox('Eroare: '+FisierRapoarte+#13'    nu poate fi deschis.',nil, mfError +
mfOKButton);
        end;
        for i:=1 to c do
            begin
                str(ktr[i]:5:10,DialogData[i]);
            end;
            IntrodRapoarte(Dialog);
            SetData(DialogData);
        end;
end;
procedure TMyDialog.SaveFisier_ktr;
var
    C : Word;
    Dialog:PMyDialog;
    D: PFileDialog;
begin
    IntrodRapoarte(Dialog);
    FisierRapoarte:='*.ktr';

```

```

(Application^.ExecuteDialog(New(PChDirDialog, Init(cdNormal, 11)), nil);)
D:=New(PFileDialog, Init('*.ktr', 'Save File', '~N~ame', fdOkButton+fdClearButton, 10));
if Application^.ExecuteDialog(D, @FisierRapoarte) <> cmCancel then
begin
  {$I-}
  Assign(f, FisierRapoarte);
  Rewrite(f);
  {$I+}
  GetData(DialogData);
  for i:=1 to 8 do
  begin
    writeln(f, DialogData[i]);
  end;
  System.close(f);
end;
end;
procedure CitireDate;
var
  w, wl:word;
begin
  New(canal);
  New(canalu);
  {$I-}
  assign(f, NumeFisier);
  reset(f);
  {$I+}
  read(f, data);
  Wl:=MessageBox(#13^C'Fis.original este modif.?', nil, mfYesButton+mfNoButton+mfConfirmation);
  if Wl = cmYes then
  begin
    read(f, spatiu);
  end
  else
  begin
    read(f, tab);
  end;
  read(f, ora);
  readln(f);
  read(f, comment);
  readln(f);
  read(f, nume1);
  read(f, sr);
  readln(f);
  read(f, nume2);
  read(f, sc);
  readln(f);
  read(f, car[1]);
  prim:=car[1];
  Val(car[1], k1, cod1);
  k:=k1+2;
  repeat
  k:=k-1;
  i:=0;
  repeat
  i:=i+1;
  read(f, car[i]);
  until (car[i]=#9) or (car[i]=#13) or (car[i]=#10);
  o:=i;
  j:=0;
  numecan[k]:='';
  if k=k1+1 then numecan[k]:=prim;
  repeat
  j:=j+1;
  numecan[k]:=numecan[k]+car[j];
  until j=o-1;
  until k=1;
  if Wl = cmYes then
  begin
    readln(f);
  end
  else
  begin
    readln(f);
    readln(f);
  end;
  if k1+1 = 8 then
  begin
    i:=0;

```



```

while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 8], canal^[i, 7], canal^[i, 6], canal^[i, 5], canal^[i, 4],
canal^[i, 3], canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
if kl+1 = 7 then
begin
i:=0;
while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 7], canal^[i, 6], canal^[i, 5], canal^[i, 4], canal^[i, 3],
canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
if kl+1 = 6 then
begin
i:=0;
while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 6], canal^[i, 5], canal^[i, 4], canal^[i, 3], canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
if kl+1 = 5 then
begin
i:=0;
while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 5], canal^[i, 4], canal^[i, 3], canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
if kl+1 = 4 then
begin
i:=0;
while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 4], canal^[i, 3], canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
if kl+1 = 3 then
begin
i:=0;
while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 3], canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
if kl+1 = 2 then
begin
i:=0;
while not seekEOF(f) do
begin
i:=i+1;
read(f, canal^[i, 2], canal^[i, 1]);
readln(f);
end;
pg:=i;
end;
close(f);
W:=MessageBox(#13^C' Se inverseaza polaritatea ?', nil, mfYesButton+mfNoButton+mfInformation);

```

```

if W = cmYes then
begin
  Inversare_Polaritate;
  i:=0;
  repeat
    begin
      inc(i);
      canal^[i,1]:=coef[1]*canal^[i,1];
      canal^[i,2]:=coef[2]*canal^[i,2];
      canal^[i,3]:=coef[3]*canal^[i,3];
      canal^[i,4]:=coef[4]*canal^[i,4];
      canal^[i,5]:=coef[5]*canal^[i,5]; (inversarea polaritatii daca este cazul)
      canal^[i,6]:=coef[6]*canal^[i,6];
      canal^[i,7]:=coef[7]*canal^[i,7];
      canal^[i,8]:=coef[8]*canal^[i,8];
    end;
  until i >= pg;
end;
W:=MessageBox('^C' Se inverseaza punctele achiz.?',nil,mfYesButton+mfNoButton+mfInformation);
if W = cmYes then
begin
  for k:=1 to kl+1 do
    begin
      for i:=1 to pg do
        canalu^[i]:=canal^[i,k];
        i:=1;
        for n:= pg downto 1 do
          begin
            canal^[i,k]:=canalu^[n];
            i:=i+1;
          end;
        end;
      end;
    end;
  j:=0;
  repeat
    begin
      inc(j);
      i:=0;
      repeat
        begin
          inc(i);
          canal^[i,j]:=canal^[i,j]*ktr[j];
        end;
      until i=pg;
    end;
  until j=k1+1;

  for i:=1 to kl+1 do
    begin
      sirl[i]:=copy(numecan[i],4,3);
    end;
  for j:=1 to kl+1 do puncte[j]:=0;
  for j:=1 to kl+1 do
    begin
      z1[j]:=0;
      z2[j]:=0;
      z3[j]:=0;
      z4[j]:=0;
      {***} p0:=1; {***}
      i:=p0;
      repeat
        i:=i+1;
      until (canal^[i,j] < 0) and (canal^[i+1,j] >=0);
      z1[j]:=i;
      i:=p0;
      repeat
        i:=i+1;
      until (canal^[i,j] > 0) and (canal^[i+1,j] <=0);
      z2[j]:=i;
      verl:=false;
      ver2:=false;
      if z1[j] < z2[j] then
        begin
          z3[j]:=z1[j];
          repeat
            z3[j]:=z3[j]+1;
            if (z3[j]-z1[j] > round(sr/(kl+1)*0.02-5)) and (z3[j]-z1[j] < round(sr/(kl+1)*
              0.02+5)) then verl:=true;
          until true;
        end;
    end;
  end;

```

```

        until (canal^[z3[j],j] <0) and (canal^[z3[j]+1,j] >=0) {and ((z3[j]-z1[j])>80)}and
        (ver1=true);
        puncte[j]:=z3[j]-z1[j];
    end;
    if z2[j] < z1[j] then
    begin
        z4[j]:=z2[j];
        repeat
            z4[j]:=z4[j]+1;
            if (z4[j]-z2[j] > round(sr/(k1+1)*0.02-5)) and (z4[j]-z2[j] < round(sr/(k1+1)*0.02+5))
            then ver2:=true;
        until (canal^[z4[j],j] >0) and (canal^[z4[j]+1,j] <=0) {and ((z4[j]-z1[j])>80)}and
(ver2=true);
        puncte[j]:=z4[j]-z2[j];
    end;
end;
for j:=1 to k1+1 do
begin
    max[j]:=0;
    min[j]:=0;
    for i:=1 to pg do
    begin
        if canal^[i,j] > max[j] then max[j]:=canal^[i,j];
        if canal^[i,j] < min[j] then min[j]:=canal^[i,j];
    end;
    cor[j]:=(max[j]+min[j])/2;
    for i:=1 to pg do
    begin
        canal^[i,j]:=canal^[i,j]-cor[j];
    end;
max[j]:=0;
min[j]:=0;
    for i:=1 to pg do
    begin
        if canal^[i,j] > max[j] then max[j]:=canal^[i,j];
        if canal^[i,j] < min[j] then min[j]:=canal^[i,j];
    end;
    maxi[j]:=0;
    mini[j]:=0;
    for i:=p0 to puncte[j]+p0 do
    begin
        if canal^[i,j] > maxi[j] then maxi[j]:=canal^[i,j];
        if canal^[i,j] < mini[j] then mini[j]:=canal^[i,j];
    end;
    cori[j]:=(maxi[j]+mini[j])/2;
    for i:=p0 to p0+puncte[j]+1 do
    begin
        canal^[i,j]:=canal^[i,j]-cori[j];
    end;
end;
for j:=1 to k1+1 do
begin
    if sir1[j]='OFF' then
    begin
        for i:=1 to pg do
        begin
            canal^[i,j]:=0;
            min[j]:=0; max[j]:=0;
        end;
    end;
end;
end;
procedure Semne;
var
    C1,C2:word;
begin
    with SemnData do
    begin
        begin
            C2 := CheckBoxData2;
            if C2 > 7 then
                begin coef[8]:=-1; C2:= C2-8 ;end
            else
                begin coef[8]:=1; end;
            if C2 > 3 then
                begin coef[7]:=-1; C2:= C2-4 ;end

```

```

else
begin coef[7]:=1; end;
if C2 > 1 then
begin coef[6]:=-1; C2:= C2-2 ;end
else
begin coef[6]:=1; end;
if C2 > 0 then
begin coef[5]:=-1; end
else
begin coef[5]:=1; end;
end;
begin
C1 := CheckBoxData1;
if C1 > 7 then
begin coef[4]:=-1; C1:=C1-8 ;end
else
begin coef[4]:=1; end;
if C1 > 3 then
begin coef[3]:=-1; C1:=C1-4; end
else
begin coef[3]:=1; end;
if C1 > 1 then
begin coef[2]:=-1; C1:=C1-2; end
else
begin coef[2]:=1; end;
if C1 > 0 then
begin coef[1]:=-1;end
else
begin coef[1]:=1; end;
end;
end;
end;
procedure Inversare_Polaritate;
var
MyView: PView;
Dialog: PMyDialog;
R: TRect;
C: Word;
begin
R.Assign(15,4,60,16);
Dialog:=New(PMyDialog, Init(R, ' Inversare Polaritate '));
with Dialog^ do
begin
R.Assign(5,2,20,6);
MyView:=New(PCheckBoxes, Init(R,
NewSItem('coef[~1~]',
NewSItem('coef[~2~]',
NewSItem('coef[~3~]',
NewSItem('coef[~4~]',nil))))));
Insert(MyView);
R.Assign(25,2,40,6);
MyView:=New(PCheckBoxes, Init(R,
NewSItem('coef[~5~]',
NewSItem('coef[~6~]',
NewSItem('coef[~7~]',
NewSItem('coef[~8~]',nil))))));
Insert(MyView);
R.Assign(27, 8, 37, 10);
Insert(New(PButton, Init(R, 'Cancel', cmCancel, bfNormal)));
R.Assign(7, 8, 17, 10);
Insert(New(PButton, Init(R, '~O~k', cmOK, bfDefault)));
end;
Dialog^.SetData(SemData);
C:=DeskTop^.ExecView(Dialog);
if C <> cmCancel then
begin
Dialog^.GetData(SemData);
SemData;
end;
Dispose(Dialog, Done);
end;
procedure NrPuncte;
const

```

```

pc:string='.';
var
  rnum:array[1..8] of string;
begin
  writeln(FT1,' Nume fisier : ',NumeFisier);
  writeln(FT1,' Fisierul a fost creat : - ',data);
  writeln(FT1,' - ',ora);
  writeln(FT1,' Fisierul contine : ',comment);
  writeln(FT1,' Rata de esantionare : ',sr:6:3);
  writeln(FT1,' Rata de scanare : ',sc:6:3);
  writeln(FT1,' Nr. puncte achizitionate : ',pg);
  writeln(FT1);
  writeln(FT1,' Cele ',kl+1,' canale citite sunt :');
  writeln(FT1);
  for i:=1 to kl+1 do
    begin
      writeln(FT1,' Canal : ',numecan[i]);
    end;
  writeln(FT1);
  writeln(FT1,' Numarul de puncte pe o perioada , valori maxime si minime :');
  for j:=1 to kl+1 do
    begin
      rnum[j]:=numecan[j];
      repeat
        rnum[j]:=rnum[j]+pc;
      until (Length(rnum[j])+Length(pc)) = 30;
      write(FT1,' - Canal ',rnum[j]);
      if sir1[j]='OFF' then
        begin
          writeln(FT1,' neutilizat ');
        end
      else
        begin
          write(FT1,puncte[j]:6,' ');
          writeln(FT1,max[j]:10:5,' ',min[j]:10:5);
        end;
      end;
    end;
end;
{***** Calcul *****}
procedure Fourier;
begin
  for k:=1 to kl+1 do
    begin
      for i:=1 to 40 do
        begin
          s1:=0; s2:=0;
          for j:=p0 to (puncte[k]+p0-1) do
            begin
              s1:=s1+(2/puncte[k]*canal^[j,k]*sin(i*j*2*pi/puncte[k]));
              s2:=s2+(2/puncte[k]*canal^[j,k]*cos(i*j*2*pi/puncte[k]));
            end;
            GetMem(p1[i,k],SizeOf(ai[i,k]));
            GetMem(p2[i,k],SizeOf(br[i,k]));
            GetMem(p3[i,k],SizeOf(am[i,k]));
            GetMem(p4[i,k],SizeOf(e[i,k]));
            GetMem(p5[i,k],SizeOf(faza[i,k]));
            ai[i,k]:=s1;
            br[i,k]:=s2;
            am[i,k]:=sqrt(sqrt(ai[i,k])+sqrt(br[i,k]));
            e[i,k]:=am[i,k]/sqrt(2);
            if (ai[i,k] < -1e-6) and (br[i,k] > 0) then faza[i,k]:=180-
arctan(abs(br[i,k]/ai[i,k]))*180/pi;
            if (ai[i,k] < -1e-6) and (br[i,k] < 0) then faza[i,k]:=180+arctan(br[i,k]/ai[i,k])*180/pi;
            if (ai[i,k] > 1e-6) and (br[i,k] > 0) then faza[i,k]:=arctan(br[i,k]/ai[i,k])*180/pi;
            if (abs(ai[i,k]) <= 1e-6) and (br[i,k] > 0) then faza[i,k]:=90;
            if (ai[i,k] > 1e-6) and (br[i,k] < 0) then faza[i,k]:=360-
arctan(abs(br[i,k]/ai[i,k]))*180/pi;
            if (abs(ai[i,k]) <= 1e-6) and (br[i,k] < 0) then faza[i,k]:=270;
            end;
            sla[k]:=0; s2b[k]:=0;
            for i:=1 to 40 do
              begin
                sla[k]:=sla[k]+ai[i,k];
                s2b[k]:=s2b[k]+br[i,k];
              end;
            if (sla[k] < -1e-6) and (s2b[k] > 0) then fazan[k]:=180-arctan(abs(s2b[k]/sla[k]))*180/pi;
            if (sla[k] < -1e-6) and (s2b[k] < 0) then fazan[k]:=180+arctan(s2b[k]/sla[k])*180/pi;
            if (sla[k] > 1e-6) and (s2b[k] > 0) then fazan[k]:=arctan(s2b[k]/sla[k])*180/pi;

```

```

if (sla[k] > 1e-6) and (s2b[k] < 0) then fazan[k]:=360-arctan(abs(s2b[k]/sla[k]))*180/pi;
if (abs(sla[k]) <= 1e-6) and (s2b[k] < 0) then fazan[k]:=270;
end;
fazan[1]:=fazan[1];
fazan[2]:=fazan[2]+(0.454-0.08);
fazan[3]:=fazan[3]+(0.829-0.174);
fazan[4]:=fazan[4]+(1.95+0.1265);
fazan[5]:=fazan[5]+(2.456-0.072);
fazan[6]:=fazan[6]+(2.821-0.154);
fazan[8]:=fazan[8]+3.527;
for i:=1 to k1+1 do
begin
if fazan[i]>360 then fazan[i]:=fazan[i]-360;
end;
end;
procedure ValEfCoef;
begin
for k:=1 to k1+1 do
begin
if sirl[k]='OFF' then
begin
Vef[k]:=0;
writeln;
end
else
begin
{***** Valoare Medie *****}
sl:=0;
for i:=p0 to puncte[k]+p0 do
begin
sl:=sl+canal^[i,k];
end;
VMed[k]:=sl/puncte[k];
{***** Valoare Efectiva *****}
sl:=0;
for i:=1 to 40 do
begin
sl:=sl+sqr(e[i,k]);
end;
maxl[k]:=0;
for i:=p0 to puncte[k]+p0 do
begin
if canal^[i,k] > maxl[k] then maxl[k]:=canal^[i,k];
end;
VEf[k]:=sqrt(sl+sqr(VMed[k]));
{***** Factor Virf *****}
FVirf[k]:=maxl[k]/VEf[k];
{***** Valoare Medie Redresata *****}
sl:=0;
for i:=p0 to puncte[k]+p0 do
begin
sl:=sl+abs(canal^[i,k]);
end;
VMRed[k]:=sl/puncte[k];
{***** Factor Forma *****}
FForma[k]:=VEf[k]/VMRed[k];
{***** Reziuul Deformant *****}
Rd[k]:=sqrt(sqr(VEf[k])-sqr(VMed[k])-sqr(e[1,k]));
{***** Factor de distorsiune *****}
FDist[k]:=Rd[k]/e[1,k];
{***** Coeficient Deformare *****}
sl:=0;
for i:=p0 to puncte[k]+p0 do
begin
bl:=am[1,k]*sin(i*2*pi/puncte[k]+faza[1,k]*pi/180);
s2:=abs((canal^[i,k]-bl)/am[1,k]);
sl:=sl+s2;
end;
CDef[k]:=sl/puncte[k];
{***** Nivel Armonica *****}
for i:=1 to 40 do
begin
NArm[i,k]:=e[i,k]/e[1,k];

```

```

end;
{***** Continut fundamentala *****}
CFun[k]:=e[1,k]/VEf[k];
end;
end;
for k:=1 to kl+1 do
begin
if sirl[k]='OFF' then
begin
writeln(FT, '          Canal : ',numecan[k]);
writeln(FT);
gotoxy(10,10);writeln(FT,'Neutilizat !');
end
else
begin
writeln(FT);
writeln(FT, '          Canal : ',numecan[k], '          faza = ',fazan[k]:10:5);
writeln(FT);
writeln(FT, '          Arm      A          B          AmArm          VefArm          Faza
Nivel');
writeln(FT, '          -----');
for i:=1 to 40 do
begin
writeln(FT, '          ',i:4, '          ',ai[i,k]:10:5, '          ',br[i,k]:10:5, '          ',am[i,k]:10:5, '          ',
e[i,k]:10:5, '          ',faza[i,k]:10:5, '          ',NArm[i,k]:10:5);
end;
writeln(FT);
writeln(FT, '          VMed          VEF          FVirf          VMRed          FForma          Rd');
writeln(FT, '          -----');
writeln(FT, '          ',VMed[k]:10:7, '          ',Vef[k]:10:7, '          ',FVirf[k]:10:5, '          ',VMRed[k]:10:5, '
',FForma[k]:10:5, '          ',Rd[k]:10:5);
writeln(FT);
writeln(FT, '          FDist          CDef          CFundam ');
writeln(FT, '          -----');
writeln(FT, FDist[k]:10:5, '          ',Cdef[k]:10:5, '          ',CFun[k]:10:5);
end;
ok2:=true;
readln;
end;
end;
procedure Defazaje_Arm;
begin
for i3:=1 to 40 do
begin
if faza[1,cu+1] > faza[1,ci+1] then
begin
if (faza[i3,cu+1]-faza[i3,ci+1]) <= 180 then
defi[i3]:=faza[i3,cu+1]-faza[i3,ci+1];
if (faza[i3,cu+1]-faza[i3,ci+1]) > 180 then
defi[i3]:=-(360-faza[i3,cu+1]+faza[i3,ci+1]);
end
else
begin
if (faza[i3,ci+1]-faza[i3,cu+1]) < 180 then
defi[i3]:=(faza[i3,ci+1]-faza[i3,cu+1]);
if (faza[i3,ci+1]-faza[i3,cu+1]) >= 180 then
defi[i3]:=360+faza[i3,cu+1]-faza[i3,ci+1];
end;
if fazan[cu+1] = fazan[ci+1] then defi[i3]:=0;
end;
end;
procedure Defazaje;
var
R:TRect;
C:word;
begin
for i:=1 to 12 do ok3[i]:=false;
i2:=0;
repeat
i2:=i2+1;
if ok2=false then
begin
R.Assign(10,5,70,13);
MessageBoxRect(R,^C'Nu s-au efectuat calculele pentru regim deformant.'#13+
^C'Se pot afla doar defazajele , fara puteri .',nil,mfOKButton+mfInformation);
end;
writeln(FT2);

```

```

writeln(FT2,'          Cele 6 canale citite sunt : ');
for il:= 1 to kl+1 do
  begin
    writeln(FT2,'          Canal : ',numecan[il]);
  end;
writeln(FT2);
writeln(FT2,' Canalele intre care se calculeaza defazajul : ');
write('          - Canal : ');read(cu);write(FT2,'          - Canal : ',cu);
writeln(FT2);
write('          - Canal : ');read(ci);write(FT2,'          - Canal : ',ci);
writeln(FT2);
if faza[1,cu+1] > faza[1,ci+1] then
begin
  if (fazan[cu+1]-fazan[ci+1]) <= 180 then
    def[i2]:=fazan[cu+1]-fazan[ci+1];
  if (fazan[cu+1]-fazan[ci+1]) > 180 then
    def[i2]:=-(360-fazan[cu+1]+fazan[ci+1]);
end
else
begin
  if (fazan[ci+1]-fazan[cu+1]) < 180 then
    def[i2]:=-(fazan[ci+1]-fazan[cu+1]);
  if (fazan[ci+1]-fazan[cu+1]) >= 180 then
    def[i2]:=360+fazan[cu+1]-fazan[ci+1];
end;
if fazan[cu+1] = fazan[ci+1] then def[i2]:=0;
writeln(FT2);
writeln(FT2,' Defazajul intre :');
writeln(FT2);
writeln(FT2,' Canal ',numecan[cu+1],' si Canal ',numecan[ci+1],'def. este :
',def[i2]:6:3,'°');
writeln(FT2);
if ok2=true then
  begin
    C:=MessageBox('^C' Se calculeaza puterile corespunzatoare
    '?',nil,mfYesButton+mfNoButton+mfInformation);
    if C = cmYes then
      begin
        Defazaje Arm;
        writeln(FT2,'          Puterea calculata cu ',numecan[cu+1],' si ',numecan[ci+1]);
        writeln(FT2);
        writeln(FT2,'          Arm      Ui      Ii      defi      Pi      Qi');
        writeln(FT2,'          =====');
        pa:=0; qr:=0; sa:=0;
        for i:=1 to 40 do
          begin
            pamm[i]:=e[i,cu+1]*e[i,ci+1]*cos(defi[i]*pi/180);
            qamm[i]:=e[i,cu+1]*e[i,ci+1]*sin(defi[i]*pi/180);
            samm[i]:=e[i,cu+1]*e[i,ci+1];
            pa:=pa+pamm[i];
            qr:=qr+qamm[i];
            sa:=sa+samm[i];
            if (sa*sa-pa*pa-qr*qr) < 0 then
              begin
                pd:=sa*(FDist[cu+1]+FDist[ci+1]);
              end
            else
              begin
                pd:=sqrt(sqr(sa)-sqr(pa)-sqr(qr));
              end;
            writeln(FT2,'          ',i:4,' ',e[i,cu+1]:10:5,' ',e[i,ci+1]:10:5,' ',
            defi[i]:10:5,' ',pamm[i]:10:5,' ',qamm[i]:10:5);
          end;
          writeln(FT2,'          =====');
          writeln(FT2);
          writeln(FT2,'          Puterea aparenta :      = S = ',sa:10:4);
          writeln(FT2,'          Puterea activa:      = P = ',pa:10:4);
          writeln(FT2,'          Puterea reactiva:    = Q = ',qr:10:4);
          writeln(FT2,'          Puterea deformanta:  = D = ',pd:10:4);
        end;
      end;
    C:=MessageBox('^C'Calculati def. intre canale '?',nil,mfYesButton+mfNoButton+mfInformation);
    until C = cmNo;
  end;
end;
procedure Unghil;
begin

```



```

if aa > bb then
begin
  if (aa-bb) <= 180 then
    fi:=aa-bb;
  if (aa-bb) > 180 then
    fi:=(360-aa+bb);
end
else
begin
  if (bb-aa) < 180 then
    fi:=(bb-aa);
  if (bb-aa) >= 180 then
    fi:=360+aa-bb;
end;
if aa = bb then fi:=0;
end;
procedure Unghi;
begin
  if (bb >= 0) and (aa > 0) then fi:=arctan(bb/aa)*180/pi;
  if (bb >= 0) and (aa = 0) then fi:=90;
  if (bb >= 0) and (aa < 0) then fi:=180-arctan(abs(bb/aa))*180/pi;
  if (bb <= 0) and (aa < 0) then fi:=180+arctan(abs(bb/aa))*180/pi;
  if (bb <= 0) and (aa = 0) then fi:=270;
  if (bb <= 0) and (aa > 0) then fi:=360-arctan(abs(bb/aa))*180/pi;
end;
procedure RegNesim;
var
  alfa1, alfa2, alfa3, alfa4, alfa5, alfa6, alfa7, alfa8, aur, aus, aut,
  aurs, aust, autr, aUh, aUd, aUi, bur, bus, but, burs, bust, butr,
  bUh, bUd, bUi, air, ais, ait, aIh, aId, aIi, bIh, bId, bIi, bir, bis, bit,
  a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8,
  umin, umax, imin, imax: extended;
  IRc, ISc, ITC, Ihc, Iic, Idc: array[1..2] of extended;
begin
  writeln(FT3);
  writeln(FT3, '    Obs. ! - procedura este aplicabila daca :');
  writeln(FT3);
  writeln(FT3, '    canal 0 - tens. faza R    canal 3 - curent faza R');
  writeln(FT3, '    canal 1 - tens. faza S    canal 4 - curent faza S');
  writeln(FT3, '    canal 2 - tens. faza T    canal 5 - curent faza T');
  writeln(FT3);
  {***** tensiuni *****}
  if cradio = 0 then
  begin
    aur:=VEf[1]*cos(fazan[1]*pi/180);
    bur:=VEf[1]*sin(fazan[1]*pi/180);
    aus:=VEf[2]*cos(fazan[2]*pi/180);
    bus:=VEf[2]*sin(fazan[2]*pi/180);
    aut:=VEf[3]*cos(fazan[3]*pi/180);
    but:=VEf[3]*sin(fazan[3]*pi/180);
    aurs:=-aur+aus;
    burs:=-bur+bus;
    Urs:=sqrt(sqr(aurs)+sqr(burs));
    aa:=aurs; bb:=burs;
    Unghi;
    fiUrs:=fi;
    aa:=0; bb:=0; fi:=0;

    aust:=-aus+aut;
    bust:=-bus+but;
    Ust:=sqrt(sqr(aust)+sqr(bust));
    aa:=aust; bb:=bust;
    Unghi;
    fiUst:=fi;
    aa:=0; bb:=0; fi:=0;

    autr:=aur-aut;
    butr:=bur-but;
    Utr:=sqrt(sqr(autr)+sqr(butr));
    aa:=autr; bb:=butr;
    Unghi;
    fiUtr:=fi;
    aa:=0; bb:=0; fi:=0;
  end
  else
  begin
    if (fazan[1]-fazan[4])-30 < 0 then
      begin
        fazanm[1]:=360+(fazan[1]-fazan[4])-30;

```

```

end
else
begin
fazanm[1]:=fazan[1]-fazan[4];
end;
if (fazan[2]-fazan[5])-30 < 0 then
begin
fazanm[2]:=360+(fazan[2]-fazan[5])-30;
end
else
begin
fazanm[2]:=fazan[2]-fazan[5];
end;
if (fazan[3]-fazan[6])-30 < 0 then
begin
fazanm[3]:=360+(fazan[3]-fazan[6])-30;
end
else
begin
fazanm[3]:=fazan[3]-fazan[6];
end;
aur:=VEf[1]/sqrt(3)*cos(fazanm[1]*pi/180);
bur:=VEf[1]/sqrt(3)*sin(fazanm[1]*pi/180);
aus:=VEf[2]/sqrt(3)*cos(fazanm[2]*pi/180);
bus:=VEf[2]/sqrt(3)*sin(fazanm[2]*pi/180);
aut:=VEf[3]/sqrt(3)*cos(fazanm[3]*pi/180);
but:=VEf[3]/sqrt(3)*sin(fazanm[3]*pi/180);
end;
aUh:=1/3*(aur+aus+aut);
bUh:=1/3*(bur+bus+but);
Uh:=sqrt(sqr(aUh)+sqr(bUh));
aa:=aUh; bb:=bUh;
Unghi;
fiUh:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
if cradio = 0 then
begin
if (fazan[2] >= 0) and (fazan[2] < 240) then
alfal:=fazan[2]+120;
if (fazan[2] >= 240) and (fazan[2] < 360) then
alfal:=fazan[2]-240;
b1:=VEf[2]*sin(alfal*pi/180);
a1:=VEf[2]*cos(alfal*pi/180);
if (fazan[3] >= 0) and (fazan[3] < 120) then
alfa2:=fazan[3]+240;
if (fazan[3] >= 120) and (fazan[3] < 360) then
alfa2:=fazan[3]-120;
b2:=VEf[3]*sin(alfa2*pi/180);
a2:=VEf[3]*cos(alfa2*pi/180);
end
else
begin
if (fazanm[2] >= 0) and (fazanm[2] < 240) then
alfal:=fazanm[2]+120;
if (fazanm[2] >= 240) and (fazanm[2] < 360) then
alfal:=fazanm[2]-240;
b1:=VEf[2]/sqrt(3)*sin(alfal*pi/180);
a1:=VEf[2]/sqrt(3)*cos(alfal*pi/180);
if (fazanm[3] >= 0) and (fazanm[3] < 120) then
alfa2:=fazanm[3]+240;
if (fazanm[3] >= 120) and (fazanm[3] < 360) then
alfa2:=fazanm[3]-120;
b2:=VEf[3]/sqrt(3)*sin(alfa2*pi/180);
a2:=VEf[3]/sqrt(3)*cos(alfa2*pi/180);
end;
aUd:=1/3*(aur+a1+a2);
bUd:=1/3*(bur+b1+b2);
Ud:=sqrt(sqr(aUd)+sqr(bUd));
aa:=aUd; bb:=bUd;
Unghi;
fiUd:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
if cradio = 0 then
begin
if (fazan[2] >= 0) and (fazan[2] < 120) then
alfa3:=fazan[2]+240;
if (fazan[2] >= 120) and (fazan[2] < 360) then

```

```

alfa3:=fazan[2]-120;
b3:=VEf[2]*sin(alfa3*pi/180);
a3:=VEf[2]*cos(alfa3*pi/180);
if (fazan[3] >= 0) and (fazan[3] < 240) then
alfa4:=fazan[3]+120;
if (fazan[3] >= 240) and (fazan[3] < 360) then
alfa4:=fazan[3]-240;
b4:=VEf[3]*sin(alfa4*pi/180);
a4:=VEf[3]*cos(alfa4*pi/180);
end
else
begin
if (fazanm[2] >= 0) and (fazanm[2] < 120) then
alfa3:=fazanm[2]+240;
if (fazanm[2] >= 120) and (fazanm[2] < 360) then
alfa3:=fazanm[2]-120;
b3:=VEf[2]/sqrt(3)*sin(alfa3*pi/180);
a3:=VEf[2]/sqrt(3)*cos(alfa3*pi/180);
if (fazanm[3] >= 0) and (fazanm[3] < 240) then
alfa4:=fazanm[3]+120;
if (fazanm[3] >= 240) and (fazanm[3] < 360) then
alfa4:=fazan[3]-240;
b4:=VEf[3]/sqrt(3)*sin(alfa4*pi/180);
a4:=VEf[3]/sqrt(3)*cos(alfa4*pi/180);
end;
aUi:=1/3*(aur+a3+a4);
bUi:=1/3*(bur+b3+b4);
Ui:=sqrt(sqr(aUi)+sqr(bUi));
aa:=aUi; bb:=bUi;
Unghi;
fiUi:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
kns2u:=Ui/Ud;knsOu:=Uh/Ud;knsu:=kns2u+knsOu; {coef. de nesimetrie}
umax:=0; umin:=1e8;
for i:=1 to 3 do
begin
if VEf[i] > umax then umax:=VEf[i];
if VEf[i] < umin then umin:=VEf[i];
end;
mu:=umin/umax; {raportul de nesimetrie}
{***** curenti *****}
air:=VEf[4]*cos(fazan[4]*pi/180);
bir:=VEf[4]*sin(fazan[4]*pi/180);
ais:=VEf[5]*cos(fazan[5]*pi/180);
bis:=VEf[5]*sin(fazan[5]*pi/180);
ait:=VEf[6]*cos(fazan[6]*pi/180);
bit:=VEf[6]*sin(fazan[6]*pi/180);
aIh:=1/3*(air+ais+ait);
bIh:=1/3*(bir+bis+bit);
Ih:=sqrt(sqr(aIh)+sqr(bIh));
aa:=aIh; bb:=bIh;
Unghi;
fiIh:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
if (fazan[5] >= 0) and (fazan[5] < 240) then
alfa5:=fazan[5]+120;
if (fazan[5] >= 240) and (fazan[5] < 360) then
alfa5:=fazan[5]-240;
b5:=VEf[5]*sin(alfa5*pi/180);
a5:=VEf[5]*cos(alfa5*pi/180);
if (fazan[6] >= 0) and (fazan[6] < 120) then
alfa6:=fazan[6]+240;
if (fazan[6] >= 120) and (fazan[6] < 360) then
alfa6:=fazan[6]-120;
b6:=VEf[6]*sin(alfa6*pi/180);
a6:=VEf[6]*cos(alfa6*pi/180);
aId:=1/3*(air+a5+a6);
bId:=1/3*(bir+b5+b6);
Id:=sqrt(sqr(aId)+sqr(bId));
aa:=aId; bb:=bId;
Unghi;
fiId:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
if (fazan[5] >= 0) and (fazan[5] < 120) then
alfa7:=fazan[5]+240;
if (fazan[5] >= 120) and (fazan[5] < 360) then
alfa7:=fazan[5]-120;

```

```

b7:=VEf[5]*sin(alfa7*pi/180);
a7:=VEf[5]*cos(alfa7*pi/180);
if (fazana[6] >= 0) and (fazana[6] < 240) then
  alfa8:=fazana[6]+120;
if (fazana[6] >= 240) and (fazana[6] < 360) then
  alfa8:=fazana[6]-240;
b8:=VEf[6]*sin(alfa8*pi/180);
a8:=VEf[6]*cos(alfa8*pi/180);
aIi:=1/3*(air+a7+a8);
bIi:=1/3*(bir+b7+b8);
Ii:=sqrt(sqr(aIi)+sqr(bIi));
aa:=aIi; bb:=bIi;
Unghi;
fiIi:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
kns2i:=Ii/Id;knsOi:=Ih/Id;knsi:=kns2i+knsOi;
imax:=0; imin:=le8;
for i:=1 to 3 do
  begin
    if VEf[i] > imax then imax:=VEf[i];
    if VEf[i] < imin then imin:=VEf[i];
  end;
rni:=imin/imax;
if fiUh > fiIh then
  begin
    if (fiUh-fiIh) <= 180 then
      defh:=fiUh-fiIh;
    if (fiUh-fiIh) > 180 then
      defh:=(360-fiUh+fiIh);
    end
  else
    begin
    if (fiIh-fiUh) < 180 then
      defh:=(fiIh-fiUh);
    if (fiIh-fiUh) >= 180 then
      defh:=360+fiUh-fiIh;
    end;
Ph:=3*Uh*Ih*cos(defh*pi/180);
Qh:=3*Uh*Ih*sin(defh*pi/180);
if fiUd > fiId then
  begin
    if (fiUd-fiId) <= 180 then
      defd:=fiUd-fiId;
    if (fiUd-fiId) > 180 then
      defd:=(360-fiUd+fiId);
    end
  else
    begin
    if (fiId-fiUd) < 180 then
      defd:=(fiId-fiUd);
    if (fiId-fiUd) >= 180 then
      defd:=360+fiUd-fiId;
    end;
Pdir:=3*Ud*Id*cos(defd*pi/180);
Qdir:=3*Ud*Id*sin(defd*pi/180);
if fiUi > fiIi then
  begin
    if (fiUi-fiIi) <= 180 then
      defii:=fiUi-fiIi;
    if (fiUi-fiIi) > 180 then
      defii:=(360-fiUi+fiIi);
    end
  else
    begin
    if (fiIi-fiUi) < 180 then
      defii:=(fiIi-fiUi);
    if (fiIi-fiUi) >= 180 then
      defii:=360+fiUi-fiIi;
    end;
if fiUi=fiIi then defii:=0;
Pii:=3*Ui*Ii*cos(defii*pi/180);
Qii:=3*Ui*Ii*sin(defii*pi/180);
if cradio=0 then
  begin
    for i:=1 to 3 do
      begin

```

```

aa:=fazan[i]; bb:=fazan[i+3];
Unghil;
dfi[i]:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;
IRc[1]:=VEf[4]*cos(dfi[1]*pi/180);
IRc[2]:=VEf[4]*sin(dfi[1]*pi/180);
IRst:=sqrt(sqr(IRc[1])+sqr(IRc[2]));
ISc[1]:=VEf[5]*cos(dfi[2]*pi/180);
ISc[2]:=VEf[5]*sin(dfi[2]*pi/180);
ISst:=sqrt(sqr(ISc[1])+sqr(ISc[2]));
ITc[1]:=VEf[6]*cos(dfi[3]*pi/180);
ITc[2]:=VEf[6]*sin(dfi[3]*pi/180);
ITst:=sqrt(sqr(ITc[1])+sqr(ITc[2]));

Prr:=VEf[1]*VEf[4]*cos(dfi[1]*pi/180);
Qrr:=VEf[1]*VEf[4]*sin(dfi[1]*pi/180);
Pss:=VEf[2]*VEf[5]*cos(dfi[2]*pi/180);
Qss:=VEf[2]*VEf[5]*sin(dfi[2]*pi/180);
Ptt:=VEf[3]*VEf[6]*cos(dfi[3]*pi/180);
Qtt:=VEf[3]*VEf[6]*sin(dfi[3]*pi/180);
end;
end
else
begin
for i:=1 to 3 do
begin
aa:=fazanm[i]; bb:=fazan[i+3];
Unghil;
dfi[i]:=fi;
aa:=0; bb:=0; fi:=0;

IRc[1]:=VEf[4]*cos(dfi[1]*pi/180);
IRc[2]:=VEf[4]*sin(dfi[1]*pi/180);
IRst:=sqrt(sqr(IRc[1])+sqr(IRc[2]));
ISc[1]:=VEf[5]*cos(dfi[2]*pi/180);
ISc[2]:=VEf[5]*sin(dfi[2]*pi/180);
ISst:=sqrt(sqr(ISc[1])+sqr(ISc[2]));
ITc[1]:=VEf[6]*cos(dfi[3]*pi/180);
ITc[2]:=VEf[6]*sin(dfi[3]*pi/180);
ITst:=sqrt(sqr(ITc[1])+sqr(ITc[2]));

Prr:=VEf[1]/sqrt(3)*VEf[4]*cos(dfi[1]*pi/180);
Qrr:=VEf[1]/sqrt(3)*VEf[4]*sin(dfi[1]*pi/180);
Pss:=VEf[2]/sqrt(3)*VEf[5]*cos(dfi[2]*pi/180);
Qss:=VEf[2]/sqrt(3)*VEf[5]*sin(dfi[2]*pi/180);
Ptt:=VEf[3]/sqrt(3)*VEf[6]*cos(dfi[3]*pi/180);
Qtt:=VEf[3]/sqrt(3)*VEf[6]*sin(dfi[3]*pi/180);
end;
end;

Ihc[1]:=Ih*cos(defh*pi/180);
Ihc[2]:=Ih*sin(defh*pi/180);
Ihst:=sqrt(sqr(Ihc[1])+sqr(Ihc[2]));
Idc[1]:=Id*cos(defd*pi/180);
Idc[2]:=Id*sin(defd*pi/180);
Idst:=sqrt(sqr(Idc[1])+sqr(Idc[2]));
Iic[1]:=Ii*cos(defii*pi/180);
Iic[2]:=Ii*sin(defii*pi/180);
Iist:=sqrt(sqr(Iic[1])+sqr(Iic[2]));
Ptot:=Prr+Pss+Ptt;
Qtot:=Qrr+Qss+Qtt;

IRsta:=IRst*cos(dfi[1]*pi/180);
IRstr:=IRst*sin(dfi[1]*pi/180);
ISsta:=ISst*cos(dfi[2]*pi/180);
ISstr:=ISst*sin(dfi[2]*pi/180);
ITsta:=ITst*cos(dfi[3]*pi/180);
ITstr:=ITst*sin(dfi[3]*pi/180);
Ihsta:=Ihst*cos(defh*pi/180);
Ihstr:=Ihst*sin(defh*pi/180);
Idsta:=Idst*cos(defd*pi/180);
Idstr:=Idst*sin(defd*pi/180);
Iista:=Iist*cos(defii*pi/180);
Iistr:=Iist*sin(defii*pi/180);
if cradio=0 then
begin
writeln(FT3);
writeln(FT3,' UR = ',VEf[1]:8:4,' V faza ',fazan[1]:8:4,'° URS = ',Urs:8:4,' V faza
',fiUrs:8:4,'°');
writeln(FT3,' US = ',VEf[2]:8:4,' V faza ',fazan[2]:8:4,'° UST = ',Ust:8:4,' V faza
',fiUst:8:4,'°');

```

```

writeln(FT3, ' UT = ', Vef[3]:8:4, ' V faza ', fazan[3]:8:4, '° UTR = ', Utr:8:4, ' V faza
', fiUtr:8:4, '°');
end
else
begin
writeln(FT3);
writeln(FT3, ' URS = ', Vef[1]:8:4, ' V faza ', fazan[1]:8:4, '° UR =
', Vef[1]/sqrt(3):8:4, ' V faza ', fazanm[1]:8:4, '°');
writeln(FT3, ' UST = ', Vef[2]:8:4, ' V faza ', fazan[2]:8:4, '° US =
', Vef[2]/sqrt(3):8:4, ' V faza ', fazanm[2]:8:4, '°');
writeln(FT3, ' UTR = ', Vef[3]:8:4, ' V faza ', fazan[3]:8:4, '° UT =
', Vef[3]/sqrt(3):8:4, ' V faza ', fazanm[3]:8:4, '°');
end;
writeln(FT3);
writeln(FT3, ' Uh = ', Uh:8:4, ' V faza ', fiUh:8:4, '°');
writeln(FT3, ' Ud = ', Ud:8:4, ' V faza ', fiUd:8:4, '°');
writeln(FT3, ' Ui = ', Ui:8:4, ' V faza ', fiUi:8:4, '°');
writeln(FT3);
writeln(FT3, ' knsOu = ', knsOu:8:5);
writeln(FT3, ' kns2u = ', kns2u:8:5);
writeln(FT3, ' knsu = ', knsu:8:5);
writeln(FT3, ' rnu = ', rnu:8:5);
writeln(FT3, ' IR = ', Vef[4]:8:4, ' A faza ', fazan[4]:8:4, '° Ih = ', Ih:8:4, ' A faza
', fiIh:8:4, '°');
writeln(FT3, ' IS = ', Vef[5]:8:4, ' A faza ', fazan[5]:8:4, '° Id = ', Id:8:4, ' A faza
', fiId:8:4, '°');
writeln(FT3, ' IT = ', Vef[6]:8:4, ' A faza ', fazan[6]:8:4, '° Ii = ', Ii:8:4, ' A faza
', fiIi:8:4, '°');
writeln(FT3);
writeln(FT3, ' IR* = ', IRst:8:4, ' A faza ', dfi[1]:8:4, '° Ih* = ', Ihst:8:4, ' A faza
', defh:8:4, '°');
writeln(FT3, ' IS* = ', ISst:8:4, ' A faza ', dfi[2]:8:4, '° Id* = ', Idst:8:4, ' A faza
');
writeln(FT3, ' IT* = ', ITst:8:4, ' A faza ', dfi[3]:8:4, '° Ii* = ', Iist:8:4, ' A faza
', defii:8:4, '°');
writeln(FT3);
if IRstr >= 0 then
begin
write(FT3, ' IR* = ', IRsta:8:4, ' + j', IRstr:8:4, ' A');
end
else
begin
write(FT3, ' IR* = ', IRsta:8:4, ' - j', -IRstr:8:4, ' A');
end;
if Ihstr >= 0 then
begin
writeln(FT3, ' Ih* = ', Ihsta:8:4, ' + j', Ihstr:8:4, ' A');
end
else
begin
writeln(FT3, ' Ih* = ', Ihsta:8:4, ' - j', -Ihstr:8:4, ' A');
end;
if ISstr >= 0 then
begin
write(FT3, ' IS* = ', ISsta:8:4, ' + j', ISstr:8:4, ' A');
end
else
begin
write(FT3, ' IS* = ', ISsta:8:4, ' - j', -ISstr:8:4, ' A');
end;
if Idstr >= 0 then
begin
writeln(FT3, ' Id* = ', Idsta:8:4, ' + j', Idstr:8:4, ' A');
end
else
begin
writeln(FT3, ' Id* = ', Idsta:8:4, ' - j', -Idstr:8:4, ' A');
end;
if ITstr >= 0 then
begin
write(FT3, ' IT* = ', ITsta:8:4, ' + j', ITstr:8:4, ' A');
end
else
begin
write(FT3, ' IT* = ', ITsta:8:4, ' - j', -ITstr:8:4, ' A');
end;
if Iistr >= 0 then
begin

```

```

    writeln(FT3, '
end
else
begin
    writeln(FT3, '
end;
writeln(FT3);
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3);
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3);
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
writeln(FT3, '
end;

procedure Afisare;
const
    sp:string=' ';
var
    sir:string[1];
    numcan:tl;
    C,C1:word;
    Pk,Qk,pa,qr,sa,pd:extended;
    vari,cod,spat:integer;
    R:TRect;
    Fer:FWindow;
    Intern:PTerminal;
    Dialog1:PMyDialog;
    wind:PView;
begin
    if ok2=false then
    begin
        MessageBox('^C'Nu s-au efectuat calcule !',nil,mfOKButton+mfInformation);
        exit;
    end;
    for k:=1 to k1+1 do
    begin
        if sir1[k]='OFF' then
        begin
            MessageBox('^C'CANAL : '+numecan[k]+' .....neutilizat !',nil,mfOKButton+mfInformation);
        end
        else
        begin
            C:=MessageBox('^C'Tipariti marimile caract. regimului deformant corespunzator'#13+
            '^C'canalului => '+numecan[k]+'?',nil,mfYesButton+mfNoButton+mfInformation);
            if C = cmYes then
            begin
                writeln(g);
                writeln(g);
                writeln(g);
                writeln(g, '
                    ',data, '
                    ',ora);
                writeln(g, '
                    Nume fisier : ',NumeFisier);
                writeln(g, '
                    Fisierul contine : ',comment);
                writeln(g);
                writeln(g, '
                    CANAL: ',numecan[k]);
                writeln(g, '
                    =====');
                writeln(g, '
                    Aram      A          B          AmAram      VefAram      Faza
                    =====');
                writeln(g, '
                    Nivel
                for i:=1 to 40 do
                begin
                    if i <= 9 then
                    begin
                        writeln(g, '
                            ',i:4, '
                            ',ai[i,k]:10:5, '
                            ',br[i,k]:10:5, '
                            ',am[i,k]:10:5, '
                            ',
                            e[i,k]:10:5, '
                            ',faza[i,k]:10:6, '
                            ',NAram[i,k]:7:5);
                        end;
                    if i > 9 then
                    begin
                        writeln(g, '
                            ',i:4, '
                            ',ai[i,k]:10:5, '
                            ',br[i,k]:10:5, '
                            ',am[i,k]:10:5, '
                            ',
                            e[i,k]:10:5, '
                            ',faza[i,k]:10:5, '
                            ',NAram[i,k]:7:5);
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```



```

begin
  parm[i]:=e[i,cu+1]*e[i,ci+1]*cos(defi[i]*pi/180);
  qarm[i]:=e[i,cu+1]*e[i,ci+1]*sin(defi[i]*pi/180);
  sarm[i]:=e[i,cu+1]*e[i,ci+1];
  pa:=pa+parm[i];
  qr:=qr+qarm[i];
  sa:=sa+sarm[i];
  if (sa*sa-pa*pa-qr*qr) < 0 then
    begin
      pd:=sa*(FDist[cu+1]+FDist[ci+1]);
    end
  else
    begin
      pd:=sqrt(sqr(sa)-sqr(pa)-sqr(qr));
    end;
  writeln(g,'          ',i:4,' ',e[i,cu+1]:10:5,' ',e[i,ci+1]:10:5,' ',
    defi[i]:10:5,' ',parm[i]:10:5,' ',qarm[i]:10:5);
end;
writeln(g,'          =====');
Pk:=pa-parm[1];
Qk:=qr-qarm[1];
writeln(g);
writeln(g);
writeln(g,'          Puterea aparenta :      S = ',sa:10:4,' VA');
writeln(g,'          Puterea activa:          P = ',pa:10:4,' W ',',      = Pk = ',Pk:10:4,' W');
writeln(g,'          Puterea reactiva:         Q = ',qr:10:4,' var ',',      = Qk = ',Qk:10:4,' var');
writeln(g,'          Puterea deformanta:        D = ',pd:10:4,' vad');
writeln(g);
end;
C:=MessageBox(^C'Tipariti marimile corespunzatoare regimului nesimetric
?',nil,mfYesButton+mfNoButton+mfInformation);
if C = cmYes then
begin
  R.Assign(18,8,65,15);
  Dialog1 := New(PMyDialog, Init(R,' Z Deplasare text @ '));
  with Dialog1^ do
    begin
      R.Assign(37,2,42,3);
      wind:=New(PInputLine, Init(R,5));
      Insert(wind);
      R.Assign(2,2,36,3);
      Insert(New(PLabel, Init(R,'~I~ntroducere nr. de linii goale = ',wind)));
      R.Assign(15,4,25,6);
      Insert(New(PButton, Init(R,'~O~K', cmOK, bfDefault)));
    end;
  Dialog1^.SetData(SpatiuData);
  Cl := DeskTop^.ExecView(Dialog1);
  if Cl <> cmCancel then
    begin
      Dialog1^.GetData(SpatiuData);
      val(SpatiuData, spat, cod);
    end;
  Dispose(Dialog1, Done);
  for i:=1 to spat do writeln(g);
  writeln(g,'          ----- Regim nesimetric ----- ',comment);
end;
if cradio=0 then
begin
  writeln(g);
  write(g,'          UR = ',VEf[1]:8:4,' V faza ',fazan[1]:8:4,' ° URS =
    ',Urs:8:4,' V faza ',fiUrs:8:4,' °');
  writeln(g,'          Uh = ',Uh:8:4,' V faza ',fiUh:8:4,' °');
  write(g,'          US = ',VEf[2]:8:4,' V faza ',fazan[2]:8:4,' ° UST =
    ',Ust:8:4,' V faza ',fiUst:8:4,' °');
  writeln(g,'          Ud = ',Ud:8:4,' V faza ',fiUd:8:4,' °');
  write(g,'          UT = ',VEf[3]:8:4,' V faza ',fazan[3]:8:4,' ° UTR =
    ',Utr:8:4,' V faza ',fiUtr:8:4,' °');
  writeln(g,'          Ui = ',Ui:8:4,' V faza ',fiUi:8:4,' °');
end
else
begin
  writeln(g);
  write(g,'          URS = ',VEf[1]:8:4,' V faza ',fazan[1]:8:4,' ° UR =
    ',VEf[1]/sqrt(3):8:4,' V');
  writeln(g,'          faza ',fazanm[1]:8:4,' ° Uh = ',Uh:8:4,' V faza ',fiUh:8:4,' °');
  write(g,'          UST = ',VEf[2]:8:4,' V faza ',fazan[2]:8:4,' ° US =
    ',VEf[2]/sqrt(3):8:4,' V');
  writeln(g,'          faza ',fazanm[2]:8:4,' ° Ud = ',Ud:8:4,' V faza ',fiUd:8:4,' °');
end;

```

```

write(g, '          UTR = ',VEf[3]:8:4,' V  faza ',fazan[3]:8:4,'°   UT =
',VEf[3]/sqrt(3):8:4,' V');
writeln(g, '  faza ',fazanm[3]:8:4,'°   Ui = ',Ui:8:4,' V  faza ',fiUi:8:4,'°');
end;
writeln(g);
write(g, '          IR = ',VEf[4]:8:4,' A  faza ',fazan[4]:8:4,'°   IR* = ',IRst:8:4,' A
faza ',dfi[1]:8:4,'° ');
if IRstr >= 0 then
begin
writeln(g, '  IR* = ',IRsta:8:4,' + j',IRstr:8:4,' A');
end
else
begin
writeln(g, '  IR* = ',IRsta:8:4,' - j',-IRstr:8:4,' A');
end;
write(g, '          IS = ',VEf[5]:8:4,' A  faza ',fazan[5]:8:4,'°   IS* = ',ISst:8:4,' A
faza ',dfi[2]:8:4,'° ');
if ISstr >= 0 then
begin
writeln(g, '  IS* = ',ISsta:8:4,' + j',ISstr:8:4,' A');
end
else
begin
writeln(g, '  IS* = ',ISsta:8:4,' - j',-ISstr:8:4,' A');
end;
write(g, '          IT = ',VEf[6]:8:4,' A  faza ',fazan[6]:8:4,'°   IT* = ',ITst:8:4,' A
faza ',dfi[3]:8:4,'° ');
if ITstr >= 0 then
begin
writeln(g, '  IT* = ',ITsta:8:4,' + j',ITstr:8:4,' A');
end
else
begin
writeln(g, '  IT* = ',ITsta:8:4,' - j',-ITstr:8:4,' A');
end;
writeln(g);
write(g, '          Ih = ',Ih:8:4,' A  faza ',fiIh:8:4,'°   Ih* = ',Ihst:8:4,' A  faza
',defh:8:4,'° ');
if Ihstr >= 0 then
begin
writeln(g, '  Ih* = ',Ihsta:8:4,' + j',Ihstr:8:4,' A');
end
else
begin
writeln(g, '  Ih* = ',Ihsta:8:4,' - j',-Ihstr:8:4,' A');
end;
write(g, '          Id = ',Id:8:4,' A  faza ',fiId:8:4,'°   Id* = ',Idst:8:4,' A  faza
',defd:8:4,'° ');
if Idstr >= 0 then
begin
writeln(g, '  Id* = ',Idsta:8:4,' + j',Idstr:8:4,' A');
end
else
begin
writeln(g, '  Id* = ',Idsta:8:4,' - j',-Idstr:8:4,' A');
end;
write(g, '          Ii = ',Ii:8:4,' A  faza ',fiIi:8:4,'°   Ii* = ',Iist:8:4,' A  faza
',defii:8:4,'° ');
if Iistr >= 0 then
begin
writeln(g, '  Ii* = ',Iista:8:4,' + j',Iistr:8:4,' A');
end
else
begin
writeln(g, '  Ii* = ',Iista:8:4,' - j',-Iistr:8:4,' A');
end;
writeln(g);
writeln(g);
writeln(g, '          knsOu = ',knsOu:8:5,'          knsOi =
',knsOi:8:5);
writeln(g, '          kns2u = ',kns2u:8:5,'          kns2i =
',kns2i:8:5);
writeln(g, '          knsu = ',knsu:8:5,'          knsi =
',knsi:8:5);
writeln(g, '          rnu = ',rnu:8:5,'          rni =
',rni:8:5);
writeln(g);
write(g, '          PR = ',Prr:10:4,' W  QR = ',Qrr:10:4,' var');
writeln(g, '          Ph = ',Ph:10:4,' W  Qh = ',Qh:10:4,' var');

```

```

write(g, '                PS = ', Pss:10:4, ' W   QS = ', Qss:10:4, ' var');
writeln(g, ' Pd = ', Pdir:10:4, ' W   Qd = ', Qdir:10:4, ' var');
write(g, '                PT = ', Ptt:10:4, ' W   QT = ', Qtt:10:4, ' var');
writeln(g, ' Pi = ', Pii:10:4, ' W   Qi = ', Qii:10:4, ' var');
writeln(g, '                Pt = ', Ptot:10:4, ' W   Qt = ', Qtot:10:4, ' var');
writeln(g, '----- ', NumeFisier);
end;
close(g);
end;

procedure Grafice;
var
maxx,maxy,x,y,diviz:word;
i,j,lx,ly,ly1,lx1,fs1,fs2,pas:integer;
kscmax:extended;
sec,sdef:array[1..8] of string;
procedure grstart;
var
gd,gm:integer;
begin
DetectGraph(gd,gm);
{ initgraph(gd,gm,'g:\limbaje\bp\bgi');}
initgraph(gd,gm,'c:\bp\bgi');
setBkColor(15);
setcolor(8);
ClearDevice;
if GraphResult <> 0 then halt;
Randomize;
MaxX:=GetMaxX;
MaxY:=GetMaxY;
end;

function Int2Str(L:longint):string;
var
s:string;
begin
str(L,s);
Int2Str:=s;
end;

procedure DrawBorder;
var
ViewPort:ViewPortType;
xl,x2,y1,y2:integer;
begin
SetLineStyle(SolidLn,0,NormalWidth);
GetViewSettings(ViewPort);
with ViewPort do
Rectangle(0,0,x2-xl,y2-y1);
end;

procedure FullPort;
begin
SetViewPort(0,0,MaxX,MaxY,ClipOn);
end;

procedure MainWindow(Header:string);
begin
SetTextStyle(DefaultFont,HorizDir,1);
SetTextJustify(CenterText,TopText);
FullPort;
OutTextxy(MaxX div 2 ,2 , Header);
SetViewPort(0,TextHeight('M')+4,MaxX,MaxY-(TextHeight('M')+4),ClipOn);
DrawBorder;
SetViewPort(1,TextHeight('M')+5,MaxX-1,MaxY-(TextHeight('M')+5),ClipOn);
end;

procedure Chenar1;
begin
SetColor(8);
MoveTo(x+100,y-10);
OutText(mesaj[i]);
MoveTo(x-27,y);
OutText(six[i]);
MoveTo(x-27,y+ly-10);
OutText(sim[i]);
MoveTo(x,y);
SetLineStyle(SolidLn,0,NormalWidth);
LineRel(0,ly);
LineRel(lx,0);
LineRel(0,-ly);

```

```

LineRel(-lx,0);
diviz:=ly div 2;
MoveTo(x,diviz+y);
SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
LineRel(lx,0);
if ok2=true then
begin
  if i <= 3 then
  begin
    MoveTo(x+lx+50, (diviz-30)+(ly+20)*(i-1));
    OutText('Vef'+Int2Str(i-1)+'='+sef[i]);
    MoveTo(x+lx+50, (diviz-15)+(ly+20)*(i-1));
    OutText('faza'+Int2Str(i-1)+'='+sdef[i]);
    MoveTo(x+lx+50, (diviz)+(ly+20)*(i-1));
    OutText('CDef'+Int2Str(i-1)+'='+sec[i]);
  end;
  if (i > 3) and (i <= 6) then
  begin
    MoveTo(x-50, (diviz+30)+(ly+20)*(i-4));
    OutText('Vef'+Int2Str(i-1)+'='+sef[i]);
    MoveTo(x-50, (diviz+45)+(ly+20)*(i-4));
    OutText('faza'+Int2Str(i-1)+'='+sdef[i]);
    MoveTo(x-50, (diviz+60)+(ly+20)*(i-4));
    OutText('CDef'+Int2Str(i-1)+'='+sec[i]);
  end;
  if i > 6 then
  begin
    MoveTo(x+lx+50, (diviz-30)+(ly+20)*(i-7));
    OutText('Vef'+Int2Str(i-1)+'='+sef[i]);
    MoveTo(x+lx+50, (diviz-15)+(ly+20)*(i-7));
    OutText('faza'+Int2Str(i-1)+'='+sdef[i]);
    MoveTo(x+lx+50, (diviz)+(ly+20)*(i-7));
    OutText('CDef'+Int2Str(i-1)+'='+sec[i]);
  end;
end;
end;
begin
for i:=1 to kl+1 do
begin
  mesaj[i]:='Canal '+numecan[i];
  str(max[i]:5:3,six[i]);
  str(min[i]:5:3,sim[i]);
  str(Vef[i]:6:3,sef[i]);
  str(CDef[i]:6:3,sec[i]);
  str(fazan[i]:6:3,sdef[i]);
end;
grstart;
lx:=maxx div 3-10;
ly:=maxy div 3-30;
for i:=1 to kl+1 do
begin
  if sir1[i]='OFF' then begin ksc[i]:=1; end
  else
  begin ksc[i]:=(ly-10)/(max[i]-min[i]); end;
end;
limmax:=200; limmin:=1;
kscmax:=1e20;
for i:=4 to 6 do
begin
  if ksc[i] <= kscmax then kscmax:=ksc[i];
end;
if pg=200 then
begin
  ClearDevice;
  SetColor(8);
  MainWindow(comment+' '+data+' '+ora+' fisier '+NumeFisier);
  MoveTo(350,1);
  OutText(' intre punctele :'+Int2Str(limmin)+'-'+Int2Str(limmax));
  x:=60; y:=20; i:=1;
  repeat
  if i<= 3 then
  begin
    chenarl;
    {SetColor(i);}
    for j:=1 to 199 do
    begin
      line(x+1*j div 1,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j,i]),
        x+1*(j+1) div 1,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+1,i]));
    end;
  end;
end;

```

```

        end;
        y:=y+(ly+20);
    end;
    if (i > 3) and (i <= 6) then
    begin
        x:=430;
        if i = 4 then
        y:=20;
        begin
            chenarl;
            {SetColor(i);}
            for j:=1 to 199 do
            begin
                line(x+1*j div 1,round((y+ly/2)-kscmax*canal^[j,i]),
                    x+1*(j+1) div 1,round((y+ly/2)-kscmax*canal^[j+1,i]));
            end;
            y:=y+(ly+20);
        end;
    end;
    if i > 6 then
    begin
        SetColor(8);
        MainWindow(comment+' '+data+' '+ora+' fisier '+NumeFisier);
        MoveTo(350,1);
        OutText(' intre punctele :'+Int2Str(limmin)+'-'+Int2Str(limax));
        chenarl;
        {SetColor(i-6);}
        for j:=1 to 199 do
        begin
            line(x+1*j div 1,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j,i]),
                x+1*(j+1) div 1,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+1,i]));
        end;
        y:=y+(ly+20);
    end;
    i:=i+1;
    if i=7 then
    begin
        x:=60;
        y:=20;
        readln;
        ClearDevice;
    end;
until i > kl+1;
a:=readkey;
ClearDevice;
end;

if pg > 250 then
begin
    if puncte[1] < 70 then
    begin pu:=100; fs1:=2; fs2:=1; pas:=51; end;
    if (puncte[1] >= 70) and (puncte[1] <= 100) then
    begin pu:=199; fs1:=1; fs2:=1; pas:=101; end;
    if (puncte[1] > 100) and (puncte[1] <= 200) then
    begin pu:=400; fs1:=1; fs2:=2; pas:=201; end;
    if (puncte[1] > 200) and (puncte[1] <= 300) then
    begin pu:=600; fs1:=1; fs2:=3; pas:=201; end;
    if (puncte[1] > 300) and (puncte[1] <= 400) then
    begin pu:=800; fs1:=1; fs2:=4; pas:=201; end;
    if puncte[1] > 400 then
    begin pu:=pg-2; fs1:=1; fs2:=5; end;
    limax:=pu;
    while limax <= pg do
    begin
        SetColor(8);
        MainWindow(comment+' '+data+' '+ora+' fisier '+NumeFisier);
        MoveTo(350,1);
        OutText(' intre punctele :'+Int2Str(limmin)+'-'+Int2Str(limax));
        x:=60; y:=20; i:=1;
        repeat
            if i <= 3 then
            begin
                chenarl;
                {SetColor(i);}
                for j:=0 to pu do {198}
                begin
                    line(x+fs1*(j+1) div fs2,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+limmin,i]),
                        x+fs1*(j+2) div fs2,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+limmin+1,i]));
                end;
            end;

```

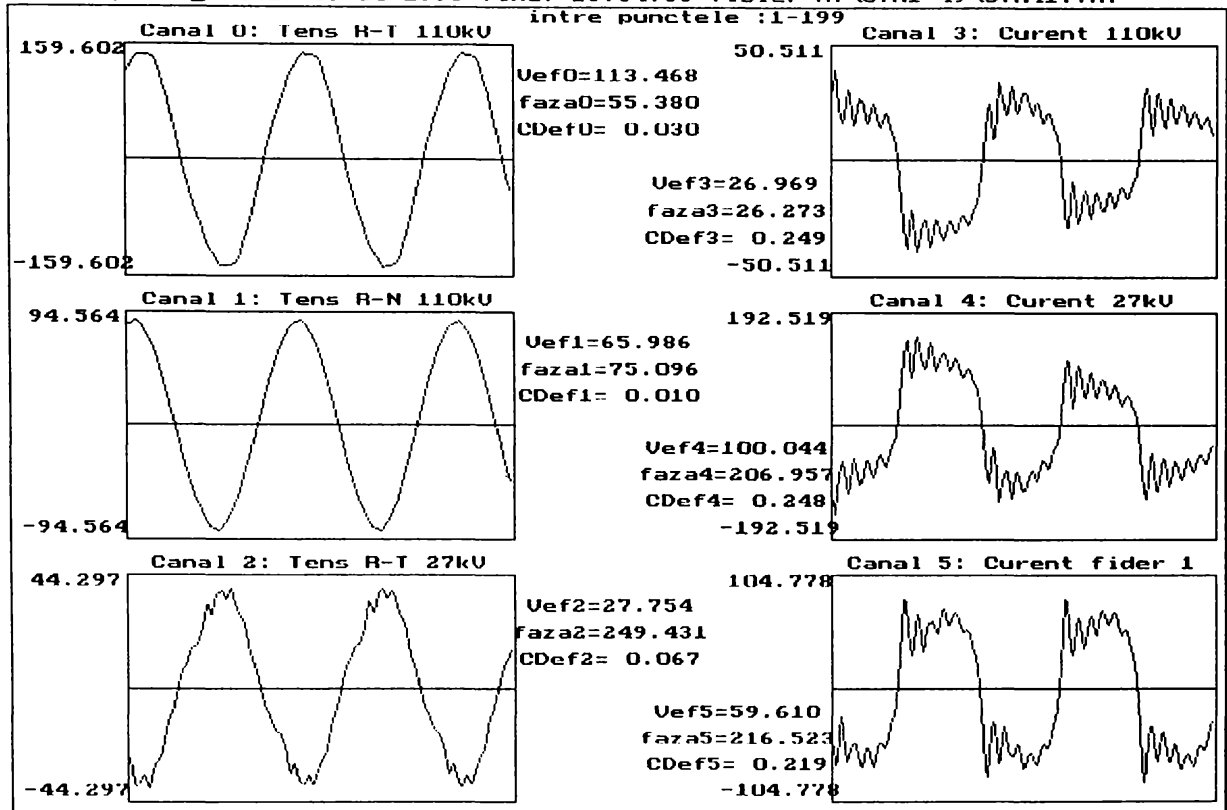
```

    y:=y+(ly+20);
end;
if (i > 3) and (i <= 6) then
begin
    x:=430;
    if i = 4 then
    y:=20;
    begin
        chenarl;
        {SetColor(i);}
        for j:=0 to pu do
            begin
                line(x+fs1*(j+1) div fs2,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+limmin,i]),
                    x+fs1*(j+2) div fs2,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+limmin+1,i]));
            end;
        y:=y+(ly+20);
    end;
end;
if i > 6 then
begin
    SetColor(8);
    MainWindow(comment+' '+data+' '+ora+' fisier '+NumeFisier);
    MoveTo(350,1);
    OutText(' intre punctele :'+Int2Str(limmin)+'-'+Int2Str(limmax));
    chenarl;
    { SetColor(i-6);}
    for j:=0 to pu do
        begin
            line(x+fs1*(j+1) div fs2,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+limmin,i]),
                x+fs1*(j+2) div fs2,round((y+ly/2)-ksc[i]*canal^[j+limmin+1,i]));
        end;
        y:=y+(ly+20);
    end;
i:=i+1;
if i=7 then
begin
    x:=60;
    y:=20;
    readln;
    ClearDevice;
end;
until i > kl+1;
    limmin:=limmax-pas;
    limmax:=limmax+pu-pas;
a:=readkey;
ClearDevice;
end;
end;
closegraph;
end;

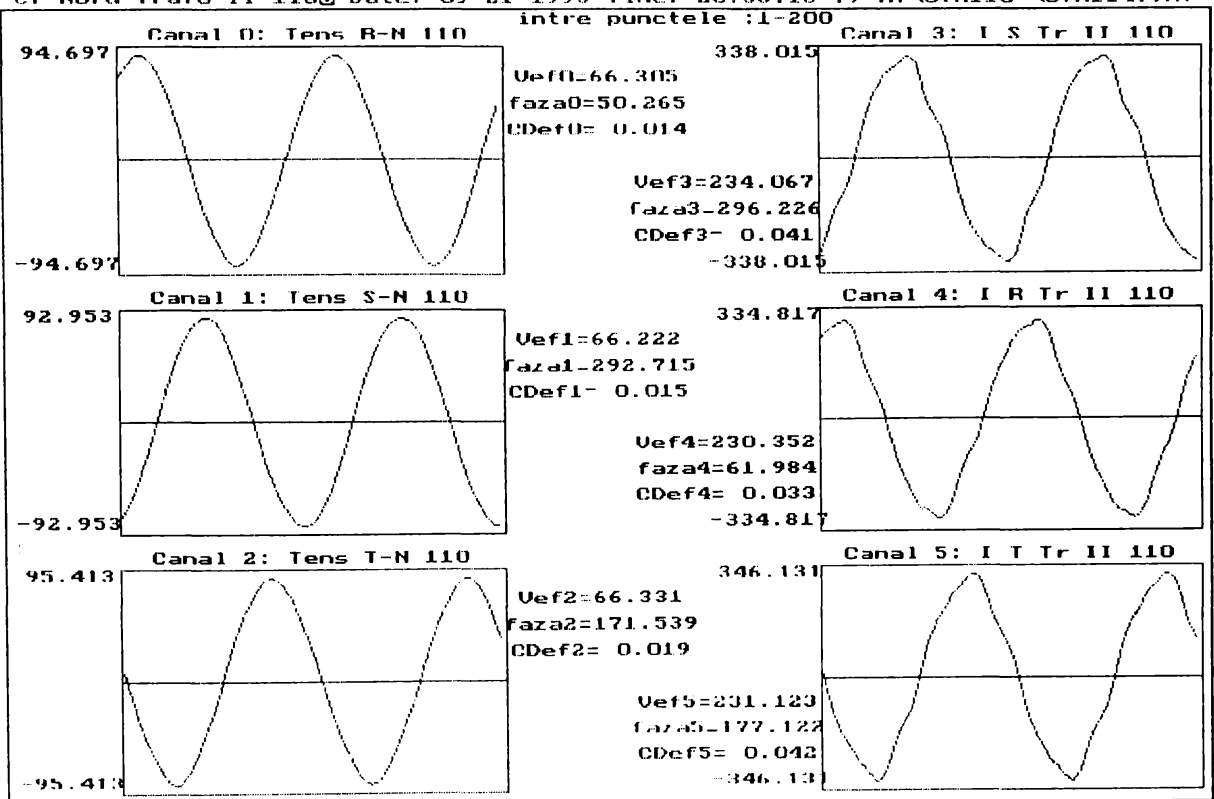
begin
end.

```

palas@ Date: 09-20-1995 Time: 18:54:36 fisier A:\CTA1-49\CTA41.TXT



CT Nord Trafo II 110@ Date: 09 21 1995 Time: 20:36:13 f> A:\CTA110-\CTA114.TXT



A:\CTA1-49\CTA41.TXT

Puterea calculata cu 2: Tens R-T 27kV si 5: Curent fider 1

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	27.59104	55.36847	33.38073	1275.65774	840.52600
2	0.12595	1.67358	43.35494	0.15327	0.14471
3	2.28296	15.06795	-170.97919	-33.97413	-5.39362
4	0.06838	1.45481	-144.64594	-0.08113	-0.05756
5	0.74208	8.52585	-106.71525	-1.81969	-6.05949
6	0.06184	1.75806	-79.88911	0.01909	-0.10703
7	0.43111	5.90393	-94.38855	-0.19476	-2.53780
8	0.05042	1.85866	-96.97168	-0.01137	-0.09302
9	0.26678	4.00783	-88.03311	0.03670	-1.06859
10	0.01883	1.49030	-42.26688	0.02077	-0.01888
11	0.44220	3.83667	-89.81350	0.00552	-1.69655
12	0.10234	1.45601	-133.30228	-0.10220	-0.10844
13	1.39750	8.74588	-101.09666	-2.35238	-11.99389
14	0.22240	2.01799	-111.05600	-0.16124	-0.41883
15	0.41616	3.06590	-132.03841	-0.85438	-0.94760
16	0.07095	1.19124	-132.57940	-0.05719	-0.06224
17	0.27303	2.70349	-116.87525	-0.33367	-0.65841
18	0.07899	0.92498	-110.78393	-0.02592	-0.06831
19	0.36994	1.49597	-29.58625	0.48125	-0.27324
20	0.14074	0.78882	-159.43741	-0.10395	-0.03899
21	0.49627	0.63135	-286.24604	0.08766	0.30081
22	0.10759	0.53969	-154.85839	-0.05257	-0.02467
23	0.26302	0.69946	-278.66040	0.02770	0.18187
24	0.07172	0.25369	132.91603	-0.01239	0.01332
25	0.06869	0.41335	-307.48736	0.01728	0.02253
26	0.04173	0.09309	76.37832	0.00091	0.00378
27	0.01848	0.17071	-26.57137	0.00282	-0.00141
28	0.03993	0.03427	-56.76613	0.00075	-0.00114
29	0.01610	0.19398	-138.15158	-0.00233	-0.00208
30	0.02999	0.08909	-110.17511	-0.00092	-0.00251
31	0.03115	0.17783	-156.18338	-0.00507	-0.00224
32	0.01977	0.08587	-120.68375	-0.00087	-0.00146
33	0.02031	0.05474	133.45657	-0.00076	0.00081
34	0.01938	0.15191	-163.26234	-0.00282	-0.00085
35	0.01639	0.08573	140.19476	-0.00108	0.00090
36	0.01918	0.10245	142.39186	-0.00156	0.00120
37	0.00658	0.23165	-162.20127	-0.00145	-0.00047
38	0.00870	0.17669	140.36578	-0.00118	0.00098
39	0.01327	0.13175	146.08724	-0.00145	0.00098
40	0.01054	0.14156	113.35950	-0.00059	0.00137

Puterea aparenta : S = 1590.5452 kVA
 Puterea activa: P = 1236.3544 kW δ Pk = -39.3033 kW
 Puterea reactiva: Q = 809.5599 kvar δ Qk = -30.9661 kvar
 Puterea deformanta: D = 588.1110 kvad

A:\CTA1-49\CTA41.TXT

Puterea calculata cu 2: Tens R-T 27kV si 4: Curent 27kV

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	27.59104	91.92836	29.85396	2199.81138	1262.59672
2	0.12595	4.25361	65.03646	0.22611	0.48570
3	2.28296	24.36530	-137.56522	-41.05389	-37.53307
4	0.06838	4.34762	-110.12610	-0.10229	-0.27912
5	0.74208	12.28360	-73.97936	2.51569	-8.76134
6	0.06184	3.63693	-37.27967	0.17896	-0.13623
7	0.43111	5.82325	-72.26651	0.76467	-2.39119
8	0.05042	2.25959	-51.55019	0.07084	-0.08922
9	0.26678	3.37549	-95.83445	-0.09154	-0.89586
10	0.01883	1.20162	2.43430	0.02261	0.00096
11	0.44220	4.95648	-102.44532	-0.47234	-2.14024
12	0.10234	3.53492	-95.28916	-0.03335	-0.36022
13	1.39750	14.48611	-88.13089	0.66030	-20.23363
14	0.22240	3.09831	-117.90610	-0.32249	-0.60893
15	0.41616	4.62467	-102.16160	-0.40545	-1.88139
16	0.07095	1.02745	-140.81245	-0.05650	-0.04606
17	0.27303	2.93724	-95.59386	-0.07817	-0.79814
18	0.07899	0.75608	-92.02045	-0.00211	-0.05968
19	0.36994	3.47846	-89.47530	0.01178	-1.28675
20	0.14074	0.92559	-119.70371	-0.06455	-0.11315
21	0.49627	4.20068	-86.89445	0.11294	-2.08161
22	0.10759	1.50789	-154.98571	-0.14702	-0.06860
23	0.26302	2.74849	-98.45536	-0.10630	-0.71505
24	0.07172	1.59815	-143.63763	-0.09230	-0.06796
25	0.06869	1.58681	-102.17220	-0.02298	-0.10655
26	0.04173	1.40078	-144.66062	-0.04768	-0.03381
27	0.01848	1.19030	-124.58106	-0.01249	-0.01811
28	0.03993	1.12993	-155.67139	-0.04111	-0.01859
29	0.01610	0.90018	-168.23733	-0.01419	-0.00296
30	0.02999	0.97770	-159.76494	-0.02751	-0.01014
31	0.03115	0.58108	-175.03161	-0.01803	-0.00157
32	0.01977	0.75910	-173.49849	-0.01491	-0.00170
33	0.02031	0.53356	140.11096	-0.00832	0.00695
34	0.01938	0.56140	157.32437	-0.01004	0.00419
35	0.01639	0.38876	155.60741	-0.00580	0.00263
36	0.01918	0.48692	107.97791	-0.00288	0.00888
37	0.00658	0.55178	-175.19330	-0.00362	-0.00030
38	0.00870	0.62796	122.34062	-0.00292	0.00462
39	0.01327	0.54217	155.55035	-0.00655	0.00298
40	0.01054	0.78050	148.40496	-0.00701	0.00431

Puterea aparenta : S = 2636.9662 kVA
 Puterea activa: P = 2161.1009 kW δ Pk = -38.7104 kW
 Puterea reactiva: Q = 1182.3768 kvar δ Qk = -80.2200 kvar
 Puterea deformanta: D = 940.8605 kvad

A:\CTA1-49\CTA41.TXT

Puterea calculata cu 0: Tens R-T 110kV si 3: Curent 110kV

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	113.33618	24.79251	22.87111	2588.97943	1092.08989
2	0.73349	1.04983	-308.71819	0.48165	0.60081
3	4.97096	6.76248	171.01162	-33.20320	5.25197
4	0.05445	1.12048	-139.33731	-0.04628	-0.03975
5	1.35900	3.39224	-88.08093	0.15438	-4.60749
6	0.04758	0.99501	-79.06145	0.00898	-0.04648
7	0.77757	1.53024	-153.05786	-1.06072	-0.53912
8	0.04361	0.67063	-82.15976	0.00399	-0.02898
9	0.60939	0.82581	-38.49379	0.39387	-0.31323
10	0.06580	0.33787	123.65065	-0.01232	0.01851
11	0.78632	1.28719	-206.68053	-0.90437	0.45447
12	0.02679	0.99864	-91.68975	-0.00079	-0.02674
13	0.57755	3.78984	-223.02598	-1.60013	1.49350
14	0.11542	0.81909	-241.74406	-0.04476	0.08327
15	0.66814	1.17689	-103.45680	-0.18299	-0.76473
16	0.09411	0.23755	-135.19829	-0.01586	-0.01575
17	0.35709	0.70247	-251.77355	-0.07846	0.23826
18	0.04437	0.13922	-237.44771	-0.00332	0.00521
19	0.08971	0.89918	-93.81915	-0.00537	-0.08049
20	0.01390	0.16253	-50.37859	0.00144	-0.00174
21	0.07937	1.10896	-246.49336	-0.03511	0.08071
22	0.00924	0.35835	-6.38285	0.00329	-0.00037
23	0.08217	0.69433	59.84563	0.02866	0.04933
24	0.01226	0.40907	-195.93189	-0.00482	0.00138
25	0.03988	0.42098	-130.34421	-0.01087	-0.01279
26	0.00961	0.37205	8.23541	0.00354	0.00051
27	0.06245	0.26226	-133.80715	-0.01134	-0.01182
28	0.02381	0.29058	87.91026	0.00025	0.00691
29	0.05093	0.20977	10.57481	0.01050	0.00196
30	0.01444	0.24857	-222.17870	-0.00266	0.00241
31	0.03453	0.14080	-171.21321	-0.00480	-0.00074
32	0.00838	0.18039	62.76617	0.00069	0.00134
33	0.06280	0.08366	110.81455	-0.00187	0.00491
34	0.03924	0.11382	-144.52766	-0.00364	-0.00259
35	0.04334	0.07366	-139.91067	-0.00244	-0.00206
36	0.02372	0.13145	-4.81806	0.00311	-0.00026
37	0.01172	0.11936	-250.13339	-0.00048	0.00132
38	0.02084	0.14831	-46.69491	0.00212	-0.00225
39	0.01114	0.13498	-129.05255	-0.00095	-0.00117
40	0.03158	0.19593	-280.30549	0.00111	0.00609

Puterea aparenta : S = 2855.4546 kVA
 Puterea activa: P = 2552.8395 kW δ Pk = -36.1399 kW
 Puterea reactiva: Q = 1093.8942 kvar δ Qk = 1.8043 kvar
 Puterea deformanta: D = 663.3453 kvad

Probleme tipice pentru rețelele trifazate dezechilibrate

Dezechilibrele din rețelele electrice trifazate funcționând în regim sinusoidal se datorează în primul rând consumatorilor. Consumatorul complex, care are în componența sa receptoare de toate tipurile, inclusiv monofazate, nu poate fi perfect echilibrat.

Reducând un sistem electroenergetic la structura sa minimală, sursă-consumator, dezechilibrele se pot analiza în unul dintre următoarele montaje posibile :

- 1° - stea-stea cu conductor neutru ;
- 2° - triunghi-triunghi fără conductor neutru ;
- 3° - stea-stea fără conductor neutru ;
- 4° - stea-triunghi fără conductor neutru ;
- 5° - triunghi-stea fără conductor neutru.

Cazurile 2°, 4°, 5° se pot reduce la cazul 3° (fig. A1.1), folosind relațiile de transformare a unui triunghi de impedanțe (sau admitanțe) la o schemă echivalentă în conexiune stea (ANEXA 4).

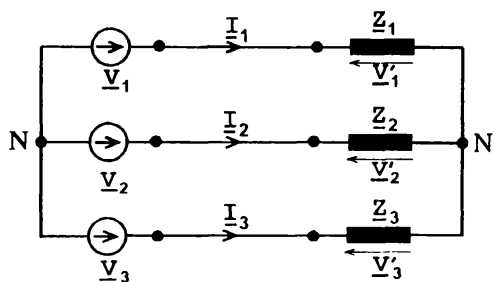


Fig. A1.1. Sistem simplu : generator-consumator, în montaj stea-stea fără conductor neutru.

În cazul N neutrul generatorului având \underline{V}_N valoarea complexă a potențialului său în raport cu o referință arbitrar aleasă și N' neutrul receptorului, având $\underline{V}_{N'}$ valoarea complexă a potențialului său, în raport cu aceeași referință. Absența conductorului neutru face ca în general $\underline{V}_N - \underline{V}_{N'} \neq 0$, diferență care poate fi numită "tensiune de dezechilibru". Calculul acesteia, a celorlalte tensiuni (înlănțuite, simple) și a curenților într-o astfel de rețea se poate face în mai multe moduri, folosind teoremele lui Millman, Thévenin, Kennelly.

În această anexă se prezintă însă câteva probleme tipice pentru rețelele electrice trifazate dezechilibrate, în montaj fără conductor neutru, pentru rezolvarea cărora se folosește metoda componentelor simetrice.

Se consideră deci sistemul din figura A1.1. în care sursa are putere infinită (impedanța internă nulă) tensiunile înlănțuite la bornele sale constituind un sistem simetric echilibrat (în planul fazorilor, un triunghi echilateral).

Se cere să se stabilească relația de legătură între elementele schemei echivalente a consumatorului, Z_1, Z_2, Z_3 astfel încât :

① Curenții absorbiți de consumator să se constituie într-un sistem simetric de succesiune directă.

Există soluția evidentă a receptorului simetric, dar aceasta nu este singura : un receptor nesimetric poate de asemenea să absoarbă curenți care formează un sistem echilibrat de fazori.

Curenții vor fi echilibrați dacă $I_i = 0$.

$$\text{Datorită absenței conductorului neutru : } \underline{I}_h = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) = 0 \quad (\text{A1.1})$$

Pentru un sistem dezechilibrat de tensiuni $\underline{V}'_1, \underline{V}'_2, \underline{V}'_3$, căruia îi corespunde un sistem simetric de tensiuni de linie :

$$\begin{aligned} \underline{V}'_d &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{V}'_1 + a \cdot \underline{V}'_2 + a^2 \cdot \underline{V}'_3) = \underline{V}_d \\ \underline{V}'_i &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{V}'_1 + a^2 \cdot \underline{V}'_2 + a \cdot \underline{V}'_3) = 0 \\ \underline{V}'_h &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{V}'_1 + \underline{V}'_2 + \underline{V}'_3) = \underline{V}_N - \underline{V}_{N'} \end{aligned} \quad (\text{A1.2})$$

Curenții de fază, scriși cu ajutorul componentelor simetrice sunt :

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_h + a^2 \cdot \underline{I}_d + a \cdot \underline{I}_i \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_h + a \cdot \underline{I}_d + a^2 \cdot \underline{I}_i \end{aligned} \quad (\text{A1.3})$$

Se poate scrie deci :

$$\begin{aligned} \underline{V}'_1 &= \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 = \underline{Z}_1 \cdot (\underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i) \\ \underline{V}'_2 &= \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 = \underline{Z}_2 \cdot (\underline{I}_h + a^2 \cdot \underline{I}_d + a \cdot \underline{I}_i) \\ \underline{V}'_3 &= \underline{Z}_3 \cdot \underline{I}_3 = \underline{Z}_3 \cdot (\underline{I}_h + a \cdot \underline{I}_d + a^2 \cdot \underline{I}_i) \end{aligned} \quad (\text{A1.4})$$

Ținând cont de condițiile inițiale : $\underline{I}_i = 0$, $\underline{I}_h = 0$, pentru \underline{V}'_i se obține :

$$\underline{V}'_i = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_d \cdot (\underline{Z}_1 + a^4 \cdot \underline{Z}_2 + a^2 \cdot \underline{Z}_3) = 0 \quad (\text{A1.5})$$

și cum $\underline{I}_d \neq 0$ rezultă :

$$\underline{Z}_1 + a \cdot \underline{Z}_2 + a^2 \cdot \underline{Z}_3 = 0 \quad (\text{A1.6})$$

Când această condiție este realizată (conduce la o dublă infinitate de soluții), există echilibrul curenților și al tensiunilor înlănțuite, dar dezechilibrul tensiunilor simple (tensiunile fazelor față de N').

② Curenții absorbiți de consumator să se constituie într-un sistem simetric de succesiune inversă.

În relațiile (A1.4) se pune condiția : $\underline{I}_h = 0$ și $\underline{I}_d = 0$

Deci :

$$\underline{V}'_i = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_i \cdot (\underline{Z}_1 + a^3 \cdot \underline{Z}_2 + a^3 \cdot \underline{Z}_3) = 0 \quad (\text{A1.7})$$

Adică :

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = 0 \quad (\Lambda 1.8)$$

ceea ce este însă irealizabil.

③ **Sistemul tensiunilor fazelor față de neutrul receptorului formează un sistem trifazat simetric de fazori.**

Ceea ce înseamnă :

$$\begin{aligned} \underline{V}'_i &= 0, \\ \underline{V}'_h &= \underline{V}_N - \underline{V}_{N'} = 0, & \text{și} & \quad \underline{U}_2 = a^2 \cdot \underline{U}_1 \\ \underline{V}'_d &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{V}'_1 + a \cdot \underline{V}'_2 + a^2 \cdot \underline{V}'_3) = 0 & \quad \underline{U}_3 &= a \cdot \underline{U}_1 \end{aligned} \quad (\Lambda 1.9)$$

Componenta homopolară a curenților rămâne de asemenea nulă :

$$\underline{I}'_h = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_1 + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_2 + \underline{U}_3 \cdot \underline{Y}_3) = \frac{1}{3} \cdot \underline{U}_1 \cdot (\underline{Y}_1 + a^2 \cdot \underline{Y}_2 + a \cdot \underline{Y}_3) = 0$$

Cum $\underline{U}_1 \neq 0$ rezultă :

$$\underline{Y}_1 + a^2 \cdot \underline{Y}_2 + a \cdot \underline{Y}_3 = 0 \quad (\Lambda 1.10)$$

în care : $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}$, $\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}$, $\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3}$

Când condiția ($\Lambda 1.10$) este îndeplinită (există o dublă înfinitate de soluții), tensiunile simple și cele compuse (înlănțuite) sunt echilibrate dar curenții pe fazele rețelei sunt dezechilibrați.

Relații particulare pentru calculul trecerii schemei echivalente a unei sarcini din conexiune Δ în conexiune Y și invers

Sunt cunoscute relațiile generale de trecere între elementele unei scheme de impedanțe (admitanțe) în conexiune Δ la o schemă echivalentă în conexiune Y ([36], [99]). Astfel :

- pentru transformarea triunghiului în stea :

$$\underline{Z}_R = \frac{\underline{Z}_{RS} \cdot \underline{Z}_{TR}}{\underline{Z}_{RS} + \underline{Z}_{ST} + \underline{Z}_{TR}} \quad \text{etc.} \quad (\Lambda 4.1)$$

- și pentru transformarea stelei în triunghi :

$$\underline{Y}_{RS} = \frac{\underline{Y}_R \cdot \underline{Y}_S}{\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T} \quad \text{etc.} \quad (\Lambda 4.2)$$

În cadrul acestei anexe de calcul, ne propunem să stabilim relațiile pentru aceleași transformări într-un caz particular și anume acela în care atât tensiunile de fază cât și cele de linie se constituie în sisteme trifazate simetrice (fig. Λ4.1.)

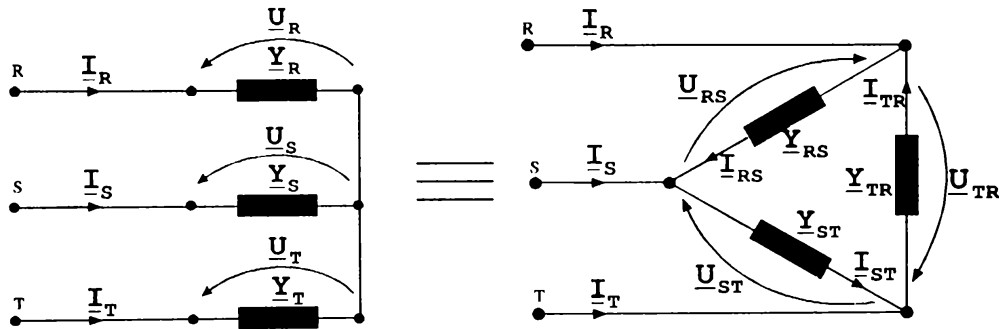


Fig. Λ4.1 Schemele în Y și Δ ale unei sarcini, în reprezentare sub formă de admitanțe

Pentru cele 2 scheme considerate echivalente se pot scrie următoarele relații ([100]):

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \underline{U}_R \cdot \underline{Y}_R & \underline{U}_R &= U_R = U \quad (- \text{ tensiunea } \underline{U}_R \text{ plasată în axa reală}) \\ \underline{I}_S &= \underline{U}_S \cdot \underline{Y}_S & \underline{U}_S &= a^2 \cdot \underline{U}_R = a^2 \cdot U = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot U \end{aligned} \quad (\Lambda 4.3) \quad (\Lambda 4.4)$$

$$\underline{I}_T = \underline{U}_T \cdot \underline{Y}_T \quad \underline{U}_T = a \cdot \underline{U}_R = a \cdot U = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot U$$

$$\underline{I}_{RS} = \underline{U}_{RS} \cdot \underline{Y}_{RS} \quad \underline{U}_{RS} = \underline{U}_R - \underline{U}_S = U \cdot (1 - a^2) = \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot U$$

$$\underline{I}_{ST} = \underline{U}_{ST} \cdot \underline{Y}_{ST} \quad \underline{U}_{ST} = \underline{U}_S - \underline{U}_T = U \cdot (a^2 - a) = -j\sqrt{3} \cdot U \quad (\Lambda 4.5) \quad (\Lambda 4.6)$$

$$\underline{I}_{TR} = \underline{U}_{TR} \cdot \underline{Y}_{TR} \quad \underline{U}_{TR} = \underline{U}_T - \underline{U}_R = U \cdot (a - 1) = \left(-\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot U$$

$$\begin{aligned}
\underline{L}_R &= \underline{L}_{RS} - \underline{L}_{TR} \\
\underline{L}_S &= \underline{L}_{ST} - \underline{L}_{RS} \\
\underline{L}_T &= \underline{L}_{TR} - \underline{L}_{ST}
\end{aligned}
\tag{A4.7}$$

Înlocuind în partea stângă a ecuațiilor (A4.7) cu relațiile (A4.4) și în partea dreaptă cu relațiile (A4.6) și apoi egalând părțile reale respectiv părțile imaginare, se obțin următoarele ecuații :

$$\begin{cases}
G_R = \frac{3}{2} \cdot G_{RS} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS} + \frac{3}{2} \cdot G_{TR} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \\
B_R = \frac{3}{2} \cdot B_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS} + \frac{3}{2} \cdot B_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} \\
\frac{1}{2} \cdot G_S + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_S = \sqrt{3} \cdot B_{ST} + \frac{3}{2} \cdot G_{RS} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS} \\
\frac{1}{2} \cdot B_S - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_S = -\sqrt{3} \cdot G_{ST} + \frac{3}{2} \cdot B_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS} \\
-\frac{1}{2} \cdot G_T + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_T = -\frac{3}{2} \cdot G_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} + \sqrt{3} \cdot B_{ST} \\
\frac{1}{2} \cdot B_T + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_T = \frac{3}{2} \cdot B_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} + \sqrt{3} \cdot G_{ST}
\end{cases}
\tag{A4.8}$$

Sau, făcând substituții între ecuațiile a 3-a și a 4-a, respectiv a 5-a și a 6-a se obține :

$$\begin{cases}
G_R = \frac{3}{2} \cdot G_{RS} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS} + \frac{3}{2} \cdot G_{TR} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \\
B_R = \frac{3}{2} \cdot B_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS} + \frac{3}{2} \cdot B_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} \\
G_S = \frac{3}{2} \cdot G_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{RS} + \frac{3}{2} \cdot G_{ST} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{ST} \\
B_S = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{RS} + \frac{3}{2} \cdot B_{RS} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{ST} + \frac{3}{2} \cdot B_{ST} \\
G_T = \frac{3}{2} \cdot G_{ST} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{ST} + \frac{3}{2} \cdot G_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \\
B_T = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{ST} + \frac{3}{2} \cdot B_{ST} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} + \frac{3}{2} \cdot B_{TR}
\end{cases}
\tag{A4.9}$$

Sistemul (A4.9) permite deci determinarea imediată a parametrilor schemei echivalente în Y, atunci când se cunosc cei din schema echivalentă în Δ . Pe baza aceluiași sistem se pot determina relațiile pentru trecerea inversă. De data aceasta se vor cunoaște $G_{R,S,T}$ și $B_{R,S,T}$, iar necunoscutele vor fi $G_{RS,ST,TR}$, $B_{RS,ST,TR}$.

Avem de-a face deci cu un sistem de 6 ecuații cu 6 necunoscute :

$$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{RS} \\ B_{RS} \\ G_{ST} \\ B_{ST} \\ G_{TR} \\ B_{TR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_R \\ B_R \\ G_S \\ B_S \\ G_T \\ B_T \end{bmatrix} \quad (\Lambda 4.10)$$

Acest sistem are însă o infinitate de soluții.

Într-adevăr, calculând determinantul principal asociat coeficienților necunoscutelor, constatăm că este nul. Ceea ce înseamnă că nu toate relațiile sunt independente, o parte fiind consecința celorlalte. O combinație a lor (adunând 1, 3, 5 respectiv 2, 4, 6) permite însă obținerea altor două, mai simple și mai semnificative :

$$\begin{aligned} G_{RS} + G_{ST} + G_{TR} &= \frac{1}{3} \cdot (G_R + G_S + G_T) \\ B_{RS} + B_{ST} + B_{TR} &= \frac{1}{3} \cdot (B_R + B_S + B_T) \end{aligned} \quad (\Lambda 4.11)$$

relații care corespund de altfel și condiției ca schema echivalentă în Δ să conducă la aceleași puteri active respectiv reactive totale absorbite din rețea.

$$\begin{aligned} P_Y &= U_R^2 \cdot G_R + U_S^2 \cdot G_S + U_T^2 \cdot G_T = U_f^2 \cdot (G_R + G_S + G_T) = U_f^2 \cdot \frac{1}{3} \cdot (G_R + G_S + G_T) \\ P_A &= U_{RS}^2 \cdot G_{RS} + U_{ST}^2 \cdot G_{ST} + U_{TR}^2 \cdot G_{TR} = U_f^2 \cdot (G_{RS} + G_{ST} + G_{TR}) \\ P_Y = P_A \quad \text{deci :} \quad G_{RS} + G_{ST} + G_{TR} &= \frac{1}{3} \cdot (G_R + G_S + G_T) \end{aligned}$$

Analog, egalând puterile reactive, se obține :

$$B_{RS} + B_{ST} + B_{TR} = \frac{1}{3} \cdot (B_R + B_S + B_T)$$

$$\text{Deci :} \quad \underline{Y}_{RS} + \underline{Y}_{ST} + \underline{Y}_{TR} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T) \quad (\Lambda 4.12)$$

Relațiile ($\Lambda 4.11$) nu sunt independente de ($\Lambda 4.10$), dar pot constitui o metodă de verificare rapidă.

Urmând procedura de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare, constatăm că sistemul ($\Lambda 4.10$) are doar 4 necunoscute principale $\Delta_4 \neq 0$. Deci doar 4 ecuații independente. Pentru a găsi o soluție unică a sistemului mai este nevoie de încă 2 relații independente de legătură între elementele active și reactive ale admitanțelor din schema echivalentă în Δ . Având în vedere că în final se dorește o compensare a dezechilibrelor cu ajutorul unei instalații ale cărei elemente se dimensionează în funcție de elementele echivalente ale sarcinii, se va pune suplimentar condiția minimizării puterii aparente instalate în elementele echivalente ale schemei în Δ .

$$S_{inst}^2 = P_{inst}^2 + Q_{inst}^2 = (\sqrt{3} \cdot U)^4 \cdot (G_{RS}^2 + G_{ST}^2 + G_{TR}^2 + B_{RS}^2 + B_{ST}^2 + B_{TR}^2) = \min$$

$$\text{Deci : } G_{RS}^2 + G_{ST}^2 + G_{TR}^2 + B_{RS}^2 + B_{ST}^2 + B_{TR}^2 = \min \quad (\Lambda 4.13)$$

Modul de rezolvare este următorul :

- se stabilesc în mod arbitrar necunoscutele principale ale sistemului A4.10 și ecuațiile aferente se exprimă în funcție de necunoscutele neprincipale.

Să alegem deci ca necunoscute principale G_{RS} , G_{ST} , B_{RS} și B_{ST} .

Din primele 4 ecuații ale sistemului (A4.10) rezultă :

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -\sqrt{3} & 0 & 0 \\ \sqrt{3} & -1 & \sqrt{3} & 1 \\ -1 & -\sqrt{3} & 1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{RS} \\ B_{RS} \\ G_{ST} \\ B_{ST} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot G_R - \sqrt{3} \cdot G_{TR} + B_{TR} \\ -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot B_R + G_{TR} + \sqrt{3} \cdot B_{TR} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot G_S \\ -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot B_S \end{bmatrix} \quad (\Lambda 4.14)$$

Se obțin :

$$\begin{aligned} B_{RS} &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot G_R + \frac{1}{2} \cdot B_R - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} - \frac{1}{2} \cdot B_{TR} \\ G_{RS} &= \frac{1}{2} \cdot G_R - \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot B_R - \frac{1}{2} \cdot G_{TR} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \\ G_{ST} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot B_R + \frac{1}{2} \cdot G_S - \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot B_S - \frac{1}{2} \cdot G_{TR} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{TR} \\ B_{ST} &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot G_R + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot G_S + \frac{1}{2} \cdot B_S + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_{TR} - \frac{1}{2} \cdot B_{TR} \end{aligned} \quad (\Lambda 4.15)$$

Acestea se înlocuiesc în relația (A4.13) și apoi punând condițiile :

$$\frac{\partial(S_{inst}^2)}{\partial G_{TR}} = 0 \quad \text{respectiv} \quad \frac{\partial(S_{inst}^2)}{\partial B_{TR}} = 0 \quad (\Lambda 4.16)$$

se obțin :

$$\begin{aligned} G_{TR} &= \frac{1}{3} \cdot G_R + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot B_R - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot B_S \\ B_{TR} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot G_R + \frac{1}{3} \cdot B_R + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot G_S \end{aligned} \quad (\Lambda 4.17)$$

Înlocuind în continuare expresiile (A4.17) în sistemul (A4.14), se obțin și celelalte patru necunoscute:

$$\begin{aligned} B_{RS} &= \frac{1}{6\sqrt{3}} \cdot G_R - \frac{1}{6\sqrt{3}} \cdot G_S + \frac{1}{6} \cdot B_R + \frac{1}{6} \cdot B_S \\ G_{RS} &= \frac{1}{6} \cdot G_R - \frac{1}{6\sqrt{3}} \cdot B_R + \frac{1}{6} \cdot G_S + \frac{1}{6\sqrt{3}} \cdot B_S \end{aligned}$$

$$B_{ST} = -\frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot G_R + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot G_S + \frac{1}{3} \cdot B_S \quad (\text{A4.18})$$

$$G_{ST} = \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot B_R + \frac{1}{3} \cdot G_S - \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot B_S$$

Făcând verificarea, obținem :

$$G_{RS} + G_{ST} + G_{TR} = \frac{1}{2} \cdot G_R + \frac{1}{2} \cdot G_S + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot B_R - \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot B_S = \frac{1}{3} \cdot (G_R + G_S + G_T)$$

$$B_{RS} + B_{ST} + B_{TR} = -\frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot G_R - \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot G_S + \frac{1}{2} \cdot B_R + \frac{1}{2} \cdot B_S = \frac{1}{3} \cdot (B_R + B_S + B_T)$$

(dacă se iau în considerare și relațiile obținute în ANEXA 5).

Utilizarea practică a relațiilor (A4.17) și (A4.18)

De fapt aceste relații ne permit determinarea schemei echivalente în Δ a unei sarcini alimentate dintr-o rețea trifazată fără conductor neutru care va fi apoi utilizată la determinarea parametrilor schemei de compensare. În aceste rețele de obicei nu există neutru fizic și ceea ce se poate măsura constă în curenții pe conductoarele de fază și tensiunile dintre faze. Deci nu se pot determina imediat nici admitanțele pentru schema echivalentă în Y, nici pentru schema echivalentă în Δ .

În această situație, presupunând sistemul tensiunilor de linie simetric și echilibrat se pot determina parametrii echivalenței ai schemei în Y acceptând un sistem de tensiuni de fază echilibrat, construit cu ajutorul tensiunilor de linie (fig. A4.2.).

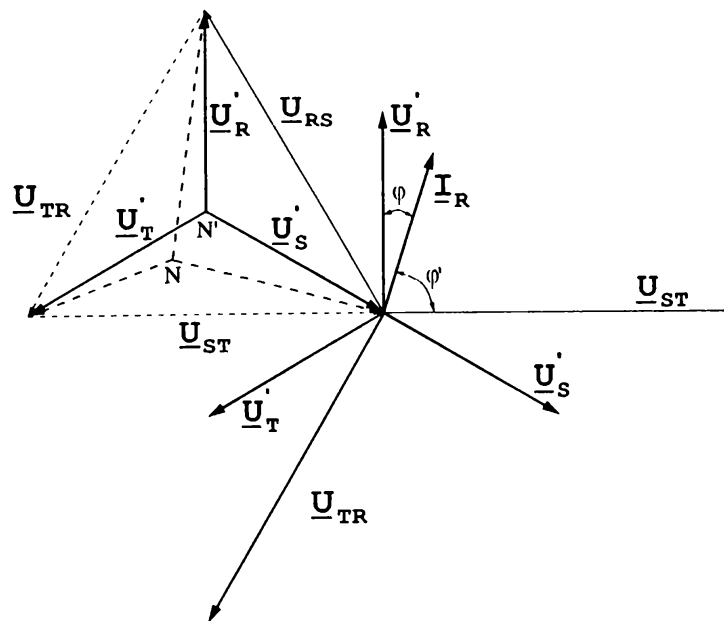


Fig. A4.2 Fazorii sistemelor trifazate de tensiuni și curenți.

Din tensiunile de linie se construiește imediat sistemul fictiv al tensiunilor de fază $\underline{U}'_R, \underline{U}'_S, \underline{U}'_T$:

$$\underline{U}'_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \underline{U}_{ST} \quad \underline{U}'_S = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \underline{U}_{TR} \quad \underline{U}'_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \underline{U}_{RS} \quad (\text{A4.19})$$

Se măsoară defazațele între I_R și \underline{U}_{ST} , I_S și \underline{U}_{TR} respectiv I_T și \underline{U}_{RS} , φ'_R, φ'_S respectiv φ'_T cu care se determină apoi unghiul de defazaj între curentul și tensiunea fiecărei faze : $\varphi_R = 90^\circ - \varphi'_R$ etc.

Se determină componentele active și reactive ale schemei echivalente fictive în Y.

$$\begin{aligned} \underline{Y}_R &= G_R - jB_R = \frac{I_R}{\underline{U}_R} = \frac{I_R \cdot \cos\varphi_R}{U_R} - j \frac{I_R \cdot \sin\varphi_R}{U_R} \\ G_R &= \frac{I_R \cdot \cos\varphi_R}{U_R} = \frac{P_R}{U_R^2} \\ B_R &= \frac{I_R \cdot \sin\varphi_R}{U_R} = \frac{Q_R}{U_R^2} \end{aligned} \quad (\text{A4.20})$$

$B_R > 0$ $\varphi_R > 0$, I caracter inductiv

$B_R < 0$ $\varphi_R < 0$, I caracter capacitiv

În mod similar se procedează pentru celelalte faze.

Se pot folosi apoi relațiile (A4.17) și (A4.18) pentru calculul elementelor componente ale schemei echivalente în Δ . Același procedeu este aplicabil și în cazul în care tensiunile de fază se pot măsura. Dacă ele se constituie într-un sistem simetric și echilibrat se pot calcula imediat admitanțele pe fază, iar dacă nu, acestea se vor determina folosind un sistem echilibrat fictiv, ca mai sus (valabil bineînțeles în ipoteza în care sursa furnizează un sistem simetric și echilibrat de tensiuni înlănțuite).

Relații între elementele componente ale schemei echivalente în Y a unei sarcini trifazate într-o rețea fără conductor neutru.

Considerând schema echivalentă în Y a unei sarcini trifazate alimentate dintr-o rețea fără conductor neutru (fig. A4.1.), între cei 3 curenți de fază există relația: $\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0$ (componenta de secvență homopolară a curentului este nulă), relație care se mai poate scrie și sub forma :

$$\underline{U}_R \cdot \underline{Y}_R + \underline{U}_S \cdot \underline{Y}_S + \underline{U}_T \cdot \underline{Y}_T = 0 \quad (\text{A5.1})$$

Dacă cele trei tensiuni de fază se constituie însă într-un sistem simetric și echilibrat, punând \underline{U}_R în axa reală rezultă : $\underline{U}_R = U_R = U$, $\underline{U}_S = a^2 \cdot U$, $\underline{U}_T = a \cdot U$ și din relația (A5.1) se obține condiția :

$$\underline{Y}_R + a^2 \cdot \underline{Y}_S + a \cdot \underline{Y}_T = 0 \quad (\text{A5.2})$$

Această relație conduce la concluzia că, în condițiile precizate, între elementele componente ale celor 3 admitanțe există niște relații de dependență. Într-adevăr, evidențiind conductanțele și susceptanțele, descompunând și egalând cu zero părțile reală respectiv imaginară ale expresiei ce se formează în partea stângă a relației (A5.2) și făcând apoi operații simple de substituție se obțin :

$$\begin{aligned} G_T &= \frac{1}{2} \cdot [G_R + G_S + \sqrt{3} \cdot (B_R - B_S)] \\ B_T &= \frac{1}{2} \cdot [B_R + B_S + \sqrt{3} \cdot (G_S - G_R)] \end{aligned} \quad (\text{A5.3})$$

sau analog :

$$\begin{aligned} G_R &= \frac{1}{2} [G_S + G_T + \sqrt{3} (B_S - B_T)] \\ B_R &= \frac{1}{2} [B_S + B_T + \sqrt{3} (G_T - G_S)] \end{aligned} \quad (\text{A5.4})$$

respectiv :

$$\begin{aligned} G_S &= \frac{1}{2} [G_R + G_T + \sqrt{3} (B_T - B_R)] \\ B_S &= \frac{1}{2} [B_R + B_T + \sqrt{3} (G_R - G_T)] \end{aligned} \quad (\text{A5.5})$$

Cu relațiile (A5.3) se pot obține noi relații de interes pentru transformare Y-Δ (ANEXA 4) și anume:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} (G_R + G_S + G_T) &= \frac{1}{2} \left[G_R + G_S + \frac{1}{\sqrt{3}} (B_R - B_S) \right] \\ \frac{1}{3} (B_R + B_S + B_T) &= \frac{1}{2} \left[B_R + B_S + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_S - G_R) \right] \end{aligned} \quad (\text{A5.6})$$

Relațiile între elementele componente ale schemei echivalente în Y se pot ușor transforma în relații între componentele active și reactive ale curenților de sarcină, folosind relațiile :

$$I_{f a} = U_f \cdot G_f \quad , \quad I_{f r} = U_f \cdot B_f \quad \text{în care } f = R, S, T \quad (\text{A5.7})$$

Rezultă :

$$2I_{Ra} = I_{Sa} + I_{Ta} + \sqrt{3}(I_{Sr} - I_{Tr})$$

$$2I_{Sa} = I_{Ra} + I_{Ta} + \sqrt{3}(I_{Tr} - I_{Rr})$$

$$2I_{Ta} = I_{Ra} + I_{Sa} + \sqrt{3}(I_{Rr} - I_{Sr})$$

$$2I_{Rr} = I_{Sr} + I_{Tr} - \sqrt{3}(I_{Sa} - I_{Ta})$$

$$2I_{Sr} = I_{Rr} + I_{Tr} - \sqrt{3}(I_{Ta} - I_{Ra})$$

$$2I_{Tr} = I_{Rr} + I_{Sr} - \sqrt{3}(I_{Ra} - I_{Sa})$$

Expresiile în componente simetrice ale curenților pe fazele unor receptoare electrice trifazate

Expresiile deduse în această anexă sunt utilizate în modelele matematice aferente compensării puterii reactive în rețelele electrice dezechilibrate cu trei respectiv patru conductoare. La construirea acestora, sarcinile au fost modelate prin scheme echivalente în conexiune Δ respectiv Y iar compensatoarele folosite au schemele de conexiuni de asemenea Δ și Y . Din acest motiv au fost necesare expresiile în componente simetrice ale curenților pe fazele receptorilor având aceste tipuri de conexiuni.

1. Cazul receptorului trifazat în conexiune Y_0 (Y)

Se consideră mai întâi cazul receptorului trifazat oarecare (dezechilibrat) în conexiune Y_0 (fig. A6.1). Ipotezele în care se deduc expresiile pentru curenții pe fazele acestui receptor sunt:

- rețeaua electrică trifazată cu patru conductoare la care este conectat receptorul are tensiunile de linie și de fază constituite în sisteme echilibrate;
- se neglijează impedanța conductorului neutru și ale celorlalte conexiuni.

Admitanțele echivalente pe fază se scriu conform convenției:

$$\underline{Y}_f^Y = G_f^Y - jB_f^Y \quad f = R, S, T \quad (\text{A6.1})$$

în care susceptanța B_f^Y este considerată inductivă dacă este pozitivă, respectiv capacitivă dacă este negativă.

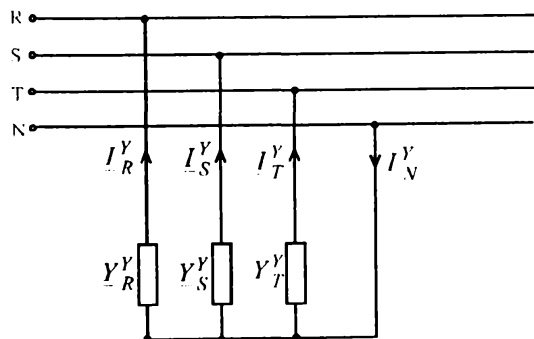


Fig. A6.1, Receptor trifazat în conexiune Y_0

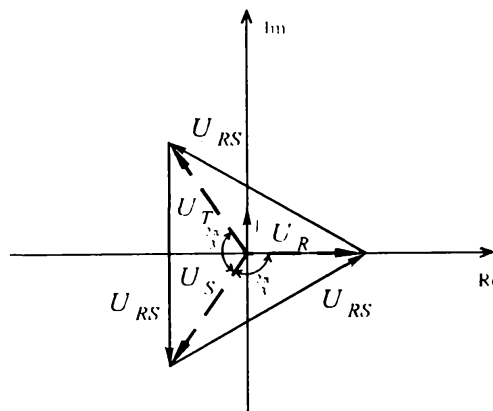


Fig. A6.2, Convenția de raportare a fazorilor

De asemenea se va folosi convenția cunoscută de stabilire a referinței pentru fazorii care apar în calculul electric și anume : tensiunea fazei R se poziționează (în planul complex real-imaginar) în axa reală, sensul pozitiv (fig. A6.2). Cele trei tensiuni de fază vor fi scrise deci în sistemul de axe real-imaginar sub forma:

$$\begin{aligned}
\underline{U}_R &= U_R = U \\
\underline{U}_S &= a^2 U_S = a^2 U \\
\underline{U}_T &= a U_T = a U
\end{aligned} \tag{A6.2}$$

în care operatorul a are forma cunoscută:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad a = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad a^3 = 1 \quad a^4 = a^2 \tag{A6.3}$$

Curenții pe fazele receptorului sunt:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^Y &= \underline{U}_R \cdot \underline{Y}_R^Y = U(G_R^Y - jB_R^Y) = I_{Ra} - jI_{Rr} \\
\underline{I}_S^Y &= \underline{U}_S \cdot \underline{Y}_S^Y = a^2 U(G_S^Y - jB_S^Y) = a^2(I_{Sa} - jI_{Sr}) \\
\underline{I}_T^Y &= \underline{U}_T \cdot \underline{Y}_T^Y = a U(G_T^Y - jB_T^Y) = a(I_{Ta} - jI_{Tr})
\end{aligned} \tag{A6.4}$$

Componentele reactive ale curenților pe faze I_{fr} sunt deci pozitive pentru caracter inductiv respectiv negative pentru caracter capacitiv (un rezultat al aplicării convenției susceptanțelor).

Utilizând acum relațiile cunoscute între componentele de secvență și curenții de fază cărora le corespund, adică:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_d^Y &= \frac{1}{3}(\underline{I}_R^Y + a \cdot \underline{I}_S^Y + a^2 \cdot \underline{I}_T^Y) \\
\underline{I}_i^Y &= \frac{1}{3}(\underline{I}_R^Y + a^2 \cdot \underline{I}_S^Y + a \cdot \underline{I}_T^Y) \\
\underline{I}_h^Y &= \frac{1}{3}(\underline{I}_R^Y + \underline{I}_S^Y + \underline{I}_T^Y)
\end{aligned} \tag{A6.5}$$

se obțin:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_d^Y &= \frac{1}{3}[I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta} - j(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})] \\
\underline{I}_i^Y &= \frac{1}{6}\{2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + \sqrt{3}(I_{Sr} - I_{Tr}) + j[\sqrt{3}(I_{Sa} - I_{Ta}) - 2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}]\} \\
\underline{I}_h^Y &= \frac{1}{6}\{2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + \sqrt{3}(I_{Tr} - I_{Sr}) + j[\sqrt{3}(I_{Ta} - I_{Sa}) - 2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}]\}
\end{aligned} \tag{A6.6}$$

Dacă schema echivalentă Y_0 ar conține numai elemente active (cazul unei sarcini particulare de pildă), formând curenții:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_d^Y &= I_{Ra} \\
\underline{I}_i^Y &= a^2 I_{Sa} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_{Sa} \\
\underline{I}_h^Y &= a I_{Ta} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_{Ta}
\end{aligned} \tag{A6.7}$$

relațiile (A6.6) devin:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_d^Y &= \frac{1}{3}(I_{Ra} + I_{Sa} + I_{Ta}) \\
\underline{I}_i^Y &= \frac{1}{6}[2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + j\sqrt{3}(I_{Sr} - I_{Tr})] \\
\underline{I}_h^Y &= \frac{1}{6}[2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} + j\sqrt{3}(I_{Ta} - I_{Sa})]
\end{aligned} \tag{A6.8}$$

Iar dacă schema echivalentă Y_0 ar conține numai elemente reactive (cazul unui compensator de putere reactivă), formând curenții:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^Y &= -j I_{Rr} \\
\underline{I}_S^Y &= a^2 (-j I_{Sr}) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right) I_{Sr} \\
\underline{I}_T^Y &= a (-j I_{Tr}) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right) I_{Tr}
\end{aligned} \tag{A6.9}$$

relațiile (A6.6) devin:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_d^Y &= -j \frac{1}{3}(I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr}) \\
\underline{I}_i^Y &= \frac{1}{6}[\sqrt{3}(I_{Sr} - I_{Tr}) + j(-2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})] \\
\underline{I}_h^Y &= \frac{1}{6}[\sqrt{3}(I_{Tr} - I_{Sr}) + j(-2I_{Rr} + I_{Sr} + I_{Tr})]
\end{aligned} \tag{A6.10}$$

Tot aici poate fi abordată și conexiunea Y (fără conductor neutru). În acest caz, conductorul neutru lipsind, componenta homopolară este nulă:

$$\underline{I}_h = \frac{1}{3}(\underline{I}_R^Y + \underline{I}_S^Y + \underline{I}_T^Y) = 0 \tag{A6.11}$$

Folosind ecuațiile (A6.6), condiția (A6.11) se poate exprima și sub forma a două ecuații de legătură între componentele curenților de sarcină:

$$\begin{aligned}
2I_{Ra} - I_{Sa} - I_{Ta} &= \sqrt{3}(I_{Sr} - I_{Tr}) \\
2I_{Rr} - I_{Sr} - I_{Tr} &= \sqrt{3}(I_{Ta} - I_{Sa})
\end{aligned} \tag{A6.12}$$

2. Cazul receptorului trifazat în conexiune Δ

Pentru deducerea relațiilor curenților pe faze în acest caz, se vor utiliza notațiile din figura A6.2. Se va folosi aceeași ipoteză : tensiunile alcătuiesc un sistem trifazat echilibrat. De data aceasta sunt necesare tensiunile de linie:

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{RS} &= U_R - U_S = U_f(1 - a^2) = -j \cdot a \cdot U_l \\
\underline{U}_{ST} &= U_S - U_T = U_f(a^2 - a) = -j \cdot U_l \\
\underline{U}_{TR} &= U_T - U_R = U_f(1 - a) = -j \cdot a^2 \cdot U_l
\end{aligned} \tag{A6.13}$$

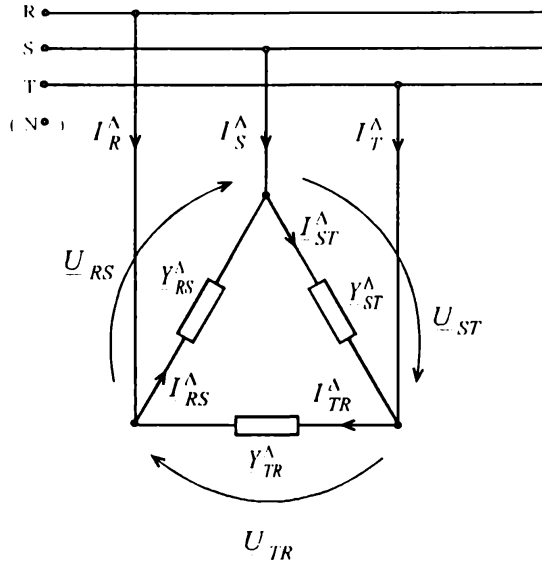


Fig. A6.3. Receptor trifazat în conexiunea Δ.

sau:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RS}^A &= -j \cdot \alpha \cdot U_l (G_{RS} - j B_{RS}) = -j \cdot \alpha \cdot (I_{RSa}^A - j I_{RSr}^A) = -j \cdot \alpha \cdot \underline{I}_{RS}^{A*} \\ \underline{I}_{ST}^A &= -j \cdot U_l (G_{ST} - j B_{ST}) = j (I_{STa}^A - j I_{STr}^A) = -j \cdot \underline{I}_{ST}^{A*} \\ \underline{I}_{TR}^A &= -j \cdot \alpha^2 \cdot U_l (G_{TR} - j B_{TR}) = -j \cdot \alpha^2 (I_{TRa}^A - j I_{TRr}^A) = -j \cdot \alpha^2 \cdot \underline{I}_{TR}^{A*} \end{aligned} \quad (\text{A6.17})$$

în care cu “ * ” s-au notat curenții pe laturile triunghiului, exprimați prin raportare la tensiunea de linie corespunzătoare.

Înlocuind deci relațiile (A6.17) în (A6.15) se obține:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^A &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3} (I_{RSa}^A + I_{TRa}^A) + I_{RSr}^A - I_{TRr}^A + j \left[I_{RSa}^A - I_{TRa}^A + \sqrt{3} (-I_{TRr}^A - I_{RSr}^A) \right] \right\} \\ \underline{I}_S^A &= \frac{1}{2} \left[-\sqrt{3} I_{RSa}^A - 2I_{STr}^A - I_{RSr}^A + j (-2I_{STa}^A - I_{RSa}^A + \sqrt{3} I_{RSr}^A) \right] \\ \underline{I}_T^A &= \frac{1}{2} \left[-\sqrt{3} I_{TRa}^A + I_{TRr}^A + 2I_{STr}^A + j (I_{TRa}^A + 2I_{STa}^A + \sqrt{3} I_{TRr}^A) \right] \end{aligned} \quad (\text{A6.18})$$

Componentele de secvență (de referință - corespunzătoare fazei R) ale curenților de fază, se obțin prin aplicarea unor relații de forma (A6.5)

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^A &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[I_{RSa}^A + I_{STa}^A + I_{TRa}^A - j (I_{RSr}^A + I_{STr}^A + I_{TRr}^A) \right] \\ \underline{I}_i^A &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{RSa}^A - 2I_{STa}^A + I_{TRa}^A) + I_{RSr}^A - I_{TRr}^A \right] + \\ & \quad j \frac{1}{2} \left[I_{RSa}^A - I_{TRa}^A + \frac{1}{\sqrt{3}} (-I_{RSr}^A + 2I_{STr}^A - I_{TRr}^A) \right] \end{aligned} \quad (\text{A6.19})$$

$$\underline{I}_h^A = 0$$

Curenții pe fazele receptorului se deduc pornind de la curenții pe laturile triunghiului, presupuși cunoscuți:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^A &= \underline{I}_{RS}^A - \underline{I}_{TR}^A \\ \underline{I}_S^A &= \underline{I}_{ST}^A - \underline{I}_{RS}^A \\ \underline{I}_T^A &= \underline{I}_{TR}^A - \underline{I}_{ST}^A \end{aligned} \quad (\text{A6.15})$$

Curenții pe laturile triunghiului se exprimă în funcție de componentele lor active și reactive, corespunzătoare conductanțelor și susceptanțelor echivalente:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RS}^A &= \underline{U}_{RS} Y_{RS} = \underline{U}_{RS} (G_{RG} - j B_{RS}) \\ \underline{I}_{ST}^A &= \underline{U}_{ST} Y_{ST} = \underline{U}_{ST} (G_{ST} - j B_{ST}) \\ \underline{I}_{TR}^A &= \underline{U}_{TR} Y_{TR} = \underline{U}_{TR} (G_{TR} - j B_{TR}) \end{aligned} \quad (\text{A6.16})$$

sau:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^\Delta &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\underline{I}_{RS}^{\Delta*} + \underline{I}_{ST}^{\Delta*} + \underline{I}_{TR}^{\Delta*} \right) \\ \underline{I}_i^\Delta &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \left(a^2 \underline{I}_{RS}^{\Delta*} + \underline{I}_{ST}^{\Delta*} + a \underline{I}_{TR}^{\Delta*} \right) \end{aligned} \quad (\text{A6.20})$$

Dacă schema echivalentă Δ ar conține numai elemente active (cazul unui consumator particular), relațiile (A6.18) ar deveni:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^\Delta &= \frac{\sqrt{3}}{2} \left(I_{RSa}^\Delta + I_{TRa}^\Delta \right) + j \frac{1}{2} \left(I_{RSa}^\Delta - I_{TRa}^\Delta \right) \\ \underline{I}_S^\Delta &= -\frac{\sqrt{3}}{2} I_{RSa}^\Delta + j \frac{1}{2} \left(-2I_{STa}^\Delta - I_{RSa}^\Delta \right) \\ \underline{I}_T^\Delta &= -\frac{\sqrt{3}}{2} I_{TRa}^\Delta + j \frac{1}{2} \left(I_{TRa}^\Delta + 2I_{STa}^\Delta \right) \end{aligned} \quad (\text{A6.21})$$

ceea ce corespunde unor componente simetrice având expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^\Delta &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(I_{RSa}^\Delta + I_{STa}^\Delta + I_{TRa}^\Delta \right) \\ \underline{I}_i^\Delta &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(I_{RSa}^\Delta - 2I_{STa}^\Delta + I_{TRa}^\Delta \right) + j \frac{1}{2} \left(I_{RSa}^\Delta - I_{TRa}^\Delta \right) \\ \underline{I}_h^\Delta &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A6.22})$$

Dacă schema echivalentă Δ ar conține numai elemente reactive (cazul compensatoarelor de putere reactivă), curenții pe faze devin:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^\Delta &= \frac{1}{2} \left(I_{RSr}^\Delta - I_{TRr}^\Delta \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \left(-I_{TRr}^\Delta - I_{RSr}^\Delta \right) \\ \underline{I}_S^\Delta &= \frac{1}{2} \left(-2I_{STr}^\Delta - I_{RSr}^\Delta \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} I_{RSr}^\Delta \\ \underline{I}_T^\Delta &= \frac{1}{2} \left(2I_{STr}^\Delta + I_{TRr}^\Delta \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} I_{TRr}^\Delta \end{aligned} \quad (\text{A6.23})$$

iar componentele simetrice aferente au expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^\Delta &= -j \frac{1}{\sqrt{3}} \left(I_{RSr}^\Delta + I_{STr}^\Delta + I_{TRr}^\Delta \right) \\ \underline{I}_i^\Delta &= \frac{1}{2} \left(I_{RSr}^\Delta - I_{TRr}^\Delta \right) + j \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(-I_{RSr}^\Delta + 2I_{STr}^\Delta - I_{TRr}^\Delta \right) \\ \underline{I}_h^\Delta &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A6.24})$$

Se observă că:

- de fiecare dată suma curenților pe cele trei faze este nulă, ceea ce conduce la inexistența componentei de secvență homopolară. Altfel spus: receptorul în conexiune Δ nu intervine asupra circulației de curenți pe secvența homopolară;

• dacă se consideră cazul receptorului ce conține numai elemente reactive, iar acestea s-ar alege astfel încât:

$$I_{RSr}^{\wedge} + I_{STr}^{\wedge} + I_{TRr}^{\wedge} = 0 \quad (\Lambda 6.25)$$

receptorul ar interveni în rețea numai asupra circulației pe secvența inversă (curenții pe fazele sale ar forma un sistem trifazat simetric de secvență inversă):

$$\begin{aligned} \underline{I}_d^{\wedge} &= 0 \quad , \quad \underline{I}_h^{\wedge} = 0 \\ \underline{I}_i^{\wedge} &= \frac{1}{2} (I_{RSr}^{\wedge} - I_{TRr}^{\wedge}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} I_{STr}^{\wedge} \end{aligned} \quad (\Lambda 6.27)$$

Se mai pot face unele observații interesante aici, dacă se exprimă curenții pe fazele receptorului în cazurile în care acesta conține numai elemente active, respectiv reactive prin raportare la tensiunile de fază aferente. Pentru aceasta, în relațiile (Λ6.21) și (Λ6.23) se înmulțește cu operatorul a , respectiv a^2 . Rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{\wedge*} &= \underline{I}_R^{\wedge} = \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{RSa}^{\wedge} + I_{TRa}^{\wedge}) + j \frac{1}{2} (I_{RSa}^{\wedge} - I_{TRa}^{\wedge}) \\ \underline{I}_S^{\wedge*} &= a \cdot \underline{I}_S^{\wedge} = \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{RSa}^{\wedge} + I_{STa}^{\wedge}) + j \frac{1}{2} (I_{STa}^{\wedge} - I_{RSa}^{\wedge}) \\ \underline{I}_T^{\wedge*} &= a^2 \cdot \underline{I}_T^{\wedge} = \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{STa}^{\wedge} + I_{TRa}^{\wedge}) + j \frac{1}{2} (I_{TRa}^{\wedge} - I_{STa}^{\wedge}) \end{aligned} \quad (\Lambda 6.27)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_R^{\wedge*} &= \underline{I}_R^{\wedge} = \frac{1}{2} (I_{RSr}^{\wedge} - I_{TRr}^{\wedge}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{TRr}^{\wedge} + I_{RSr}^{\wedge}) \\ \underline{I}_S^{\wedge*} &= a \cdot \underline{I}_S^{\wedge} = \frac{1}{2} (I_{STr}^{\wedge} - I_{RSr}^{\wedge}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{RSr}^{\wedge} + I_{STr}^{\wedge}) \\ \underline{I}_T^{\wedge*} &= a^2 \cdot \underline{I}_T^{\wedge} = \frac{1}{2} (I_{TRr}^{\wedge} - I_{STr}^{\wedge}) - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{STr}^{\wedge} + I_{TRr}^{\wedge}) \end{aligned} \quad (\Lambda 6.28)$$

Din ecuațiile (Λ6.25) și (Λ6.26) se poate observa că dacă se raportează la un sistem de tensiuni de fază simetric (față de un neutru care poate fi fizic sau fictiv):

- deși conține numai elemente active, receptorul în conexiune Δ debitează, respectiv absoarbe pe faze și putere reactivă, în funcție de sensul și mărimea dezechilibrului ; nu este însă afectat bilanțul puterilor reactive pe ansamblul celor trei faze ;

- deși conține numai elemente reactive, receptorul în conexiune Δ, debitează respectiv absoarbe pe faze și putere activă, în funcție de sensul și mărimea dezechilibrului ; nu este însă afectat bilanțul puterilor active pe ansamblul celor trei faze.

Determinarea grafică a componentelor simetrice ale unui sistem trifazat de mărimi

a. Construcția directă

Dacă se cunosc fazorii (vectorii Fresnel) asociați mărimilor studiate $\underline{\Delta}_R, \underline{\Delta}_S, \underline{\Delta}_T$ (prin mărimea valorii efective și a fazei), se pot determina fazorii asociați componentelor simetrice aplicând relațiile de definiție :

$$\begin{aligned} \underline{A}_d &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_R + a \cdot \underline{A}_S + a^2 \cdot \underline{A}_T) \\ \underline{A}_i &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_R + a^2 \cdot \underline{A}_S + a \cdot \underline{A}_T) \\ \underline{A}_h &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_R + \underline{A}_S + \underline{A}_T) \end{aligned} \tag{A7.1}$$

Această metodă este însă laborioasă și presupune cunoașterea a numeroase informații (3 valori efective și 3 faze).

b. Determinarea componentelor directă și inversă

Căutarea acestor componente este simplificată prin existența următoarei teoreme :
Toate sistemele fazoriale "stelate" de mărimi, având aceleași extremități au aceleași componente de secvență directă și inversă.

Demonstrația acestei teoreme este simplă :

Să considerăm deci două sisteme fazoriale : $\underline{\Delta}_R, \underline{\Delta}_S, \underline{\Delta}_T$ cu originea în O și $\underline{\Delta}'_R, \underline{\Delta}'_S, \underline{\Delta}'_T$ cu originea în O', având aceleași extremități (fig. A7.1).

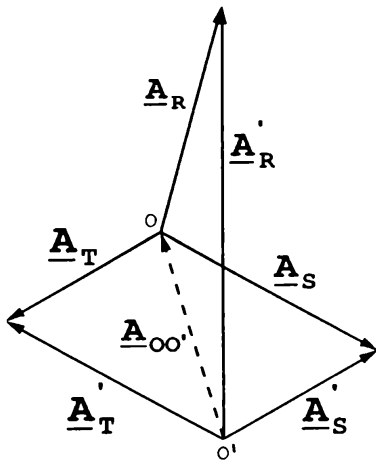


Fig. A7.1. Două sisteme fazoriale "stelate" având origini diferite dar aceleași extremități.

Se poate scrie

$$\begin{aligned} \underline{A}'_R &= \underline{A}_R + \underline{A}_{OO'} \\ \underline{A}'_S &= \underline{A}_S + \underline{A}_{OO'} \\ \underline{A}'_T &= \underline{A}_T + \underline{A}_{OO'} \end{aligned} \tag{A7.2}$$

Componentele directă și inversă a acestui sistem fiind :

$$\begin{aligned} \underline{A}'_d &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + a \cdot \underline{A}'_S + a^2 \cdot \underline{A}'_T) \\ \underline{A}'_i &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + a^2 \cdot \underline{A}'_S + a \cdot \underline{A}'_T) \end{aligned} \tag{A7.3}$$

Înlocuind (A7.2) în (A7.3) se poate scrie :

$$\begin{aligned}\underline{A}'_d &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + a \cdot \underline{A}'_S + a^2 \cdot \underline{A}'_T) + \frac{1}{3} \cdot \underline{A}_{OO'} \cdot (1 + a + a^2) = \underline{A}_d \\ \underline{A}'_i &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + a^2 \cdot \underline{A}'_S + a \cdot \underline{A}'_T) + \frac{1}{3} \cdot \underline{A}_{OO'} \cdot (1 + a^2 + a) = \underline{A}_i\end{aligned}\quad (\text{A7.4})$$

deoarece $1 + a + a^2 = 0$

Acest rezultat nu depinde de $\underline{A}_{OO'}$ (poziția relativă a celor două origini), demonstrându-se astfel teorema anterioară.

Se observă în plus că :

$$\underline{A}'_h = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + \underline{A}'_S + \underline{A}'_T) = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_R + \underline{A}_S + \underline{A}_T) + \underline{A}_{OO'} = \underline{A}_h + \underline{A}_{OO'} \quad (\text{A7.5})$$

O aplicație imediată a teoremei de mai sus constă în simplificarea metodei de determinare grafică a componentelor directă și inversă. Astfel, deoarece componentele de secvență directă și inversă nu depind de originea fazorilor, vom alege o astfel de origine încât să obținem construcția cea mai simplă.

Dacă se alege extremitatea lui \underline{A}'_T ca noua origine O' , sistemul studiat se reduce la \underline{A}'_R , \underline{A}'_S , \underline{O} , componentele directe și inverse ale acestuia devenind :

$$\begin{aligned}\underline{A}'_d &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + a \cdot \underline{A}'_S) = \underline{A}_d \\ \underline{A}'_i &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}'_R + a^2 \cdot \underline{A}'_S) = \underline{A}_i\end{aligned}\quad (\text{A7.6})$$

Componentele simetrice căutate se vor obține prin relațiile :

$$\begin{aligned}3 \cdot \underline{A}_d &= \underline{A}'_R - (1 + a^2) \cdot \underline{A}'_S = \underline{A}'_R - e^{-j\frac{\pi}{3}} \cdot \underline{A}'_S \\ 3 \cdot \underline{A}_i &= \underline{A}'_R - (1 + a) \cdot \underline{A}'_S = \underline{A}'_R - e^{j\frac{\pi}{3}} \cdot \underline{A}'_S\end{aligned}\quad (\text{A7.7})$$

deoarece

$$\begin{aligned}-a &= 1 + a^2 = e^{j\pi} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j\frac{5\pi}{3}} = e^{-j\frac{\pi}{3}} \\ -a^2 &= 1 + a = e^{j\pi} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{j\frac{7\pi}{3}} = e^{j\frac{\pi}{3}}\end{aligned}\quad (\text{A7.8})$$

Fazorii $3\underline{A}_d$ respectiv $3\underline{A}_i$ se obțin făcând diferența fazorială între \underline{A}'_R și un fazor obținut prin defazarea lui \underline{A}'_S cu $\pi/3$ în urmă, respectiv cu $\pi/3$ înainte (fig. A7.2). Expresiile celor 2 mărimi s-au scris sub forma unor diferențe deoarece construcția grafică a diferenței a 2 fazori cu aceeași origine este o operație foarte simplă.

În afară de posibilitatea unei determinări mai ușoare a componentelor directă și inversă, acest procedeu prezintă avantajul că nu cere cunoașterea integrală a mărimilor studiate. Este suficientă cunoașterea extremităților vectorilor asociați în planul Fresnel și bineînțeles așezarea lor în stea. Aplicația imediată a acestei metode constă în determinarea componentelor simetrice ale sistemului tensiunilor de fază al unui element trifazat oarecare, la care neutrul (sau potențialul de referință) nu este accesibil.

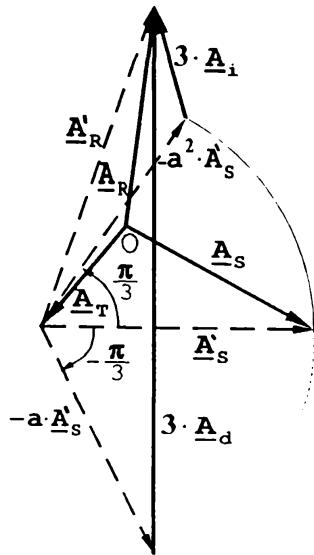


Fig. A7.2. Construcția grafică a componentelor de secvență directă și inversă.

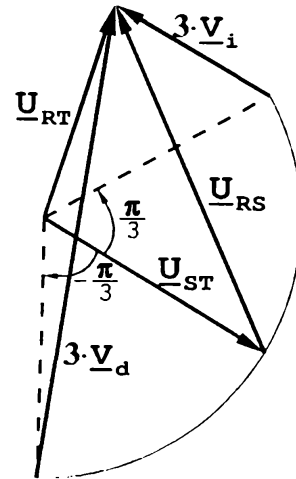


Fig. A7.3. Determinarea grafică a componentelor simetrice ale sistemului tensiunilor de fază, cunoscând tensiunile de linie.

În această situație va fi suficientă măsurarea valorilor efective ale tensiunilor compuse \underline{U}_{RS} , \underline{U}_{ST} , \underline{U}_{TR} pentru a construi un triunghi ale cărui vârfuri sunt extremitățile tensiunilor de fază \underline{U}_R , \underline{U}_S , \underline{U}_T . Apoi \underline{U}_{RS} , $-\underline{U}_{TR}$ și \underline{U}_{ST} vor juca rolul mărimilor \underline{A}'_R și \underline{A}'_S din demonstrația generală (fig. A7.3).

Se remarcă faptul că componentele simetrice calculate sunt independente de potențialul de referință (sau al neutrului), ceea ce este consecința imediată a teoremei de la începutul acestei anexe ([100]).

c. Determinarea componentei homopolare

Componenta homopolară este legată de originea O a fazorilor asociați mărimilor studiate. Prin definiție :

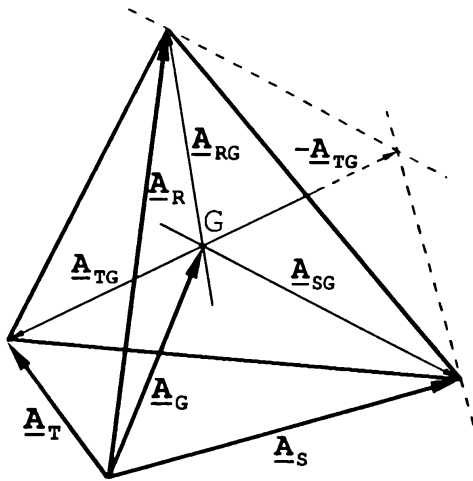
$$\underline{A}_h = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_R + \underline{A}_S + \underline{A}_T) \quad (\text{A7.10})$$

Se știe că există un punct G numit centrul de greutate al triunghiului format de extremitățile fazorilor \underline{A}_R , \underline{A}_S , \underline{A}_T , în planul Fresnel a cărui proprietate deosebită constă în faptul că fazorii \underline{A}_{RG} , \underline{A}_{SG} , \underline{A}_{TG} care îl au ca origine și ca vârfuri extremitățile triunghiului (fig. A7.4) sunt în următoarea relație :

$$\underline{A}_{RG} + \underline{A}_{SG} + \underline{A}_{TG} = \underline{0} \quad (\text{A7.11})$$

Se observă că :

$$\begin{aligned} \underline{A}_R &= \underline{A}_G + \underline{A}_{RG} \\ \underline{A}_S &= \underline{A}_G + \underline{A}_{SG} \\ \underline{A}_T &= \underline{A}_G + \underline{A}_{TG} \end{aligned} \quad (\text{A7.12})$$



Astfel că :

$$\underline{A}_h = \frac{1}{3} \cdot (\underline{A}_{RG} + \underline{A}_{SG} + \underline{A}_{TG}) + \underline{A}_G = \underline{A}_G \quad (\Lambda 4.13)$$

Componenta homopolară căutată este așadar reprezentată prin vectorul având originea O și extremitatea G. Această componentă este deci nulă, atunci când O se găsește în centrul de greutate al triunghiului format de extremitățile fazorilor.

Fig. A7.4. Determinarea grafică a componentei homopolare a unui sistem trifazat de mărimi.

ANEXA 8

Rezultate ale aplicațiilor numerice aferente capitolului al treilea

Fisier :3c01.tde

$\cos \phi_m = 1.000$

$\cos \phi_R = 1.000$

IR= 50.000-j 0.000 [A]

$\cos \phi_S = 1.000$

IS= 100.000-j 0.000 [A]

$\cos \phi_T = 1.000$

IT= 150.000-j 0.000 [A]

Regim Marime	d	s	b ($\cos \phi_i$)					a (1.00)	sarcina necomp.
			0.90	0.92	0.94	0.96	0.98		
IR Δ [A]	16.667	0.000	44.629	41.262	37.622	33.506	28.390	16.667	0.000
IS Δ [A]	16.667	0.000	44.629	41.262	37.622	33.506	28.390	16.667	0.000
IT Δ [A]	-33.333	0.000	-5.371	-8.738	-12.378	-16.494	-21.610	-33.333	0.000
IR Δ a [A]	50.000	0.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ a [A]	-50.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IR Δ [A]	50.000	0.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ [A]	50.000	0.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	0.000
IR [A]	100.000	50.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	50.000
IS [A]	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
IT [A]	100.000	150.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	150.000
Id [A]	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Ii [A]	0.000	28.868	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.868
Kni [%]	0.000	28.868	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.868
$\cos \phi_d$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Kpn	1.000	0.961	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.961
Kp	1.000	0.961	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.961
E_{Qc} [Kvar]	12.702	0.000	2.047	3.330	4.717	6.285	8.234	12.701	0.000
E_{QL} [Kvar]	12.702	0.000	34.012	31.446	28.672	25.535	21.636	12.702	0.000

$\cos \phi_m = 0.600$

$\cos \phi_R = 0.500$
 $\cos \phi_S = 0.600$
 $\cos \phi_T = 0.700$

$IR = 50.000 - j 86.603 [A]$
 $IS = 100.000 - j 133.333 [A]$
 $IT = 150.000 - j 153.031 [A]$

Regim	d	s	b (cosφ1)				a	sarcina	necomp.	Maritime
			IRSA [A]	ITSA [A]	ISa [A]	ITa [A]				
IRSA [A]	33.241	-71.777	-10.574	-13.941	-17.581	-21.697	-26.812	-38.535	0.000	
ISTA [A]	-5.111	-71.777	-48.926	-52.293	-55.933	-60.049	-65.165	-76.888	0.000	
ITRA [A]	-28.131	-71.777	-71.946	-75.313	-78.953	-83.069	-88.185	-99.908	0.000	
IRa [A]	50.000	0.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	0.000	
ISa [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
ITa [A]	-50.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000	
IRar [A]	37.720	-124.322	-38.170	-44.003	-50.307	-57.436	-66.297	-86.602	0.000	
ISar [A]	-9.011	-124.322	-84.901	-90.734	-97.038	-104.167	-113.027	-133.332	0.000	
ITar [A]	-28.708	-124.322	-104.598	-110.431	-116.735	-123.864	-132.725	-153.030	0.000	
IRar [A]	62.632	124.322	62.904	66.605	70.928	76.150	83.038	99.999	0.000	
ISar [A]	9.011	124.322	84.901	90.734	97.038	104.167	113.027	133.332	0.000	
ITar [A]	57.656	124.322	115.935	121.223	126.993	133.575	141.830	160.991	0.000	
IR [A]	159.549	62.632	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	100.000	
IS [A]	159.549	100.405	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	166.667	
IT [A]	159.549	152.723	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	214.286	
Id [A]	159.549	100.000	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	159.549	
Ii [A]	0.000	31.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.004	
Kn1 [%]	0.000	31.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19.432	
cos φ	1.000	1.000	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.627	
Kpn	1.000	0.955	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.982	
Kp	0.627	0.955	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.615	
ZQc [Kvar]	12.667	82.053	50.087	53.937	58.098	62.803	68.651	82.052	0.000	
ZQl [Kvar]	12.667	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

cos φm = 0.600

cos φR = 0.800

cos φS = 0.400

cos φT = 0.600

IR= 50.000-] 37.500 [A]
 IS= 100.000-] 229.129 [A]
 IT= 150.000-] 200.000 [A]

Regim	d	s	b (cosφ)				a	Marime necomp. sarcina (1.00)	
			IR	IS	IT	ITa			
IRSA [A]	42.334	-89.803	-19.506	-22.874	-26.514	-30.629	-35.745	-47.468	0.000
IRSTA [A]	-51.485	-89.803	-113.326	-116.693	-120.333	-124.449	-129.565	-141.288	0.000
ITRA [A]	9.151	-89.803	-52.689	-56.056	-59.696	-63.812	-68.928	-80.651	0.000
IRa [A]	50.000	0.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	0.000
ISa [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ITa [A]	-50.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IRar [A]	118.043	-155.543	10.932	5.100	-1.205	-8.333	-17.194	-37.499	0.000
ISar [A]	-73.586	-155.543	-180.697	-186.529	-192.834	-199.962	-208.823	-229.128	0.000
ITar [A]	-44.457	-155.543	-151.568	-157.400	-163.705	-170.833	-179.694	-199.999	0.000
IRa [A]	128.196	155.543	51.181	50.259	50.015	50.690	52.874	62.499	0.000
ISa [A]	73.586	155.543	180.697	186.529	192.834	199.962	208.823	229.128	0.000
ITa [A]	66.906	155.543	159.602	165.151	171.170	178.000	186.521	206.154	0.000
IR [A]	184.915	128.196	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	62.500
IS [A]	184.915	124.157	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	250.000
IT [A]	184.915	156.449	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	250.000
Id [A]	184.915	100.000	111.111	108.696	106.383	104.167	102.041	100.000	184.915
Ii [A]	0.000	47.574	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.574
Kni [%]	0.000	47.574	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	25.728
cos φ	1.000	0.541	1.000	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	0.541
Kpn	1.000	0.903	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.968
Kp	0.541	0.903	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.524
ZQC [Kvar]	19.619	102.658	70.693	74.542	78.704	83.408	89.256	102.658	0.000
ZQL [Kvar]	19.619	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fisier :3c14.tde

cos $\phi_m = 1.000$

cos $\phi_R = 1.000$

cos $\phi_S = 1.000$

cos $\phi_T = 1.000$

IR= 150.000-j 0.000 [A]

IS= 250.000-j 0.000 [A]

IT= 350.000-j 0.000 [A]

Regim	d	s	b (cos ϕ_i)					a (1.00)	sarcina necomp.
			0.90	0.92	0.94	0.96	0.98		
Marime									
IR Δ [A]	33.333	0.000	103.239	94.821	85.721	75.432	62.642	33.335	0.000
IS Δ [A]	33.333	0.000	103.239	94.821	85.721	75.432	62.642	33.335	0.000
IT Δ [A]	-66.667	0.000	3.239	-5.179	-14.279	-24.568	-37.358	-66.665	0.000
IR Δ a [A]	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ a [A]	-100.000	0.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IR Δ [A]	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ [A]	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000
IR [A]	250.000	150.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	150.000
IS [A]	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
IT [A]	250.000	350.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	350.000
Id [A]	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
Ii [A]	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	57.735
Kni [%]	0.000	23.094	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23.094
cos ϕ_d	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Kpn	1.000	0.974	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.974
Kp	1.000	0.974	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.974
ΣQ_c [Kvar]	25.403	0.000	0.000	1.974	5.441	9.362	14.235	25.403	0.000
ΣQ_L [Kvar]	25.403	0.000	79.913	72.263	65.328	57.487	47.740	25.405	0.000

$\cos \phi_m = 0.600$

$\cos \phi_R = 0.700$

$\cos \phi_S = 0.500$

$\cos \phi_T = 0.600$

IR= 150.000-] 153.031 [A]

IS= 250.000-] 433.013 [A]

IT= 350.000-] 466.667 [A]

Regim	d	s	b (cosφi)				a	Maritime	
			IRSA [A]	IRSTA [A]	ITRA [A]	ISRA [A]			
IRSA [A]	100.169	-202.594	-32.519	-40.937	-50.037	-60.326	-73.116	-102.423	0.000
IRSTA [A]	-80.909	-202.594	-213.597	-222.015	-231.115	-241.404	-254.194	-283.501	0.000
ITRA [A]	-19.261	-202.594	-151.949	-160.367	-169.467	-179.756	-192.546	-221.853	0.000
ISRA [A]	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000
ISa [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ITa [A]	-100.000	0.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	0.000
IRar [A]	197.873	-350.903	-31.950	-46.531	-62.293	-80.114	-102.266	-153.028	0.000
ISar [A]	-82.109	-350.903	-311.932	-326.513	-342.275	-360.096	-382.248	-433.010	0.000
ITar [A]	-115.763	-350.903	-345.586	-360.167	-375.929	-393.750	-415.902	-466.664	0.000
IRa [A]	221.706	350.903	104.980	110.296	117.815	128.134	143.033	182.805	0.000
ISa [A]	82.109	350.903	311.932	326.513	342.275	360.096	382.248	433.010	0.000
ITa [A]	152.974	350.903	359.764	373.792	389.002	406.250	427.755	477.258	0.000
IR [A]	430.852	248.301	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	214.286
IS [A]	430.852	263.139	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	500.000
IT [A]	430.852	368.648	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	583.333
Id [A]	430.852	250.000	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	430.852
Ii [A]	0.000	92.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	92.063
kn1 [%]	0.000	36.825	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.368
cos φ	0.580	1.000	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.580
kpn	1.000	0.938	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.978
kp	0.580	0.938	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.567
ZQc [Kvar]	38.170	231.596	151.683	161.306	171.709	183.471	198.092	231.595	0.000
ZQl [Kvar]	38.170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fisier :3c12.tde

$$\cos \phi_m = 0.600$$

$$\cos \phi_R = 0.600$$

$$\cos \phi_S = 0.800$$

$$\cos \phi_T = 0.400$$

$$IR = 150.000 - j 200.000 \text{ [A]}$$

$$IS = 250.000 - j 187.500 \text{ [A]}$$

$$IT = 350.000 - j 801.951 \text{ [A]}$$

Regim Marime	d	s	b ($\cos \phi_i$)					a (1.00)	sarcina necomp.
			0.90	0.92	0.94	0.96	0.98		
IR _s [A]	267.430	-228.910	108.426	100.008	90.908	80.618	67.829	38.521	0.000
IS _t [A]	-80.107	-228.910	-239.111	-247.529	-256.629	-266.918	-279.707	-309.015	0.000
IT _r [A]	-187.323	-228.910	-346.327	-354.746	-363.846	-374.135	-386.924	-416.232	0.000
IR _a [A]	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000
IS _a [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT _a [A]	-100.000	0.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000	0.000
IR _r [A]	196.484	-396.484	-78.919	-93.500	-109.262	-127.083	-149.235	-199.997	0.000
IS _r [A]	208.984	-396.484	-66.419	-81.000	-96.762	-114.583	-136.735	-187.497	0.000
IT _r [A]	-405.467	-396.484	-680.870	-695.451	-711.213	-729.034	-751.186	-801.948	0.000
IR _l [A]	220.467	396.484	127.390	136.903	148.116	161.710	179.642	223.605	0.000
IS _l [A]	208.984	396.484	66.419	81.000	96.762	114.583	136.735	187.497	0.000
IT _l [A]	417.617	396.484	688.175	702.604	718.209	735.861	757.813	808.159	0.000
IR [A]	468.721	247.196	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	250.000
IS [A]	468.721	325.844	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	312.500
IT [A]	468.721	535.634	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	875.000
I _d [A]	468.721	250.000	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	468.721
I _i [A]	0.000	237.724	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	237.724
K _{ni} [%]	0.000	95.090	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	50.718
$\cos \phi_d$	0.533	1.000	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.533
K _{pn}	1.000	0.725	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.892
K _p	0.533	0.725	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.476
ΣQ_c [Kvar]	101.904	261.679	223.082	229.497	236.433	244.274	254.021	276.356	0.000
ΣQ_L [Kvar]	101.904	0.000	41.316	38.108	34.640	30.720	25.846	14.679	0.000

Fisier :3c15.tde

$\cos \phi_m = 1.000$

$\cos \phi_R = 1.000$

IR= 50.000-j 0.000 [A]

$\cos \phi_S = 1.000$

IS= 300.000-j 0.000 [A]

$\cos \phi_T = 1.000$

IT= 400.000-j 0.000 [A]

Regim Marime	d	s	b ($\cos \phi_i$)					a (1.00)	sarcina necomp.
			0.90	0.92	0.94	0.96	0.98		
IR Δ [A]	83.333	0.000	153.239	144.821	135.721	125.432	112.642	83.335	0.000
IS Δ [A]	33.333	0.000	103.239	94.821	85.721	75.432	62.642	33.335	0.000
IT Δ [A]	-116.667	0.000	-46.761	-55.179	-64.279	-74.568	-87.358	-116.665	0.000
IR Δ a [A]	200.000	0.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS Δ a [A]	-50.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IT Δ a [A]	-150.000	0.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IR Δ [A]	200.000	0.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS Δ [A]	50.000	0.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	0.000
IT Δ [A]	150.000	0.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	0.000
IR [A]	250.000	50.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	50.000
IS [A]	250.000	300.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	300.000
IT [A]	250.000	400.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	400.000
Id [A]	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
Ii [A]	0.000	104.083	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	104.083
Kni [%]	0.000	41.633	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	41.633
$\cos \phi_d$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Kpn	1.000	0.923	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.923
Kp	1.000	0.923	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.923
ΣQ_c [Kvar]	44.456	0.000	17.818	21.026	24.494	28.414	33.288	44.455	0.000
ΣQ_L [Kvar]	44.456	0.000	97.731	91.316	84.381	76.539	66.792	44.457	0.000

Fisier :3c16.tde

cos ϕ_m = 0.600

cos ϕ_R = 0.500

cos ϕ_S = 0.600

cos ϕ_T = 0.700

IR= 50.000-j 86.603 [A]

IS= 300.000-j 400.000 [A]

IT= 400.000-j 408.082 [A]

Regim Marime	d	s	b (cos ϕ_i)					a (1.00)	sarcina necomp.
			0.90	0.92	0.94	0.96	0.98		
IR Δ [A]	146.757	-172.182	44.481	36.063	26.963	16.674	3.884	-25.423	0.000
IS Δ [A]	-88.849	-172.182	-191.125	-199.543	-208.643	-218.932	-231.722	-261.029	0.000
IT Δ [A]	-57.909	-172.182	-160.185	-168.603	-177.703	-187.992	-200.782	-230.089	0.000
IR Δ a [A]	200.000	0.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS Δ a [A]	-50.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IT Δ a [A]	-150.000	0.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	0.000
IR Δ r [A]	211.626	-298.228	34.478	19.897	4.135	-13.686	-35.838	-86.600	0.000
IS Δ r [A]	-101.772	-298.228	-278.919	-293.500	-309.262	-327.083	-349.235	-399.997	0.000
IT Δ r [A]	-109.854	-298.228	-287.001	-301.582	-317.344	-335.165	-357.317	-408.079	0.000
IR Δ [A]	291.179	298.228	202.950	200.987	200.043	200.468	203.186	217.944	0.000
IS Δ [A]	113.391	298.228	283.366	297.729	313.278	330.883	352.796	403.110	0.000
IT Δ [A]	185.924	298.228	323.836	336.826	351.009	367.200	387.525	434.774	0.000
IR [A]	389.153	217.452	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	100.000
IS [A]	389.153	316.793	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	500.000
IT [A]	389.153	414.811	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	571.429
Id [A]	389.153	250.000	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	389.153
Ii [A]	0.000	128.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	128.034
Kni [%]	0.000	51.213	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	32.901
cos ϕ_d	0.642	1.000	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.642
Kpn	1.000	0.890	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.950
Kp	0.642	0.890	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.610
ΣQ_c [Kvar]	55.922	196.831	133.867	140.283	147.218	155.059	164.806	196.829	0.000
ΣQ_L [Kvar]	55.922	0.000	16.950	13.742	10.274	6.354	1.480	0.000	0.000

Fisier :3c19.tde

$$\cos \phi_m = 0.600$$

$$\cos \phi_R = 0.400$$

$$IR = 50.000 - j 114.564 \text{ [A]}$$

$$\cos \phi_S = 0.600$$

$$IS = 300.000 - j 400.000 \text{ [A]}$$

$$\cos \phi_T = 0.800$$

$$IT = 400.000 - j 300.000 \text{ [A]}$$

Regim Marime	d	s	b ($\cos \phi_i$)					a (1.00)	sarcina necomp.
			0.90	0.92	0.94	0.96	0.98		
IR Δ [A]	99.775	-156.763	12.918	4.500	-4.600	-14.889	-27.679	-56.986	0.000
IS Δ [A]	-57.286	-156.763	-144.143	-152.561	-161.661	-171.950	-184.740	-214.047	0.000
IT Δ [A]	-42.490	-156.763	-129.347	-137.765	-146.865	-157.154	-169.944	-199.251	0.000
IR Δ a [A]	200.000	0.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS Δ a [A]	-50.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IT Δ a [A]	-150.000	0.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	-150.000	0.000
IR Δ r [A]	156.957	-271.521	6.516	-8.065	-23.827	-41.648	-63.800	-114.562	0.000
IS Δ r [A]	-128.479	-271.521	-278.919	-293.500	-309.262	-327.083	-349.235	-399.997	0.000
IT Δ r [A]	-28.479	-271.521	-178.919	-193.500	-209.262	-227.083	-249.235	-299.998	0.000
IR Δ [A]	254.235	271.521	200.106	200.163	201.414	204.290	209.930	230.487	0.000
IS Δ [A]	137.865	271.521	283.366	297.729	313.278	330.883	352.796	403.110	0.000
IT Δ [A]	152.679	271.521	233.478	244.831	257.470	272.152	290.892	335.408	0.000
IR [A]	369.085	164.729	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	125.000
IS [A]	369.085	326.354	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	500.000
IT [A]	369.085	401.013	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	500.000
Id [A]	369.085	250.000	277.778	271.739	265.957	260.417	255.102	250.000	369.085
Ii [A]	0.000	86.724	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	86.724
Kni [%]	0.000	34.690	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23.497
$\cos \phi_d$	0.677	1.000	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.677
Kpn	1.000	0.945	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.973
Kp	0.677	0.945	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000	0.659
ΣQ_c [Kvar]	38.020	179.204	104.214	110.629	119.317	131.079	145.699	179.203	0.000
ΣQ_L [Kvar]	38.020	0.000	4.923	1.715	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ANEXA 9

Rezultate ale aplicațiilor numerice aferente capitolului al patrulea

Fisier :4c06.tde

cos ϕ_m = 0.600cos ϕ_R = 0.600cos ϕ_S = 0.800cos ϕ_T = 0.400

IR= 50.000-j 66.667 [A]

IS= 100.000-j 75.000 [A]

IT= 150.000-j 343.693 [A]

Regim Marime	a		b	c					sarcina necomp.
	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	
IRY [A]	-161.787	-49.346	0.000	-37.799	-95.534	-37.799	83.541	43.094	0.000
ISY [A]	-161.787	-109.641	-94.936	-132.735	-17.265	-132.735	-11.395	-51.842	0.000
ITY [A]	-161.787	-326.373	-277.027	-314.826	-372.561	-314.826	-193.486	-233.932	0.000
IRS Δ [A]	0.000	0.000	33.333	0.000	0.000	33.333	-36.722	-13.370	0.000
IST Δ [A]	0.000	0.000	33.333	0.000	0.000	33.333	-36.722	-13.370	0.000
ITR Δ [A]	0.000	0.000	-66.667	0.000	0.000	-66.667	-136.722	-113.370	0.000
IR Δ a [A]	0.000	0.000	50.000	0.000	0.000	50.000	50.000	50.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ a [A]	0.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	-28.868	0.000	0.000	-28.868	-150.207	-109.761	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	-63.605	-23.158	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	-28.868	0.000	0.000	-28.868	-150.207	-109.761	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	158.311	120.613	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	63.605	23.158	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	158.311	120.613	0.000
Id c [A]	100.000	100.000	106.905	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	190.197
Ii c [A]	107.782	46.188	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	0.000	107.782
Ih c [A]	81.279	11.547	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	81.279
Kni [%]	107.782	46.188	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	0.000	56.669
Knh [%]	81.279	11.547	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	42.734
Kpn	0.595	0.903	1.000	0.866	0.866	1.000	1.000	1.000	0.815
cos ϕ_d	1.000	1.000	0.935	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.526
Kp	0.595	0.903	0.935	0.866	0.866	1.000	1.000	1.000	0.429
ΣP [KW]	3.603	0.950	0.857	1.000	1.750	0.750	0.750	0.750	5.566
ΣQc [Kvar]	106.779	106.779	107.235	106.779	106.779	132.183	125.158	116.260	0.000
ΣQL [Kvar]	0.000	0.000	25.403	0.000	0.000	25.403	18.379	9.481	0.000

Fisier :4c02.tde

 $\cos \phi_m = 0.600$ $\cos \phi_R = 0.500$ $\cos \phi_S = 0.600$ $\cos \phi_T = 0.700$

IR= 50.000-j 86.603 [A]

IS= 100.000-j 133.333 [A]

IT= 150.000-j 153.031 [A]

Regim Marime	a		b	c					sarcina
	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	necomp.
IRY [A]	-124.322	-69.282	0.000	-57.735	-115.470	-57.735	35.507	4.426	0.000
ISY [A]	-124.322	-167.974	-133.333	-191.068	-75.598	-191.068	-97.827	-128.907	0.000
ITY [A]	-124.322	-135.710	-66.428	-124.163	-181.898	-124.163	-30.921	-62.002	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	33.333	0.000	0.000	33.333	-20.500	-2.555	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	33.333	0.000	0.000	33.333	-20.500	-2.555	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	-66.667	0.000	0.000	-66.667	-120.500	-102.555	0.000
IR Δ a [A]	0.000	0.000	50.000	0.000	0.000	50.000	50.000	50.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ a [A]	0.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	-28.868	0.000	0.000	-28.868	-122.109	-91.029	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	-35.507	-4.426	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	-28.868	0.000	0.000	-28.868	-122.109	-91.029	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	131.949	103.857	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	35.507	4.426	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	57.735	131.949	103.857	0.000
Id c [A]	100.000	100.000	115.470	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	159.549
Ii c [A]	31.004	46.188	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	0.000	31.004
Ih c [A]	38.490	11.547	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	38.490
Kni [%]	31.004	46.188	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	0.000	19.432
Knh [%]	38.490	11.547	0.000	0.000	57.735	0.000	0.000	0.000	24.124
Kpn	0.896	0.903	1.000	0.866	0.866	1.000	1.000	1.000	0.955
$\cos \phi_d$	1.000	1.000	0.866	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.627
Kp	0.896	0.903	0.866	0.866	0.866	1.000	1.000	1.000	0.599
ΣP [KW]	1.267	0.950	1.000	1.000	1.750	0.750	0.750	0.750	2.426
ΣQ_c [Kvar]	82.053	82.053	69.351	82.053	82.053	107.456	89.864	83.026	0.000
ΣQ_L [Kvar]	0.000	0.000	25.403	0.000	0.000	25.403	7.811	0.974	0.000

Fisier :4c14.tde

cos $\phi_m = 1.000$ cos $\phi_R = 1.000$ cos $\phi_S = 1.000$ cos $\phi_T = 1.000$

IR= 150.000-j 0.000 [A]

IS= 250.000-j 0.000 [A]

IT= 350.000-j 0.000 [A]

Regim Marime	a		b	c					sarcina necomp.
	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	
IRY [A]	0.000	34.641	0.000	57.735	-57.735	57.735	57.735	57.735	0.000
ISY [A]	0.000	-69.282	-173.205	-115.470	115.470	-115.470	-115.470	-115.470	0.000
ITY [A]	0.000	34.641	0.000	57.735	-57.735	57.735	57.735	57.735	0.000
IRS Δ [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	66.667	66.667	0.000
IST Δ [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	66.667	66.667	0.000
ITR Δ [A]	0.000	0.000	-133.333	0.000	0.000	-133.333	-133.333	-133.333	0.000
IR Δ a [A]	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	100.000	100.000	100.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
IT Δ a [A]	0.000	0.000	-100.000	0.000	0.000	-100.000	-100.000	-100.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-57.735	-57.735	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	115.470	115.470	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-57.735	-57.735	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	115.470	115.470	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	115.470	115.470	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	115.470	115.470	0.000
Id c [A]	250.000	250.000	256.580	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
Ii c [A]	57.735	92.376	0.000	115.470	0.000	0.000	0.000	0.000	57.735
Ih c [A]	57.735	23.094	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	0.000	57.735
Kni [%]	23.094	36.950	0.000	46.188	0.000	0.000	0.000	0.000	23.094
Knh [%]	23.094	9.238	0.000	0.000	46.188	0.000	0.000	0.000	23.094
Kpn	0.951	0.935	1.000	0.908	0.908	1.000	1.000	1.000	0.951
cos ϕ_d	1.000	1.000	0.974	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Kp	0.951	0.935	0.974	0.908	0.908	1.000	1.000	1.000	0.951
ΣP [KW]	5.938	5.488	4.937	5.688	8.688	4.688	4.688	4.688	5.938
ΣQ_c [Kvar]	0.000	15.242	88.912	25.403	25.403	76.210	76.210	76.210	0.000
ΣQ_L [Kvar]	0.000	15.242	50.807	25.403	25.403	76.210	76.210	76.210	0.000

Fisier :4c08.tde

cos ϕ_m = 0.600cos ϕ_R = 0.500cos ϕ_S = 0.600cos ϕ_T = 0.700

IR= 150.000-j 259.808 [A]

IS= 250.000-j 333.333 [A]

IT= 350.000-j 357.071 [A]

Regim Marime	a		b	c					sarcina necomp.
	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	
IRY [A]	-316.737	-225.167	0.000	-202.073	-317.543	-202.073	35.480	-43.704	0.000
ISY [A]	-316.737	-402.615	-246.731	-448.803	-217.863	-448.803	-211.250	-290.435	0.000
ITY [A]	-316.737	-322.430	-97.264	-299.336	-414.806	-299.336	-61.783	-140.968	0.000
IRS Δ [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	-70.485	-24.768	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	-70.485	-24.768	0.000
ITR Δ [A]	0.000	0.000	-133.333	0.000	0.000	-133.333	-270.485	-224.768	0.000
IRaa [A]	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	100.000	100.000	100.000	0.000
ISaa [A]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ITaa [A]	0.000	0.000	-100.000	0.000	0.000	-100.000	-100.000	-100.000	0.000
IRar [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-295.288	-216.104	0.000
ISar [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	-122.083	-42.899	0.000
ITar [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-295.288	-216.104	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	311.761	238.119	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	122.083	42.899	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	115.470	311.761	238.119	0.000
Id c [A]	250.000	250.000	321.455	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	403.513
Ii c [A]	56.854	92.376	0.000	115.470	0.000	0.000	0.000	0.000	56.854
Ih c [A]	71.754	23.094	0.000	0.000	115.470	0.000	0.000	0.000	71.754
Kni [%]	22.742	36.950	0.000	46.188	0.000	0.000	0.000	0.000	14.090
Knh [%]	28.702	9.238	0.000	0.000	46.188	0.000	0.000	0.000	17.782
Kpn	0.939	0.935	1.000	0.908	0.908	1.000	1.000	1.000	0.975
cos ϕ_d	1.000	1.000	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.620
Kp	0.939	0.935	0.778	0.908	0.908	1.000	1.000	1.000	0.604
ΣP [KW]	6.475	5.488	7.750	5.688	8.688	4.688	4.688	4.688	13.999
ΣQ_c [Kvar]	209.047	209.047	126.486	209.047	209.047	259.854	216.852	209.047	0.000
ΣQ_L [Kvar]	0.000	0.000	50.807	0.000	0.000	50.807	7.806	0.000	0.000

Fisier :4c15.tde

cos $\phi_m = 1.000$ cos $\phi_R = 1.000$ cos $\phi_S = 1.000$ cos $\phi_T = 1.000$

IR= 50.000-j 0.000 [A]

IS= 300.000-j 0.000 [A]

IT= 400.000-j 0.000 [A]

Regim Marime	a		b	c					sarcina necomp.
	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	
IRY [A]	0.000	34.641	0.000	57.735	-57.735	57.735	57.735	57.735	0.000
ISY [A]	0.000	-121.244	-259.808	-202.073	202.073	-202.073	-202.073	-202.073	0.000
ITY [A]	0.000	86.603	86.603	144.338	-144.338	144.338	144.338	144.338	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	166.667	0.000	0.000	166.667	166.667	166.667	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	66.667	66.667	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	-233.333	0.000	0.000	-233.333	-233.333	-233.333	0.000
IR Δ a [A]	0.000	0.000	200.000	0.000	0.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IT Δ a [A]	0.000	0.000	-150.000	0.000	0.000	-150.000	-150.000	-150.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-57.735	-57.735	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	202.073	0.000	0.000	202.073	202.073	202.073	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	-144.338	0.000	0.000	-144.338	-144.338	-144.338	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	208.167	208.167	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	208.167	208.167	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	208.167	208.167	0.000
Id c [A]	250.000	250.000	256.580	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
Ii c [A]	104.083	166.533	0.000	208.167	0.000	0.000	0.000	0.000	104.083
Ih c [A]	104.083	41.633	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	0.000	104.083
Kni [%]	41.633	66.613	0.000	83.267	0.000	0.000	0.000	0.000	41.633
Knh [%]	41.633	16.653	0.000	0.000	83.267	0.000	0.000	0.000	41.633
Kpn	0.862	0.824	1.000	0.768	0.768	1.000	1.000	1.000	0.862
cos ϕ_d	1.000	1.000	0.974	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Kp	0.862	0.824	0.974	0.768	0.768	1.000	1.000	1.000	0.862
ΣP [KW]	8.750	7.287	4.937	7.938	17.688	4.688	4.688	4.688	8.750
ΣQc [Kvar]	0.000	26.674	146.070	44.456	44.456	133.368	133.368	133.368	0.000
ΣQL [Kvar]	0.000	26.674	107.965	44.456	44.456	133.368	133.368	133.368	0.000

Fisier :4cl7.tde

cos φm = 0.600

cos φR = 0.600

cos φS = 0.700

cos φT = 0.500

IR= 50.000-j 66.667 [A]

IS= 300.000-j 306.061 [A]

IT= 400.000-j 692.820 [A]

Regim	a		b	c					sarcina
Marime	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	necomp.
IRY [A]	-355.183	-32.026	0.000	-8.932	-124.402	-8.932	257.455	168.660	0.000
ISY [A]	-355.183	-427.305	-499.202	-508.134	-103.989	-508.134	-241.747	-330.542	0.000
ITY [A]	-355.183	-606.218	-539.551	-548.483	-837.158	-548.483	-282.096	-370.891	0.000
IRS _A [A]	0.000	0.000	166.667	0.000	0.000	166.667	12.868	64.134	0.000
IST _A [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	-87.132	-35.866	0.000
ITR _A [A]	0.000	0.000	-233.333	0.000	0.000	-233.333	-387.132	-335.866	0.000
IR _{aa} [A]	0.000	0.000	200.000	0.000	0.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS _{aa} [A]	0.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IT _{aa} [A]	0.000	0.000	-150.000	0.000	0.000	-150.000	-150.000	-150.000	0.000
IR _{ar} [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-324.122	-235.326	0.000
IS _{ar} [A]	0.000	0.000	202.073	0.000	0.000	202.073	-64.314	24.481	0.000
IT _{ar} [A]	0.000	0.000	-144.338	0.000	0.000	-144.338	-410.725	-321.929	0.000
IR _A [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	380.861	308.834	0.000
IS _A [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	81.464	55.672	0.000
IT _A [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	437.258	355.159	0.000
Id c [A]	250.000	250.000	250.159	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	434.344
Ii c [A]	241.060	166.533	0.000	208.167	0.000	0.000	0.000	0.000	241.060
Ih c [A]	173.517	41.633	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	0.000	173.517
Kni [%]	96.424	66.613	0.000	83.267	0.000	0.000	0.000	0.000	55.500
Knh [%]	69.407	16.653	0.000	0.000	83.267	0.000	0.000	0.000	39.949
Kpn	0.644	0.824	1.000	0.768	0.768	1.000	1.000	1.000	0.825
cos φd	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.576
Kp	0.644	0.824	0.999	0.768	0.768	1.000	1.000	1.000	0.475
ΣP [KW]	18.078	7.287	4.693	7.938	17.688	4.688	4.688	4.688	27.540
ΣQc [Kvar]	234.421	234.421	317.438	234.421	234.421	323.333	295.964	295.964	0.000
ΣQL [Kvar]	0.000	0.000	88.912	0.000	0.000	88.912	61.544	61.544	0.000

Fisier :4c19.tde

cos ϕ_m = 0.600cos ϕ_R = 0.400cos ϕ_S = 0.600cos ϕ_T = 0.800

IR= 50.000-j 114.564 [A]

IS= 300.000-j 400.000 [A]

IT= 400.000-j 300.000 [A]

Regim Marime	a		b	c					sarcina
	a1	a2		c1	c2	c3-1	c3-2	c3-3	necomp.
IRY [A]	-271.521	-79.923	0.000	-56.829	-172.299	-56.829	146.812	78.931	0.000
ISY [A]	-271.521	-521.244	-545.243	-602.073	-197.927	-602.073	-398.431	-466.312	0.000
ITY [A]	-271.521	-213.397	-98.833	-155.662	-444.338	-155.662	47.979	-19.902	0.000
IRS Δ [A]	0.000	0.000	166.667	0.000	0.000	166.667	49.094	88.285	0.000
IST Δ [A]	0.000	0.000	66.667	0.000	0.000	66.667	-50.906	-11.715	0.000
ITR Δ [A]	0.000	0.000	-233.333	0.000	0.000	-233.333	-350.906	-311.715	0.000
IR Δ a [A]	0.000	0.000	200.000	0.000	0.000	200.000	200.000	200.000	0.000
IS Δ a [A]	0.000	0.000	-50.000	0.000	0.000	-50.000	-50.000	-50.000	0.000
IT Δ a [A]	0.000	0.000	-150.000	0.000	0.000	-150.000	-150.000	-150.000	0.000
IR Δ r [A]	0.000	0.000	-57.735	0.000	0.000	-57.735	-261.376	-193.496	0.000
IS Δ r [A]	0.000	0.000	202.073	0.000	0.000	202.073	-1.569	66.312	0.000
IT Δ r [A]	0.000	0.000	-144.338	0.000	0.000	-144.338	-347.979	-280.098	0.000
IR Δ [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	329.116	278.282	0.000
IS Δ [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	50.025	83.050	0.000
IT Δ [A]	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	208.167	378.932	317.734	0.000
Id c [A]	250.000	250.000	256.378	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	369.085
Ii c [A]	86.724	166.533	0.000	208.167	0.000	0.000	0.000	0.000	86.724
Ih c [A]	167.720	41.633	0.000	0.000	208.167	0.000	0.000	0.000	167.720
Kni [%]	34.690	66.613	0.000	83.267	0.000	0.000	0.000	0.000	23.497
Knh [%]	67.088	16.653	0.000	0.000	83.267	0.000	0.000	0.000	45.442
Kpn	0.798	0.824	1.000	0.768	0.768	1.000	1.000	1.000	0.890
cos ϕ_d	1.000	1.000	0.975	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.677
Kp	0.798	0.824	0.975	0.768	0.768	1.000	1.000	1.000	0.603
ΣP [kW]	13.691	7.287	4.930	7.938	17.688	4.688	4.688	4.688	19.220
ΣQ_c [Kvar]	179.204	179.204	230.609	179.204	179.204	268.116	240.766	230.210	0.000
ΣQ_L [Kvar]	0.000	0.000	88.912	0.000	0.000	88.912	61.561	51.006	0.000

Susceptanțe variabile realizate cu dispozitive de comutație statică

A10.1 Introducere

În capitolele 3 și 4 ale prezentei lucrări au fost stabilite relațiile de calcul pentru dimensionarea susceptanțelor ce intră în componența compensatoarelor : Δ pentru rețele trifazate cu trei conductoare, Δ și Y pentru rețelele cu patru conductoare. Valoarea și caracterul lor (inductiv sau capacitiv) depind de valorile și caracterul curenților pe cele trei faze ale sarcinii. Însă în fiecare moment aceștia se modifică, deci sunt necesare alte valori pentru susceptanțele de compensare. De aici ideea, ca pe baza relațiilor stabilite pentru calculul susceptanțelor de compensare, să se realizeze o compensare *on-line*. Elementele de execuție ale unui sistem automat construit în acest scop îl constituie susceptanțele variabile care, pentru a putea permite urmărirea cât mai fidelă a variației sarcinii, trebuie să aibă drept caracteristici principale, următoarele :

- *reglajul continuu al valorii susceptanței;*
- *viteza foarte mare a reglajului pentru ca acesta să poată fi adaptat variațiilor sarcinii.*

Soluția actuală folosită pentru realizarea unor astfel de susceptanțe, constă în utilizarea metodelor și mijloacelor oferite de electronica de putere. Mai precis, este vorba pe scurt despre un dispozitiv cu comutație statică (realizat de exemplu cu tiristoare), înseriat cu bobine și/sau condensatoare de susceptanță fixă. Având posibilitatea de conducție sau de blocare, tiristoarele permit modificarea poziției în timp și a valorilor efective ale undelor de curent care le parcurg, modificând astfel, în fapt, valoarea și caracterul susceptanței echivalente ale acestui ansamblu ([28]).

Accastă soluție este deja folosită pe scară largă în sistemele electroenergetice ale țărilor industrializate în special în cadrul compensatoarelor transversale (șunt) de putere reactivă ([42], [51], [55], [73]). Reglajul aplicat este însă unul trifazat. Odată cu creșterea performanțelor echipamentelor de calcul și electronică de putere, se pune tot mai frecvent problema realizării unui reglaj independent pe faze ([44], [47], [48]), ceea ce face posibilă acțiunea compensatoarelor și cu scopul echilibrării on-line a sarcinii rețelelor ([90]). Aplicația : intervenția asupra consumatorilor care produc cele mai mari probleme în rețelele electrice de distribuție în ceea ce privește calitatea energiei electrice vehiculate : tracțiunea electrică feroviară și urbană, echipamentele de sudură electrică, cuptoarele electrice cu arc sau inductie, etc, ([68], [69], [72]).

În această anexă sunt prezentate elementele principale legate de construcția și funcționarea unei susceptanțe variabile, care a fost de altfel construită și aplicată apoi în cadrul experimentelor prezentate în capitolul al cincilea. Susceptanțele au fost reglate manual, interesând aspectele energetice ale utilizării lor. Un sistem de reglare automată on-line poate constitui el însuși obiectul unei teze de doctorat.

A10.2. Elementul monofazat. Principii

Curentul ce traversează tiristorul are amplitudinea și forma determinate de către circuitul electric stabilit prin închiderea întreruptorului electronic. Dar folosirea de semiconductoare de putere impune respectarea unor restricții de tensiune și de curent, între care cele legate de limitările asupra amplitudinii și variației în timp a curentului (di/dt) sunt esențiale.

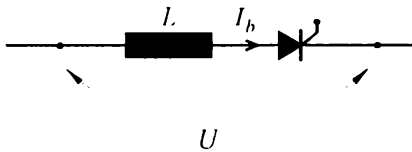


Fig. A10.1. Element monofazat.

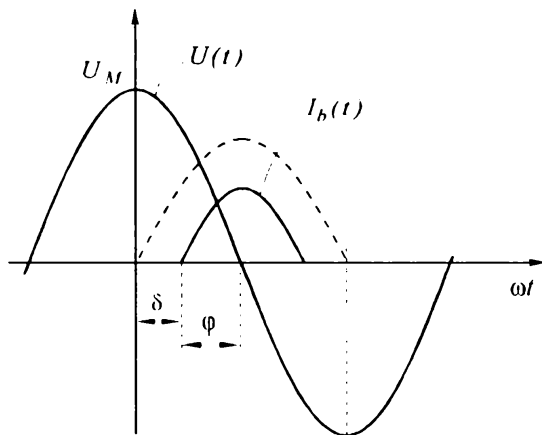


Fig. A10.2. Tensiunea și curentul pentru elementul monofazat.

Aceste câteva considerații au dus la asocierea în serie a unei bobine și a unui tiristor (fig. A10.1.). Un astfel de element va fi conectat la tensiunea alternativă a rețelei. Reglând unghiul de aprindere al tiristorului se modifică curentul ce-l traversează. Figura A10.2. prezintă alura acestui curent pentru un unghi de aprindere oarecare. Aceeași figură permite de asemenea precizarea diferitelor notații folosite:

$$U(t) = U_M \cos \omega t$$

$$I_b(t) = I_T(t) = \frac{U_M}{L\omega} (\sin \omega t - \sin \delta) = \frac{U_M}{L\omega} (\sin \omega t - \cos \varphi)$$

(A10.1)

Condițiile de aprindere a tiristorului impun:

$$0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} \quad \text{sau} \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{A10.2})$$

În această configurație rolul bobinei este triplu ([28]):

- limitarea gradientilor di/dt și amplitudinile curenților prin tiristor, asigurând deci în acest fel protecția în curent;
- obținerea simetriei undei de curent în raport cu trecerea prin zero a tensiunii (ceea ce, după cum se va vedea în continuare, este esențial pentru diminuarea coeficientului de distorsiune armonică);
- folosirea stingerii naturale a tiristorului, ceea ce limitează numărul de elemente semiconductoare și simplifică comanda.

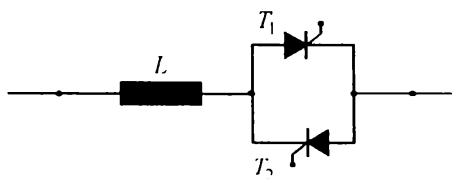


Fig. A10.3. Structura elementului monofazat bidirecțional.

Conectarea la rețea a unui astfel de element unidirecțional, ca cel descris mai sus, va conduce la apariția unei componente continue în curentul rezultat, inadmisibilă. Soluția constă în conectarea în paralel a unui ansamblu identic care să funcționeze cu un decalaj de π în raport cu primul (în a doua semiperioadă), sau a unui tiristor în antiparalel cu primul, ceea ce va măări totodată și factorul de utilizare al bobinei.

A10.3. Dimensionare. Protecții

Dimensionarea bobinei va depinde de aplicația pentru care se folosește susceptanța variabilă. Valoarea reactanței inductive a bobinei impune în primul rând amplitudinea curentului maxim prin tiristor $U_M/L\omega$.

Fundamentală a curentului inductiv al curentului pe care îl poate produce ansamblul monofazat este de asemenea direct legată de valoarea lui L .

Expresiile pentru valorile medii și efective ale curentului prin tiristor sunt următoarele:

$$I_{Tmed} = \frac{1}{2\pi} \frac{U_M}{L\omega} \cdot 2(\sin\varphi - \varphi \cos\varphi) \quad (\Lambda 10.3)$$

$$I_T = \frac{1}{2\pi} \frac{U_M}{L\omega} \sqrt{-\frac{3}{2} \sin 2\varphi - 2\varphi \left(\frac{1}{2} - \cos^2 \varphi\right)} \quad (\Lambda 10.4)$$

Aceste mărimi, importante pentru alegerea tiristoarelor, depind și ele de L , dar variază în plus în funcție de unghiul de conducție φ . Figura $\Lambda 10.4$. reprezintă variațiile acestor două mărimi, în procente din valoarea amplitudinii curentului maxim, în funcție de φ .

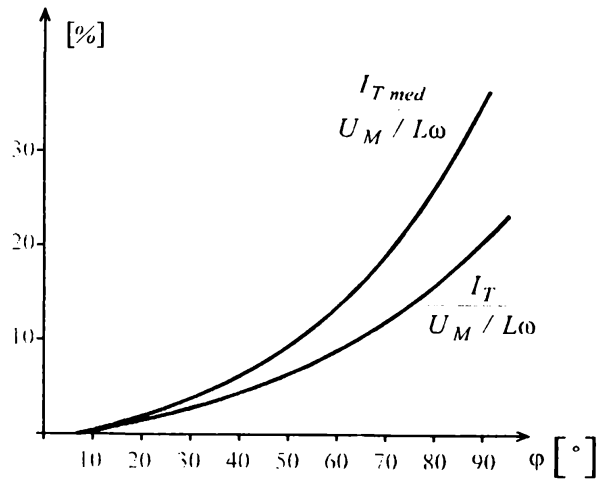


Fig. $\Lambda 10.4$. Curentul mediu și curentul efectiv prin tiristoare.

La bornele tiristoarelor este necesară însă și montarea unui circuit serie RC pentru protecția împotriva supratensiunilor de comutație ce pot apărea în momentul stingerii tiristoarelor. Pentru ca oscilațiile să fie amortizate în mod satisfăcător, se impune montarea unui circuit RC suplimentar la bornele bobinei.

Dar, așa cum s-a constatat în capitolele 3 și 4, în funcție de dezechilibrul sarcinii, susceptanțele de compensare pot rezulta capacitive sau inductive. Trecerea unei susceptanțe variabile din inductiv în capacitive se face prin adăugarea la structura monofazată prezentată anterior, a unui condensator în paralel (fig. $\Lambda 10.5$)

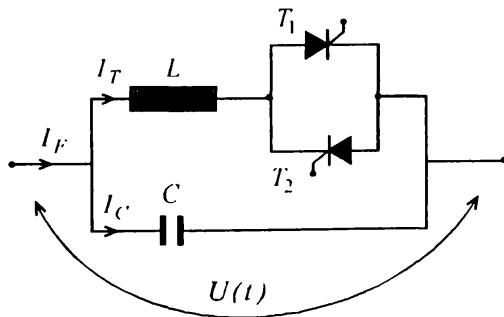


Fig. $\Lambda 10.5$. Structura monofazată a unei susceptanțe variabile cu dublu caracter

Curentul prin condensator este aproximativ constant, având valoarea efectivă:

$$I_C = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \cdot \omega C \quad (\Lambda 10.5)$$

Caracterul curentului total al structurii monofazate:

$$I_F = I_T - I_C \quad (\Lambda 10.6)$$

va determina deci caracterul susceptanței echivalente

$$B = \frac{I_F}{U_M \sqrt{2}} \quad (\Lambda 10.7)$$

și anume : inductiv dacă $B > 0$, $I_F > 0$, $I_T > I_C$ sau capacitiv dacă $B < 0$, $I_F < 0$, $I_T < I_C$. Reglajul se realizează prin reglarea unghiului de aprindere a tiristoarelor. Când $\delta = 0$ ($\varphi = 90^\circ$) se va obține curentul inductiv de valoare efectivă maximă. Valorile L , C trebuie astfel alese încât curentul rezultat să aibe caracter inductiv și valoarea maximă necesară pentru compensare să corespundă susceptanței inductive maxime de care este nevoie pentru compensare).

Se observă ușor că din această condiție rezultă $\omega L < \frac{1}{\omega C}$. Crescând unghiul de aprindere a tiristoarelor δ , I_T scade. Când $\delta = \pi/2$ ($\varphi = 0$ unghiul maxim pentru care se poate asigura aprinderea tiristoarelor) $I_T = 0$, $I_F = -I_C$. Curentul rezultat va fi chiar curentul prin capacitatea C.

Dimensionarea acesteia se face deci astfel încât I_C să corespundă curentului capacitiv maxim necesar pentru compensare (susceptanței capacitive maxime necesare) pentru latura respectivă a compensatorului.

Procesul de control al tiristoarelor și modificarea curenților în interiorul structurii monofazate idealizate în funcție de unghiul de aprindere al tiristoarelor (δ crește de la 0° la 90°) este prezentat în figura A10.6.

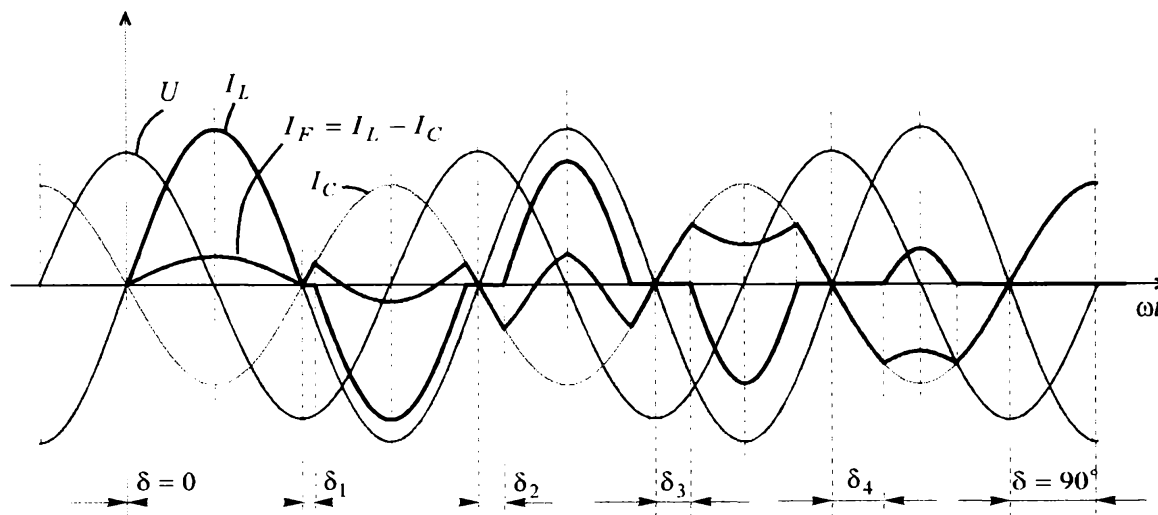


Fig. A10.6. Procesul de modificare al caracterului și mărimii susceptanței în structură monofazată, în funcție de unghiul de aprindere al tiristoarelor.

Viteza de variație a susceptanțelor obținută cu o astfel de structură este foarte mare, ceea ce o face deosebit de utilă pentru un reglaj automat eficient. Curentul total printr-un astfel de element poate fi schimbat de la valoarea maximă inductivă la valoarea maximă capacitivă sau invers, în mai puțin de o jumătate de perioadă.

A10.4. Ansamblu trifazat

Pentru compensarea puterii reactive în rețelele electrice trifazate echilibrate sau dezechilibrate, structura monofazată a susceptanței variabile cu dublu caracter prezentată mai sus, se va regăsi pe fiecare latură a compensatoarelor în configurație Y sau Δ , folosite pentru compensare simetrică (în cazul îmbunătățirii numai a factorului de putere) sau asimetrică (dacă se urmărește în plus echilibrarea fazelor rețelei), după cum s-a arătat în capitolul precedent.

Iată deci o primă dezvoltare (fig. A10.7) a schemelor compensatoarelor trifazate pentru reglarea factorului de putere și echilibrarea sarcinii într-o rețea ce alimentează un consumator dezechilibrat oarecare (considerat într-o primă etapă liniar).

Reglajul continuu al unghiului de aprindere al tiristoarelor, simultan sau independent pe cele trei faze, poate fi rezultatul acțiunii unui regulator automat al cărui scop este acela de a realiza în fiecare moment un factor de putere al ansamblului consumator-compensator de o valoare bine precizată și/sau o echilibrare a sarcinii fazelor rețelei de alimentare.

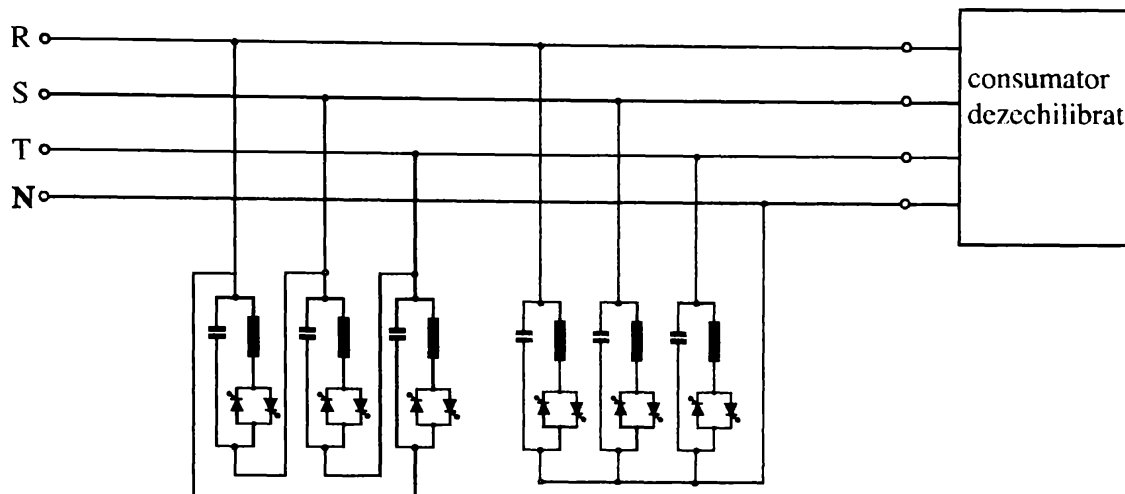


Fig. A10.7. Compensatoare trifazate în configurație Δ și/sau Y pentru rețele cu trei și/sau patru conductoare.

Se obține astfel un regulator de putere reactivă care în literatura de specialitate este întâlnit sub denumirea de Adaptive Var Compensator (AVC - Compensator adaptabil (flexibil) de putere reactivă [47], [48], [90]).

A10.5 Aplicație

Experimentele prezentate în capitolul 5 al prezentei lucrări, au urmărit atât verificarea modelului matematic al echilibrării unei rețele trifazate cu trei respectiv patru conductoare, prin compensare transversală cât și studierea implicațiilor energetice ale funcționării unui compensator cu susceptanțe variabile, realizat cu tiristoare, de tipul celui descris mai sus.

Deoarece susceptanțele compensatorului sunt reglate individual, pentru fiecare pereche de tiristoare corespunzătoare acestora, s-a realizat o instalație care să permită reglarea unghiului de aprindere. Schema electrică a acestei instalații cuprinde în principal un circuit specializat pentru comanda tiristoarelor și altele pentru sincronizarea acestei comenzi cu tensiunea rețelei și protecția tiristoarelor împotriva supratensiunilor rezultate în timpul procesului de comutație .

Schema folosită pentru o pereche de tiristori se prezintă în figura A10.8.

Elementele acestei instalații și câteva dintre parametrii caracteristici sunt :

T_1 , T_2 - tiristoare tip BT 151 , 600 V, 12 A ;

T - transformator pentru alimentarea modului de comandă al tiristoarelor, care are în același timp și funcția de sincronizare cu tensiunea circuitului de forță.

$$U_{n1}/U_{n2} = 220/18V ; S_n = 12VA ;$$

MC - circuit specializat pentru comanda aprinderii tiristoarelor și reglajul acestora - tip FC11AL (fabricație United Automation Ltd.) - transmite semnale sub formă de impulsuri la cele două grile ale tiristoarelor G_1 și G_2 . Caracteristici principale :

- tensiunea aplicată tiristoarelor : 110÷550 V (50/60 Hz) ;
- curent nominal de ieșire pentru comandă : 0,8 A ;
- rezistența de intrare a semnalului : $5000\Omega \pm 20\%$;
- ieșire izolată prin optocuplor; tensiunea de izolație : 5000 V ;

- reglajul punctului de zero al semnalului : $0 \div 30\%$ din domeniu ;
rata dv/dt : $100V/\mu s$;
- alimentare de intrare : $18V \pm 15\%$, $65mA$;

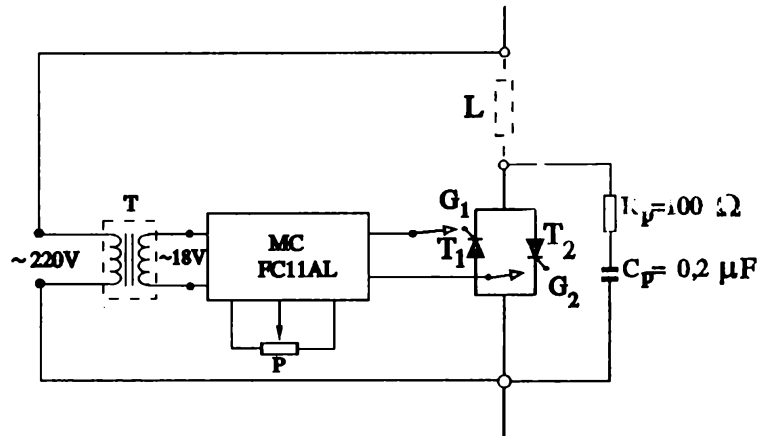
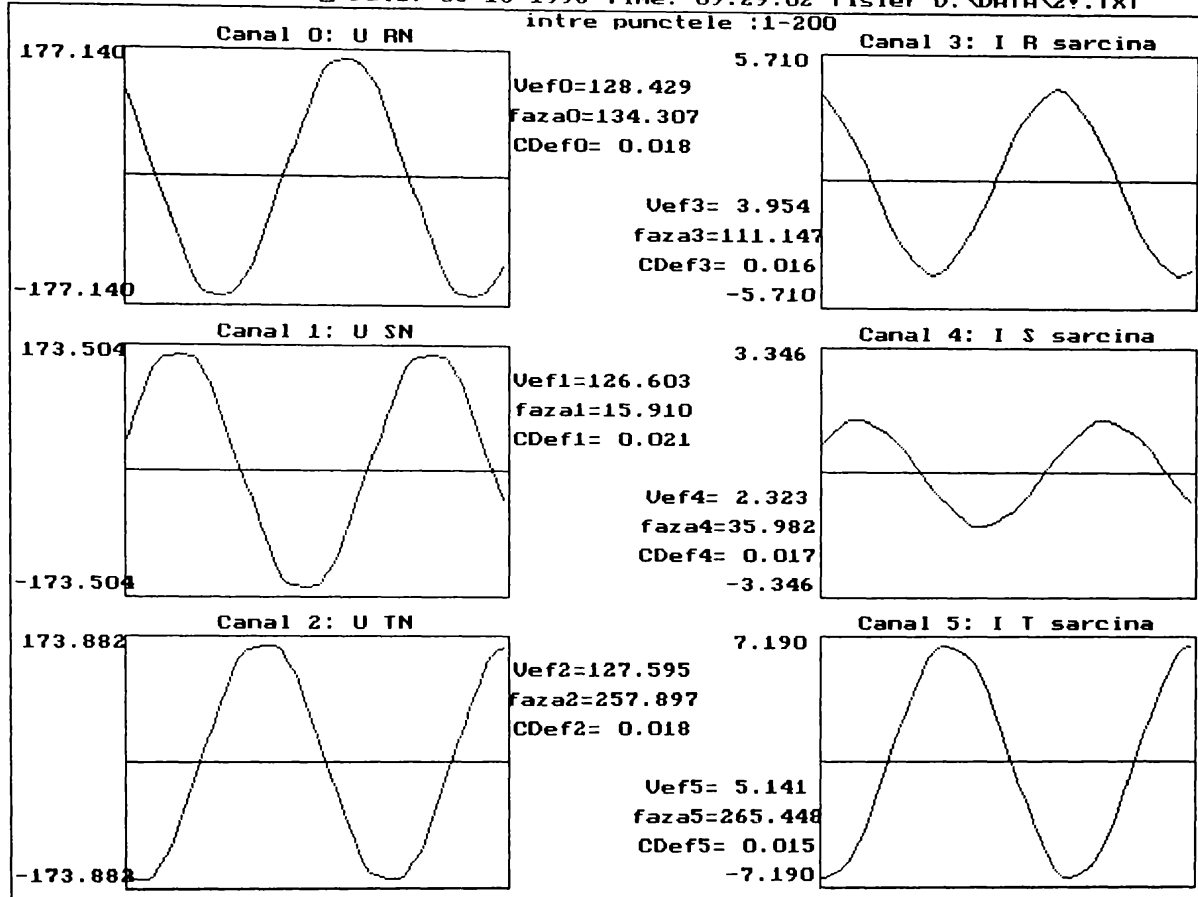


Fig. A10.8. Schema electrică a instalației pentru comanda și protecția tiristoarelor

- P - potențiomtru ($R = 5\text{ k}\Omega$) pentru reglarea unghiului de aprindere a tiristoarelor ;
- R_p , C_p - circuit serie pentru realizarea protecției tiristoarelor la supratensiuni de comutație;
- L - sarcina inductivă, rezistivă sau mixtă înseriată cu tiristoarele în circuitul de forță.

ANEXA 11

Rezultatele experimentului 1



Regim nesimetric

t.f.&c.f.sarcina

UR = 128.4291 V	faza 134.3071°	URS = 219.0611 V	faza 344.8637°	Uh = 1.8685 V	faza 19.2809°
US = 126.6026 V	faza 15.9096°	UST = 217.9050 V	faza 227.0374°	Ud = 127.5001 V	faza 136.0343°
UT = 127.5945 V	faza 257.8965°	UTR = 225.6238 V	faza 106.2020°	Ui = 2.7895 V	faza 83.8899°

IR = 3.9540 A	faza 111.1466°	IR* = 3.9540 A	faza 23.1604°	IR* = 3.6353 - j 1.5551 A
IS = 2.3230 A	faza 35.9818°	IS* = 2.3230 A	faza -20.0722°	IS* = 2.1819 + j 0.7973 A
IT = 5.1405 A	faza 265.4482°	IT* = 5.1405 A	faza -7.5517°	IT* = 5.0960 + j 0.6756 A

Ih = 0.0283 A	faza 302.3119°	Ih* = 0.0283 A	faza 76.9690°	Ih* = 0.0064 - j 0.0276 A
Id = 3.6139 A	faza 135.8722°	Id* = 3.6139 A	faza 0.1621°	Id* = 3.6139 - j 0.0102 A
Ii = 1.6605 A	faza 46.0477°	Ii* = 1.6605 A	faza 37.8423°	Ii* = 1.3113 - j 1.0187 A

knsOu = 0.01465	knsOi = 0.00783
kns2u = 0.02188	kns2i = 0.45947
knsu = 0.03653	knsi = 0.46730
rnu = 0.98578	rni = 0.98578

PR = 466.8809 W	QR = 199.7240 var	Ph = 0.0358 W	Qh = 0.1546 var
PS = 276.2334 W	QS = -100.9352 var	Pd = 1382.3208 W	Qd = 3.9097 var
PT = 650.2158 W	QT = -86.1995 var	Pi = 10.9736 W	Qi = 8.5249 var
Pt = 1393.3301 W	Qt = 12.5892 var		

D:\DATA\2!.TXT

D:\DATA\2!.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R sarcina

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	128.37572	3.95216	26.31925	454.76697	224.95002
2	0.36496	0.01526	-151.05393	-0.00487	-0.00270
3	0.30293	0.02347	-76.44271	0.00167	-0.00691
4	0.10544	0.00449	163.74344	-0.00045	0.00013
5	3.47820	0.08579	-22.42538	0.27583	-0.11383
6	0.11187	0.00516	-202.24528	-0.00053	0.00022
7	0.59834	0.02334	46.29510	0.00965	0.01009
8	0.04027	0.00330	-190.82211	-0.00013	0.00002
9	0.47495	0.00221	0.51844	0.00105	0.00001
10	0.05372	0.00130	-204.91059	-0.00006	0.00003
11	0.36353	0.00777	5.85423	0.00281	0.00029
12	0.02848	0.00360	-130.36640	-0.00007	-0.00008
13	0.36188	0.02020	-290.70751	0.00259	0.00684
14	0.03602	0.00039	-137.04639	-0.00001	-0.00001
15	0.14953	0.00255	-27.93220	0.00034	-0.00018
16	0.03543	0.00024	-152.03257	-0.00001	-0.00000
17	0.45115	0.01392	7.09067	0.00623	0.00078
18	0.03959	0.00351	-131.36195	-0.00009	-0.00010
19	0.25613	0.00965	-312.49498	0.00167	0.00182
20	0.01019	0.00069	-202.00358	-0.00001	0.00000
21	0.15286	0.00258	-71.73255	0.00012	-0.00037
22	0.01094	0.00098	-74.81155	0.00000	-0.00001
23	0.12443	0.00265	43.65924	0.00024	0.00023
24	0.02404	0.00143	-177.59131	-0.00003	-0.00000
25	0.09392	0.00356	60.04995	0.00017	0.00029
26	0.02210	0.00063	-269.31026	-0.00000	0.00001
27	0.04535	0.00041	-167.49929	-0.00002	-0.00000
28	0.03389	0.00126	-18.36330	0.00004	-0.00001
29	0.08188	0.00139	63.96940	0.00005	0.00010
30	0.02141	0.00044	-196.89581	-0.00001	0.00000
31	0.01895	0.00065	-165.46773	-0.00001	-0.00000
32	0.01086	0.00030	-182.47313	-0.00000	0.00000
33	0.02765	0.00052	-180.32458	-0.00001	0.00000
34	0.02327	0.00085	-164.07982	-0.00002	-0.00001
35	0.02864	0.00109	-251.35486	-0.00001	0.00003
36	0.02309	0.00055	-161.00183	-0.00001	-0.00000
37	0.01522	0.00049	-157.79930	-0.00001	-0.00000
38	0.00802	0.00085	-169.11284	-0.00001	-0.00000
39	0.01175	0.00060	-128.64001	-0.00000	-0.00001
40	0.01728	0.00039	-155.27947	-0.00001	-0.00000

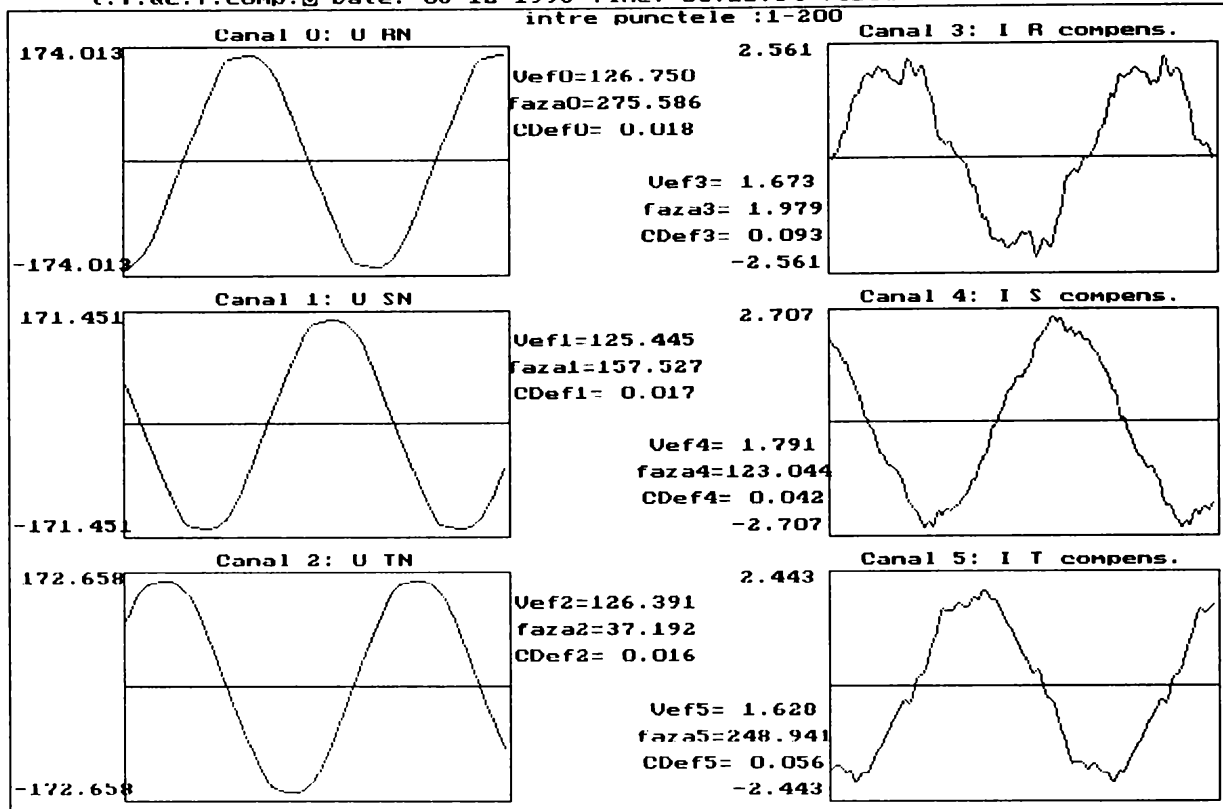
Puterea aparenta : S = 507.7096 VA
 Puterea activa: P = 455.0630 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.2961 W
 Puterea reactiva: Q = 224.8467 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.1033 var
 Puterea deformanta: D = 11.4315 vad

D:\DATA\2!.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S sarcina

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.52735	2.32197	-17.49043	280.21042	-88.29856
2	0.89067	0.00722	183.66533	-0.00641	-0.00041
3	0.31325	0.01180	151.69255	-0.00325	0.00175
4	0.41059	0.00803	100.47381	-0.00060	0.00324
5	3.88658	0.05935	29.59491	0.20059	0.11393
6	0.41365	0.00124	50.39191	0.00033	0.00039
7	0.84799	0.01552	2.34293	0.01315	0.00054
8	0.12563	0.00025	-151.59649	-0.00003	-0.00001
9	0.30010	0.00295	-153.17715	-0.00079	-0.00040
10	0.18342	0.00039	91.25034	-0.00000	0.00007
11	0.28021	0.00237	39.39711	0.00051	0.00042
12	0.10838	0.00057	138.01086	-0.00005	0.00004
13	0.58205	0.01592	-3.06735	0.00926	-0.00050
14	0.17643	0.00100	-141.76811	-0.00014	-0.00011
15	0.30949	0.00267	55.35339	0.00047	0.00068
16	0.14798	0.00090	-45.88947	0.00009	-0.00010
17	0.82168	0.01021	62.81106	0.00383	0.00746
18	0.08429	0.00056	107.23187	-0.00001	0.00005
19	0.21729	0.00491	25.30530	0.00096	0.00046
20	0.07794	0.00027	-167.50425	-0.00002	-0.00000
21	0.13049	0.00081	-178.33359	-0.00011	-0.00000
22	0.04156	0.00046	125.06301	-0.00001	0.00002
23	0.08478	0.00160	20.09197	0.00013	0.00005
24	0.07598	0.00016	-128.39247	-0.00001	-0.00001
25	0.13570	0.00185	29.21485	0.00022	0.00012
26	0.03954	0.00020	-57.93452	0.00000	-0.00001
27	0.02914	0.00013	-162.20884	-0.00000	-0.00000
28	0.07533	0.00061	95.02216	-0.00000	0.00005
29	0.05063	0.00072	6.32250	0.00004	0.00000
30	0.01569	0.00012	-51.60904	0.00000	-0.00000
31	0.04381	0.00073	-43.78293	0.00002	-0.00002
32	0.04481	0.00012	-22.17627	0.00001	-0.00000
33	0.03840	0.00033	-175.13207	-0.00001	-0.00000
34	0.04594	0.00020	115.18900	-0.00000	0.00001
35	0.07231	0.00065	75.84323	0.00001	0.00005
36	0.02561	0.00005	65.15243	0.00000	0.00000
37	0.03105	0.00028	-10.42671	0.00001	-0.00000
38	0.03750	0.00039	174.88047	-0.00001	0.00000
39	0.03315	0.00005	78.39596	0.00000	0.00000
40	0.03829	0.00016	-146.62205	-0.00001	-0.00000

Puterea aparenta : S = 294.0735 VA
 Puterea activa: P = 280.4286 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.2182 W
 Puterea reactiva: Q = -88.1708 var $\bar{\sigma}$ Qk = 0.1277 var
 Puterea deformanta: D = 8.0588 vad



Regim nesimetric t.f.&c.f.comp.

UR = 126.7498 V faza 275.5865° URS = 216.2413 V faza 126.3787° Uh = 1.1352 V faza 211.8132°
 US = 125.4446 V faza 157.5269° UST = 218.4641 V faza 7.4828° Ud = 126.1814 V faza 276.7654°
 UT = 126.3912 V faza 37.1917° UTR = 220.9780 V faza 246.4344° Ui = 1.5805 V faza 188.9755°

IR = 1.6735 A faza 1.9792° IR* = 1.6735 A faza -86.3927° IR* = 0.1053 + j 1.6701 A
 IS = 1.7910 A faza 123.0443° IS* = 1.7910 A faza 34.4827° IS* = 1.4763 - j 1.0140 A
 IT = 1.6280 A faza 248.9415° IT* = 1.6280 A faza 148.2502° IT* = -1.3844 - j 0.8567 A

Ih = 0.0393 A faza 19.7334° Ih* = 0.0393 A faza -167.9201° Ih* = -0.0384 + j 0.0082 A
 Id = 0.1057 A faza 239.1513° Id* = 0.1057 A faza 37.6141° Id* = 0.0838 - j 0.0645 A
 Ii = 1.6951 A faza 4.5786° Ii* = 1.6951 A faza -175.6031° Ii* = -1.6901 + j 0.1300 A

kns0u = 0.00900 kns0i = 0.37134
 kns2u = 0.01253 kns2i = 16.03149
 knsu = 0.02152 knsi = 16.40283
 rnu = 0.98970 rni = 0.98970

PR = 13.3455 W QR = -211.6893 var Ph = -0.1308 W Qh = -0.0280 var
 PS = 185.1927 W QS = 127.1970 var Pd = 31.7063 W Qd = 24.4296 var
 PT = -174.9765 W QT = 108.2778 var Pi = -8.0138 W Qi = -0.6162 var
 Pt = 23.5618 W Qt = 23.7854 var

D:\DATA\4!.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R compens.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.67611	1.65309	-83.19144	24.82563	-207.92977
2	0.54383	0.01132	-75.63599	0.00153	-0.00597
3	0.57718	0.01918	86.45145	0.00069	0.01105
4	0.22488	0.01170	-82.06791	0.00036	-0.00261
5	3.33711	0.22206	-83.52261	0.08360	-0.73632
6	0.03376	0.00121	273.18536	0.00000	-0.00004
7	0.92726	0.06798	-63.67704	0.02795	-0.05650
8	0.04026	0.00404	234.86904	-0.00009	-0.00013
9	0.58642	0.00160	-16.31805	0.00090	-0.00026
10	0.01994	0.00307	-61.31973	0.00003	-0.00005
11	0.40454	0.05686	-78.01223	0.00478	-0.02250
12	0.04516	0.00631	-65.13503	0.00012	-0.00026
13	0.34092	0.05197	-67.42046	0.00680	-0.01636
14	0.01856	0.00311	-54.57438	0.00003	-0.00005
15	0.24128	0.01310	-70.27687	0.00107	-0.00298
16	0.01836	0.00077	21.16044	0.00001	0.00001
17	0.08309	0.02638	304.62935	0.00125	-0.00180
18	0.02059	0.00500	-11.84396	0.00010	-0.00002
19	0.20875	0.05246	-21.48523	0.01019	-0.00401
20	0.02110	0.00218	-49.92353	0.00003	-0.00004
21	0.07340	0.00293	111.11422	-0.00008	0.00020
22	0.01912	0.00572	-19.40016	0.00010	-0.00004
23	0.07633	0.04068	326.73066	0.00260	-0.00170
24	0.00466	0.00520	112.16615	-0.00001	0.00002
25	0.01987	0.00454	-4.63437	0.00009	-0.00001
26	0.01304	0.00657	-6.84966	0.00009	-0.00001
27	0.03399	0.00436	-45.29403	0.00010	-0.00011
28	0.00539	0.00681	47.05311	0.00003	0.00003
29	0.05689	0.03403	-9.49316	0.00191	-0.00032
30	0.01029	0.00458	-31.86417	0.00004	-0.00002
31	0.02672	0.00572	-78.21819	0.00003	-0.00015
32	0.00640	0.00184	100.81722	-0.00000	0.00001
33	0.02781	0.00539	-123.49783	-0.00008	-0.00013
34	0.01084	0.00159	-32.76407	0.00001	-0.00001
35	0.02116	0.00375	-129.41961	-0.00005	-0.00006
36	0.00578	0.00370	216.13839	-0.00002	-0.00001
37	0.02438	0.00926	-16.27717	0.00022	-0.00006
38	0.02372	0.00035	-93.26121	-0.00000	-0.00001
39	0.01266	0.00363	70.02448	0.00002	0.00004
40	0.00693	0.00033	214.30753	-0.00000	-0.00000

Puterea aparenta : S = 210.2957 VA
 Puterea activa: P = 24.9700 W δ Pk = 0.1443 W
 Puterea reactiva: Q = -208.7709 var δ Qk = -0.8412 var
 Puterea deformanta: D = 3.9358 vad

D:\DATA\2!.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T sarcina

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.52206	5.13899	-5.63055	652.17228	-64.29715
2	0.45830	0.00943	-161.20712	-0.00409	-0.00139
3	1.52279	0.02426	16.62209	0.03540	0.01057
4	0.15260	0.01146	61.30275	0.00084	0.00153
5	3.11696	0.10780	31.16300	0.28751	0.17387
6	0.05410	0.00379	129.35851	-0.00013	0.00016
7	1.00518	0.03499	19.81541	0.03309	0.01192
8	0.07840	0.00161	39.26133	0.00010	0.00008
9	0.60650	0.00430	71.72879	0.00082	0.00248
10	0.00687	0.00187	123.22864	-0.00001	0.00001
11	0.23640	0.01180	8.44101	0.00276	0.00041
12	0.05347	0.00147	-126.62906	-0.00005	-0.00006
13	1.02358	0.03148	35.05705	0.02637	0.01851
14	0.06879	0.00126	243.86094	-0.00004	-0.00008
15	0.25020	0.00657	58.37449	0.00086	0.00140
16	0.04804	0.00146	318.02721	0.00005	-0.00005
17	0.38103	0.02005	45.61395	0.00534	0.00546
18	0.05804	0.00067	-134.07871	-0.00003	-0.00003
19	0.28093	0.00945	43.62216	0.00192	0.00183
20	0.03660	0.00012	-7.37717	0.00000	-0.00000
21	0.15231	0.00180	145.21917	-0.00023	0.00016
22	0.03646	0.00047	-43.55350	0.00001	-0.00001
23	0.04299	0.00105	-133.54802	-0.00003	-0.00003
24	0.00564	0.00010	155.46994	-0.00000	0.00000
25	0.07901	0.00276	29.95191	0.00019	0.00011
26	0.01705	0.00016	297.25936	0.00000	-0.00000
27	0.08197	0.00115	32.10673	0.00008	0.00005
28	0.01567	0.00015	-159.54382	-0.00000	-0.00000
29	0.02200	0.00061	-20.28364	0.00001	-0.00000
30	0.01103	0.00006	-59.18918	0.00000	-0.00000
31	0.02286	0.00104	95.31838	-0.00000	0.00002
32	0.01658	0.00015	310.56505	0.00000	-0.00000
33	0.00804	0.00025	37.83665	0.00000	0.00000
34	0.00825	0.00035	61.37439	0.00000	0.00000
35	0.03359	0.00072	63.50921	0.00001	0.00002
36	0.01415	0.00030	-105.47641	-0.00000	-0.00000
37	0.02042	0.00010	-3.10253	0.00000	-0.00000
38	0.00410	0.00040	147.24641	-0.00000	0.00000
39	0.00947	0.00052	47.83708	0.00000	0.00000
40	0.00597	0.00006	-40.97741	0.00000	-0.00000

Puterea aparenta : S = 655.7992 VA
Puterea activa: P = 652.5631 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.3908 W
Puterea reactiva: Q = -64.0702 var $\bar{\sigma}$ Qk = 0.2269 var
Puterea deformanta: D = 11.3607 vad

D:\DATA\4!.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S compens.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	125.38969	1.78598	32.91786	187.98985	121.69925
2	0.65282	0.00761	27.18457	0.00442	0.00227
3	0.93995	0.02068	-24.40216	0.01770	-0.00803
4	0.29076	0.00609	-14.31508	0.00172	-0.00044
5	3.26157	0.10721	-108.48646	-0.11088	-0.33165
6	0.26860	0.00127	-177.18101	-0.00034	-0.00002
7	0.59359	0.03541	-68.97358	0.00754	-0.01962
8	0.13688	0.00214	91.96088	-0.00001	0.00029
9	0.59192	0.00177	-101.88414	-0.00022	-0.00103
10	0.12889	0.00155	113.54412	-0.00008	0.00018
11	0.34972	0.02873	-112.34748	-0.00382	-0.00929
12	0.09414	0.00369	21.46508	0.00032	0.00013
13	0.25758	0.02085	3.22686	0.00536	0.00030
14	0.07490	0.00022	-65.48679	0.00001	-0.00002
15	0.11275	0.00514	64.99912	0.00025	0.00053
16	0.07316	0.00147	136.08183	-0.00008	0.00007
17	0.10652	0.01428	-116.43752	-0.00068	-0.00136
18	0.08466	0.00161	-22.56580	0.00013	-0.00005
19	0.18772	0.01918	-15.54812	0.00347	-0.00097
20	0.04782	0.00303	91.39736	-0.00000	0.00014
21	0.10801	0.00309	49.09343	0.00022	0.00025
22	0.04405	0.00398	79.63650	0.00003	0.00017
23	0.09303	0.02383	-68.14375	0.00083	-0.00206
24	0.06510	0.00181	-28.82389	0.00010	-0.00006
25	0.06177	0.00598	25.48796	0.00033	0.00016
26	0.08456	0.00431	-24.84580	0.00033	-0.00015
27	0.05593	0.00409	25.49875	0.00021	0.00010
28	0.03953	0.00588	30.58488	0.00020	0.00012
29	0.21253	0.03184	-52.81682	0.00409	-0.00539
30	0.04685	0.00484	-101.25634	-0.00004	-0.00022
31	0.05015	0.00863	-52.05638	0.00027	-0.00034
32	0.05246	0.00220	-66.96577	0.00005	-0.00011
33	0.04622	0.01060	-57.11931	0.00027	-0.00041
34	0.05429	0.00242	-46.15949	0.00009	-0.00009
35	0.05364	0.00603	-50.47598	0.00021	-0.00025
36	0.04021	0.00288	29.85906	0.00010	0.00006
37	0.06889	0.01078	24.76547	0.00067	0.00031
38	0.02996	0.00224	-119.29629	-0.00003	-0.00006
39	0.01974	0.00229	113.50292	-0.00002	0.00004
40	0.03950	0.00077	-145.71870	-0.00003	-0.00002

Puterea aparenta : S = 224.3781 VA
 Puterea activa: P = 187.9225 W $\bar{\sigma}$ Pk = -0.0673 W
 Puterea reactiva: Q = 121.3228 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.3765 var
 Puterea deformanta: D = 17.6480 vad

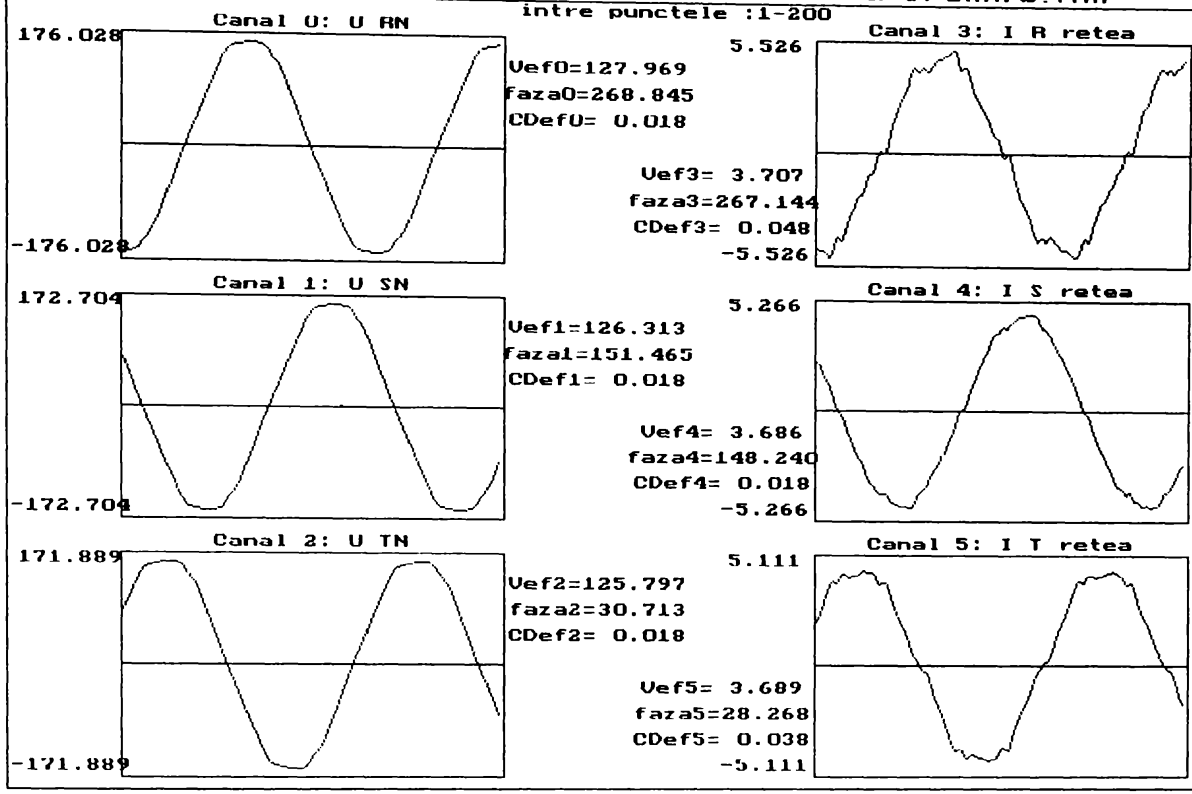
D:\DATA\4!.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T compens.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.33871	1.62047	152.35461	-181.35532	94.99328
2	0.70721	0.00358	-27.77627	0.00224	-0.00118
3	1.79646	0.03095	-122.35241	-0.02975	-0.04697
4	0.17211	0.00190	14.26194	0.00032	0.00008
5	2.45754	0.12839	326.62669	0.26349	-0.17356
6	0.22252	0.00191	-140.00587	-0.00033	-0.00027
7	0.62146	0.04078	222.85050	-0.01858	-0.01724
8	0.17539	0.00054	121.93852	-0.00005	0.00008
9	0.60441	0.00357	172.05664	-0.00213	0.00030
10	0.12116	0.00156	176.64488	-0.00019	0.00001
11	0.32610	0.03035	17.70802	0.00943	0.00301
12	0.09323	0.00233	64.15294	0.00009	0.00020
13	0.22356	0.03501	-61.66073	0.00372	-0.00689
14	0.06953	0.00106	6.77881	0.00007	0.00001
15	0.22903	0.00698	124.78635	-0.00091	0.00131
16	0.05463	0.00366	130.42589	-0.00013	0.00015
17	0.11974	0.01370	17.51249	0.00156	0.00049
18	0.04621	0.00513	76.26809	0.00006	0.00023
19	0.21354	0.04577	-58.61310	0.00509	-0.00834
20	0.03774	0.00342	-100.55337	-0.00002	-0.00013
21	0.04158	0.00576	-30.04471	0.00021	-0.00012
22	0.04733	0.00358	-104.56689	-0.00004	-0.00016
23	0.05337	0.01912	26.94271	0.00091	0.00046
24	0.03902	0.00092	47.27390	0.00002	0.00003
25	0.04148	0.01131	60.54762	0.00023	0.00041
26	0.04065	0.00124	95.77299	-0.00001	0.00005
27	0.04781	0.00388	15.41064	0.00018	0.00005
28	0.03562	0.00672	53.94182	0.00014	0.00019
29	0.07505	0.01050	-75.33236	0.00020	-0.00076
30	0.04191	0.00152	-158.22516	-0.00006	-0.00002
31	0.03719	0.00606	-122.41871	-0.00012	-0.00019
32	0.02972	0.00025	-124.27254	-0.00000	-0.00001
33	0.04287	0.00525	-95.39225	-0.00002	-0.00022
34	0.03837	0.00185	-126.99922	-0.00004	-0.00006
35	0.05861	0.00100	-76.56178	0.00001	-0.00006
36	0.03418	0.00146	-89.88151	0.00000	-0.00005
37	0.03867	0.00484	-4.20880	0.00019	-0.00001
38	0.03712	0.00048	-39.84602	0.00001	-0.00001
39	0.04684	0.00149	33.37733	0.00006	0.00004
40	0.03269	0.00051	-3.19757	0.00002	-0.00000

Puterea aparenta : S = 205.1658 VA
 Puterea activa: P = -181.1195 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.2358 W
 Puterea reactiva: Q = 94.7441 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.2492 var
 Puterea deformanta: D = 17.6716 vad

t.f.&c.f.retea Date: 06-16-1998 Time: 11:13:27 fisier D:\DATA\3!.TXT
 intre punctele :1-200



Regim nesimetric				t.f.&c.f.retea	
UR = 127.9686 V	faza 268.8454°	URS = 217.2524 V	faza 119.9280°	Uh = 2.1173 V	faza 211.8626°
US = 126.3126 V	faza 151.4645°	UST = 219.1556 V	faza 1.0222°	Ud = 126.6693 V	faza 270.3340°
UT = 125.7973 V	faza 30.7131°	UTR = 221.8090 V	faza 240.0517°	Ui = 1.5271 V	faza 185.9300°
IR = 3.7068 A	faza 267.1438°	IR* = 3.7068 A	faza 1.7016°	IR* = 3.7051 - j 0.1101 A	
IS = 3.6859 A	faza 148.2404°	IS* = 3.6859 A	faza 3.2241°	IS* = 3.6801 - j 0.2073 A	
IT = 3.6888 A	faza 28.2679°	IT* = 3.6888 A	faza 2.4453°	IT* = 3.6855 - j 0.1574 A	
Ih = 0.0238 A	faza 192.1743°	Ih* = 0.0238 A	faza 19.6883°	Ih* = 0.0224 - j 0.0080 A	
Id = 3.6937 A	faza 267.8828°	Id* = 3.6937 A	faza 2.4513°	Id* = 3.6903 - j 0.1580 A	
Ii = 0.0257 A	faza 193.4742°	Ii* = 0.0257 A	faza -7.5441°	Ii* = 0.0255 + j 0.0034 A	
	kns0u = 0.01671		kns0i = 0.00644		
	kns2u = 0.01206		kns2i = 0.00696		
	knsu = 0.02877		knsi = 0.01340		
	rnu = 0.98303		rni = 0.98303		
PR = 474.1395 W	QR = 14.0850 var	Ph = 0.1423 W	Qh = 0.0509 var		
PS = 464.8378 W	QS = 26.1848 var	Pd = 1402.3401 W	Qd = 60.0328 var		
PT = 463.6218 W	QT = 19.7985 var	Pi = 0.1167 W	Qi = -0.0155 var		
Pt = 1402.5991 W	Qt = 60.0683 var				

D:\DATA\3!.TXT

D:\DATA\3!.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.91566	3.69372	1.36947	472.34990	11.29211
2	0.32567	0.00824	178.01184	-0.00268	0.00009
3	0.84819	0.00901	-89.39672	0.00008	-0.00765
4	0.15106	0.00537	168.69255	-0.00080	0.00016
5	3.23908	0.25385	-75.93568	0.19982	-0.79760
6	0.03196	0.00513	-267.78155	-0.00001	0.00016
7	0.81576	0.06957	-52.86454	0.03426	-0.04524
8	0.02555	0.00492	28.39854	0.00011	0.00006
9	0.69434	0.00715	-163.15052	-0.00475	-0.00144
10	0.03937	0.00203	-178.36349	-0.00008	-0.00000
11	0.34778	0.04758	-95.39691	-0.00156	-0.01647
12	0.04832	0.00701	126.06587	-0.00020	0.00027
13	0.38983	0.08972	-48.17246	0.02332	-0.02606
14	0.01408	0.00492	-69.15127	0.00002	-0.00006
15	0.32882	0.01056	-116.76338	-0.00156	-0.00310
16	0.04495	0.00540	-254.30801	-0.00007	0.00023
17	0.27711	0.08797	-60.03229	0.01218	-0.02112
18	0.01950	0.01061	-96.27181	-0.00002	-0.00021
19	0.07119	0.01476	-44.45546	0.00075	-0.00074
20	0.01975	0.00477	99.88565	-0.00002	0.00009
21	0.16414	0.01047	-115.55257	-0.00074	-0.00155
22	0.04870	0.00818	-39.97630	0.00031	-0.00026
23	0.21125	0.07502	-40.53980	0.01204	-0.01030
24	0.04041	0.00670	17.76398	0.00026	0.00008
25	0.01566	0.01678	-40.10838	0.00020	-0.00017
26	0.01714	0.00771	-258.75919	-0.00003	0.00013
27	0.11145	0.00685	15.64098	0.00073	0.00021
28	0.02640	0.01131	-59.83924	0.00015	-0.00026
29	0.07354	0.01851	-41.67376	0.00102	-0.00090
30	0.00760	0.00990	-54.58731	0.00004	-0.00006
31	0.04018	0.00370	-20.39295	0.00014	-0.00005
32	0.02277	0.00261	-114.47658	-0.00002	-0.00005
33	0.06029	0.00450	87.46133	0.00001	0.00027
34	0.01072	0.00234	-169.29241	-0.00002	-0.00000
35	0.01552	0.00470	-139.16415	-0.00006	-0.00005
36	0.01515	0.00142	123.74447	-0.00001	0.00002
37	0.01619	0.00648	54.12214	0.00006	0.00008
38	0.00420	0.00135	-242.18931	-0.00000	0.00001
39	0.02587	0.00369	155.14708	-0.00009	0.00004
40	0.01837	0.00424	-60.35026	0.00004	-0.00007

Puterea aparenta : S = 473.4837 VA
 Puterea activa: P = 472.6227 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.2728 W
 Puterea reactiva: Q = 10.3606 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.9315 var
 Puterea deformanta: D = 26.5939 vad

D:\DATA\3!.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.25483	3.68382	4.52775	463.64898	36.71596
2	0.49056	0.01733	-172.01349	-0.00842	-0.00118
3	0.78852	0.02565	20.58114	0.01894	0.00711
4	0.19487	0.00807	-153.69779	-0.00141	-0.00070
5	3.31953	0.06852	-69.07456	0.08124	-0.21246
6	0.21620	0.00453	166.01698	-0.00095	0.00024
7	0.85204	0.04910	-39.11082	0.03246	-0.02639
8	0.08412	0.00235	172.16575	-0.00020	0.00003
9	0.53428	0.00182	25.18819	0.00088	0.00041
10	0.12959	0.00187	179.39826	-0.00024	0.00000
11	0.24117	0.01592	-74.37845	0.00103	-0.00370
12	0.09007	0.00338	-119.47999	-0.00015	-0.00026
13	0.49502	0.04911	-7.83741	0.02408	-0.00332
14	0.10727	0.00236	169.89397	-0.00025	0.00004
15	0.36823	0.00401	99.42231	-0.00024	0.00146
16	0.06453	0.00396	-222.65631	-0.00019	0.00017
17	0.48041	0.03407	-67.27767	0.00632	-0.01510
18	0.04026	0.00232	2.86449	0.00009	0.00000
19	0.19353	0.01958	-30.73724	0.00326	-0.00194
20	0.02167	0.00111	-132.20114	-0.00002	-0.00002
21	0.15601	0.01420	27.37552	0.00197	0.00102
22	0.07765	0.01041	-87.54026	0.00003	-0.00081
23	0.20667	0.02996	-53.29221	0.00370	-0.00496
24	0.03725	0.00708	52.13905	0.00016	0.00021
25	0.07612	0.01491	-11.47203	0.00111	-0.00023
26	0.05158	0.00340	-140.07857	-0.00013	-0.00011
27	0.12042	0.00530	135.73829	-0.00046	0.00045
28	0.03892	0.00655	3.93586	0.00025	0.00002
29	0.07212	0.01169	-53.95040	0.00050	-0.00068
30	0.02641	0.00541	32.92806	0.00012	0.00008
31	0.03888	0.00375	161.60576	-0.00014	0.00005
32	0.00989	0.00380	88.21149	0.00000	0.00004
33	0.05101	0.00213	82.73870	0.00001	0.00011
34	0.03113	0.00144	122.64339	-0.00002	0.00004
35	0.01499	0.00817	48.53923	0.00008	0.00009
36	0.03439	0.00313	176.70734	-0.00011	0.00001
37	0.02180	0.00369	15.58472	0.00008	0.00002
38	0.03448	0.00065	-153.27732	-0.00002	-0.00001
39	0.04625	0.00467	96.88697	-0.00003	0.00021
40	0.04042	0.00798	43.84833	0.00023	0.00022

Puterea aparenta : S = 465.4670 VA
Puterea activa: P = 463.8126 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.1636 W
Puterea reactiva: Q = 36.4561 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.2598 var
Puterea deformanta: D = 14.4365 vad

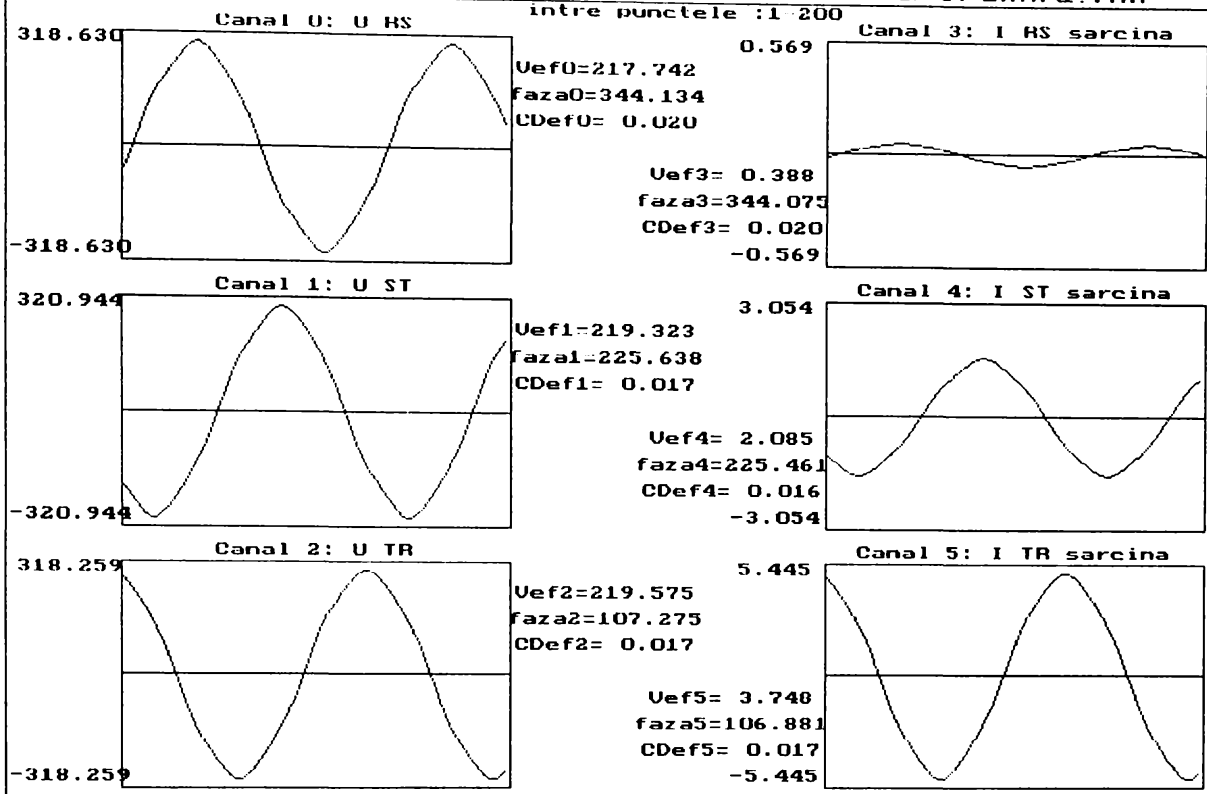
D:\DATA\3!.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T retea

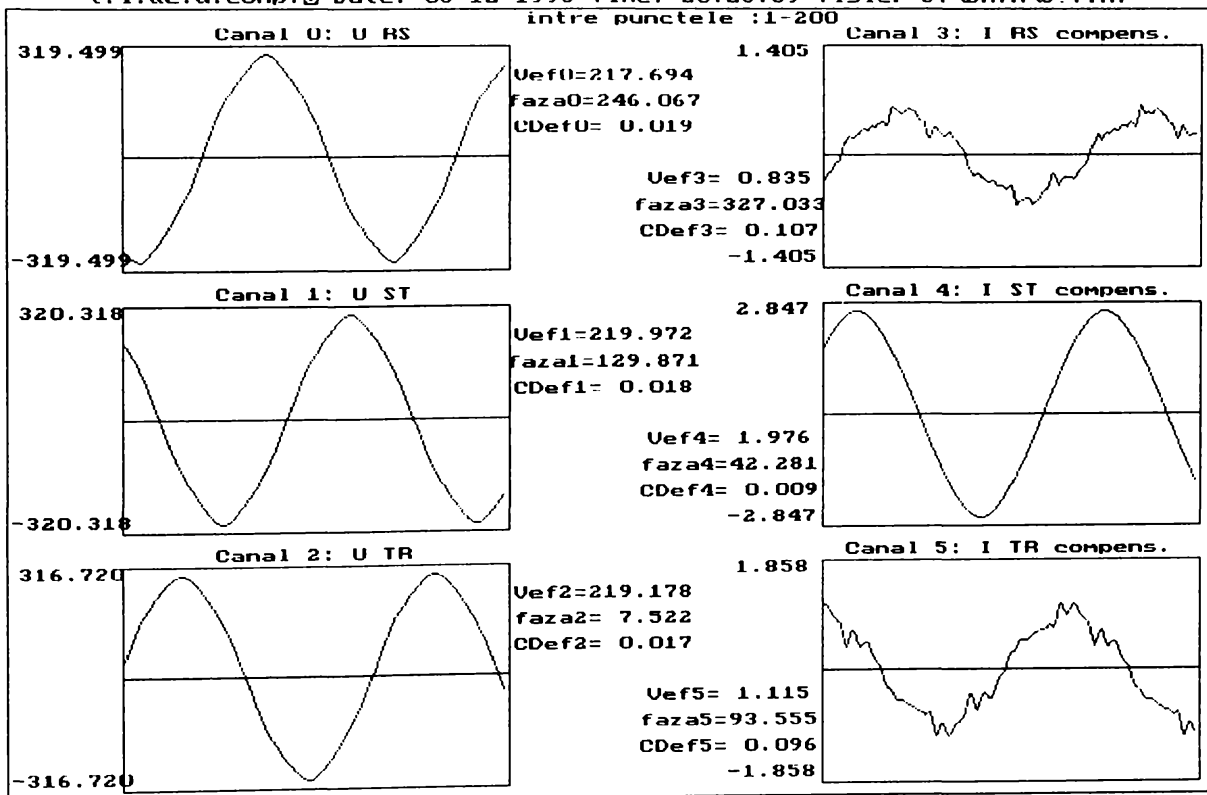
Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	125.73693	3.68094	2.49869	462.38951	20.17780
2	0.58659	0.01625	-9.87346	0.00939	-0.00163
3	1.57374	0.00764	-127.08210	-0.00724	-0.00959
4	0.19892	0.00622	-13.44837	0.00120	-0.00029
5	2.88165	0.20226	-11.08655	0.57197	-0.11208
6	0.19113	0.00709	7.72921	0.00134	0.00018
7	0.98378	0.04570	-69.95860	0.01541	-0.04223
8	0.14811	0.00710	-6.94142	0.00104	-0.00013
9	0.83025	0.00934	-2.31137	0.00775	-0.00031
10	0.08781	0.00498	-6.37482	0.00043	-0.00005
11	0.25698	0.03463	-6.35153	0.00884	-0.00098
12	0.08425	0.00784	-25.11879	0.00060	-0.00028
13	0.81446	0.08413	-57.03997	0.03728	-0.05749
14	0.06306	0.00045	-173.09757	-0.00003	-0.00000
15	0.24692	0.01015	58.61933	0.00130	0.00214
16	0.04975	0.00209	34.00632	0.00009	0.00006
17	0.24849	0.05711	-4.44369	0.01415	-0.00110
18	0.06984	0.00726	-90.31767	-0.00000	-0.00051
19	0.14065	0.01445	-82.01823	0.00028	-0.00201
20	0.03030	0.00322	-220.66777	-0.00007	0.00006
21	0.17265	0.00395	-208.08920	-0.00060	0.00032
22	0.02415	0.00480	101.32333	-0.00002	0.00011
23	0.03759	0.04353	-83.99741	0.00017	-0.00163
24	0.03253	0.00598	-53.50804	0.00012	-0.00016
25	0.02677	0.01201	-3.93685	0.00032	-0.00002
26	0.02574	0.00429	7.23286	0.00011	0.00001
27	0.07440	0.00626	-102.29142	-0.00010	-0.00046
28	0.05876	0.00383	-154.42974	-0.00020	-0.00010
29	0.04402	0.00936	138.48532	-0.00031	0.00027
30	0.03662	0.00404	10.75644	0.00015	0.00003
31	0.01352	0.00341	4.20889	0.00005	0.00000
32	0.03215	0.00091	-30.00760	0.00003	-0.00001
33	0.10102	0.00440	-59.80494	0.00022	-0.00038
34	0.01609	0.00120	-31.52505	0.00002	-0.00001
35	0.01853	0.00079	-43.31270	0.00001	-0.00001
36	0.02367	0.00093	-14.36073	0.00002	-0.00001
37	0.04163	0.00641	-68.10666	0.00010	-0.00025
38	0.01645	0.00085	125.86670	-0.00001	0.00001
39	0.00657	0.00137	-141.67210	-0.00001	-0.00001
40	0.03183	0.00141	5.19717	0.00004	0.00000

Puterea aparenta : S = 463.5935 VA
Puterea activa: P = 463.0533 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.6638 W
Puterea reactiva: Q = 19.9493 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.2285 var
Puterea deformanta: D = 10.1281 vad

t.lin.&c.d.sarc.Ⓞ Date: 06-12-1990 Time: 19:13:28 fisier D:\DATA\1!.TXT



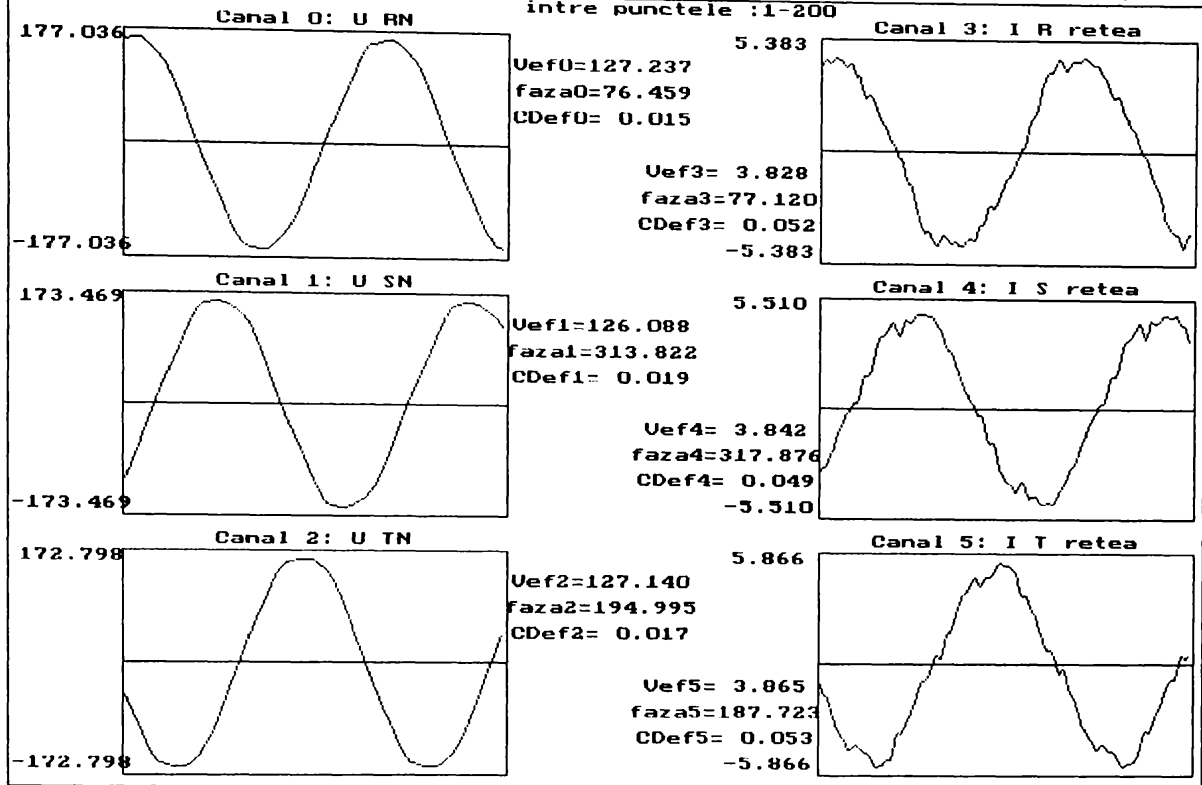
t.l.&c.d.comp.Ⓞ Date: 06-12-1990 Time: 20:23:59 fisier D:\DATA\5!.TXT



ANEXA 12

Rezultatele experimentului 2

t.f.&c.f.retea@ Date: 06-21-1998 Time: 15:45:06 fisier D:\DATA\PS3.TXT
 intre punctele :1-200



==== Regim nesimetric ==== t.f.&c.f.retea

UR = 127.2367 V faza 76.4588° URS = 222.2420 V faza 284.9984° Uh = 1.9049 V faza 181.6674°
 US = 126.0879 V faza 313.8224° UST = 217.9955 V faza 164.5493° Ud = 126.7991 V faza 75.0958°
 UT = 127.1398 V faza 194.9948° UTR = 218.6537 V faza 45.7397° Ui = 1.5279 V faza 126.8891°

IR = 3.8277 A faza 77.1203° IR* = 3.8277 A faza -0.6616° IR* = 3.8275 + j 0.0442 A
 IS = 3.8418 A faza 317.8765° IS* = 3.8418 A faza -4.0541° IS* = 3.8321 + j 0.2716 A
 IT = 3.8650 A faza 187.7226° IT* = 3.8650 A faza 7.2721° IT* = 3.8339 - j 0.4892 A

Ih = 0.2160 A faza 101.3310° Ih* = 0.2160 A faza 80.3364° Ih* = 0.0363 - j 0.2129 A
 Id = 3.8323 A faza 74.2266° Id* = 3.8323 A faza 0.8692° Id* = 3.8319 - j 0.0581 A
 Ii = 0.2229 A faza 229.0450° Ii* = 0.2229 A faza -102.1558° Ii* = -0.0469 + j 0.2179 A

kns0u = 0.01502 kns0i = 0.05635
 kns2u = 0.01205 kns2i = 0.05816
 knsu = 0.02707 knsi = 0.11452
 rnu = 0.99097 rni = 0.99097

PR = 486.9926 W QR = -5.6274 var Ph = 0.2072 W Qh = 1.2166 var
 PS = 483.1872 W QS = -34.2458 var Pd = 1457.6295 W Qd = 22.1147 var
 PT = 487.4418 W QT = 62.2018 var Pi = -0.2151 W Qi = -0.9988 var
 Pt = 1457.6215 W Qt = 22.3325 var

==== D:\DATA\PS3.TXT

D:\DATA\PS3.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.19756	3.81290	1.77991	484.75707	15.06394
2	0.20350	0.00892	-29.75493	0.00158	-0.00090
3	0.12032	0.21354	108.20733	-0.00803	0.02441
4	0.22322	0.00844	-74.69262	0.00050	-0.00182
5	2.72606	0.17746	-86.81769	0.02685	-0.48301
6	0.06682	0.00757	-51.09636	0.00032	-0.00039
7	0.99336	0.09878	-13.94184	0.09523	-0.02364
8	0.03231	0.00145	-179.69312	-0.00005	-0.00000
9	0.78292	0.02163	-140.88702	-0.01314	-0.01068
10	0.03210	0.00639	-20.78071	0.00019	-0.00007
11	0.40677	0.04258	-69.37335	0.00610	-0.01621
12	0.04177	0.00597	-88.97934	0.00000	-0.00025
13	0.14789	0.06218	-78.34373	0.00186	-0.00901
14	0.02862	0.00749	-27.55627	0.00019	-0.00010
15	0.08351	0.01179	56.78976	0.00054	0.00082
16	0.02647	0.00446	-81.11249	0.00002	-0.00012
17	0.25368	0.08448	-74.01509	0.00590	-0.02060
18	0.03941	0.01631	-73.07968	0.00019	-0.00061
19	0.25289	0.06165	-45.18067	0.01099	-0.01106
20	0.04253	0.01320	-53.42615	0.00033	-0.00045
21	0.20351	0.04149	-59.40123	0.00430	-0.00727
22	0.04414	0.00779	-47.11162	0.00023	-0.00025
23	0.06942	0.03886	-54.97860	0.00155	-0.00221
24	0.03399	0.01096	-68.03653	0.00014	-0.00035
25	0.06402	0.03582	-0.54363	0.00229	-0.00002
26	0.01342	0.00302	53.84781	0.00002	0.00003
27	0.06821	0.01544	9.81712	0.00104	0.00018
28	0.02306	0.02488	-30.59595	0.00049	-0.00029
29	0.02533	0.04282	-87.88697	0.00004	-0.00108
30	0.00582	0.01223	-99.96903	-0.00001	-0.00007
31	0.01205	0.00600	80.41026	0.00001	0.00007
32	0.01971	0.00771	-15.47630	0.00015	-0.00004
33	0.03009	0.00869	-0.93058	0.00026	-0.00000
34	0.01702	0.00473	-90.96937	-0.00000	-0.00008
35	0.02460	0.01623	-326.90553	0.00033	0.00022
36	0.00430	0.00061	-250.13925	-0.00000	0.00000
37	0.02983	0.00437	-66.86857	0.00005	-0.00012
38	0.01042	0.00092	-239.90297	-0.00000	0.00001
39	0.00553	0.00378	78.69851	0.00000	0.00002
40	0.00592	0.00191	27.99428	0.00001	0.00001

Puterea aparenta : S = 485.7045 VA
Puterea activa: P = 484.8976 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.1405 W
Puterea reactiva: Q = 14.4990 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.5649 var
Puterea deformanta: D = 23.9366 vad

D:\DATA\PS3.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.08915	3.85050	1.59384	489.16713	13.61101
2	0.41072	0.01787	24.50736	0.00668	0.00305
3	2.49644	0.13956	-130.54683	-0.22648	-0.26474
4	0.23014	0.00800	-63.18991	0.00083	-0.00164
5	2.17616	0.21664	-71.27214	0.15137	-0.44648
6	0.11971	0.00795	-24.72818	0.00086	-0.00040
7	0.86871	0.13463	-76.39975	0.02750	-0.11367
8	0.10734	0.00371	-36.61862	0.00032	-0.00024
9	0.76067	0.04856	38.29280	0.02899	0.02289
10	0.08147	0.00329	-24.35343	0.00024	-0.00011
11	0.25248	0.02968	-78.49679	0.00149	-0.00734
12	0.09772	0.00811	-31.12608	0.00068	-0.00041
13	0.11304	0.04816	-171.72064	-0.00539	-0.00078
14	0.07671	0.00505	-65.01851	0.00016	-0.00035
15	0.18087	0.03272	-81.89134	0.00083	-0.00586
16	0.04159	0.00680	78.37935	0.00006	0.00028
17	0.22400	0.01307	-51.69731	0.00181	-0.00230
18	0.04264	0.00459	130.50045	-0.00013	0.00015
19	0.24635	0.11560	-71.45283	0.00906	-0.02700
20	0.04053	0.00522	-26.66170	0.00019	-0.00010
21	0.12431	0.03706	12.40943	0.00450	0.00099
22	0.03434	0.00938	56.83659	0.00018	0.00027
23	0.05321	0.00571	7.00065	0.00030	0.00004
24	0.04502	0.00142	-119.92962	-0.00003	-0.00006
25	0.11503	0.04978	-47.42830	0.00387	-0.00422
26	0.03671	0.00172	-3.41392	0.00006	-0.00000
27	0.04998	0.02364	-80.83458	0.00019	-0.00117
28	0.06003	0.02182	-56.86734	0.00072	-0.00110
29	0.05271	0.02843	-17.11249	0.00143	-0.00044
30	0.02390	0.00536	103.62915	-0.00003	0.00012
31	0.05377	0.01413	-20.75557	0.00071	-0.00027
32	0.03137	0.00464	59.74438	0.00007	0.00013
33	0.03438	0.00410	-30.65741	0.00012	-0.00007
34	0.02048	0.00318	4.03559	0.00006	0.00000
35	0.02217	0.01048	-27.91111	0.00021	-0.00011
36	0.01832	0.00410	-9.71731	0.00007	-0.00001
37	0.02280	0.00171	71.82982	0.00001	0.00004
38	0.02252	0.00287	32.00291	0.00005	0.00003
39	0.02222	0.00375	14.95838	0.00008	0.00002
40	0.01425	0.00157	58.70104	0.00001	0.00002

Puterea aparenta : S = 490.4100 VA
 Puterea activa: P = 489.1788 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.0117 W
 Puterea reactiva: Q = 12.7602 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.8508 var
 Puterea deformanta: D = 32.2984 vad

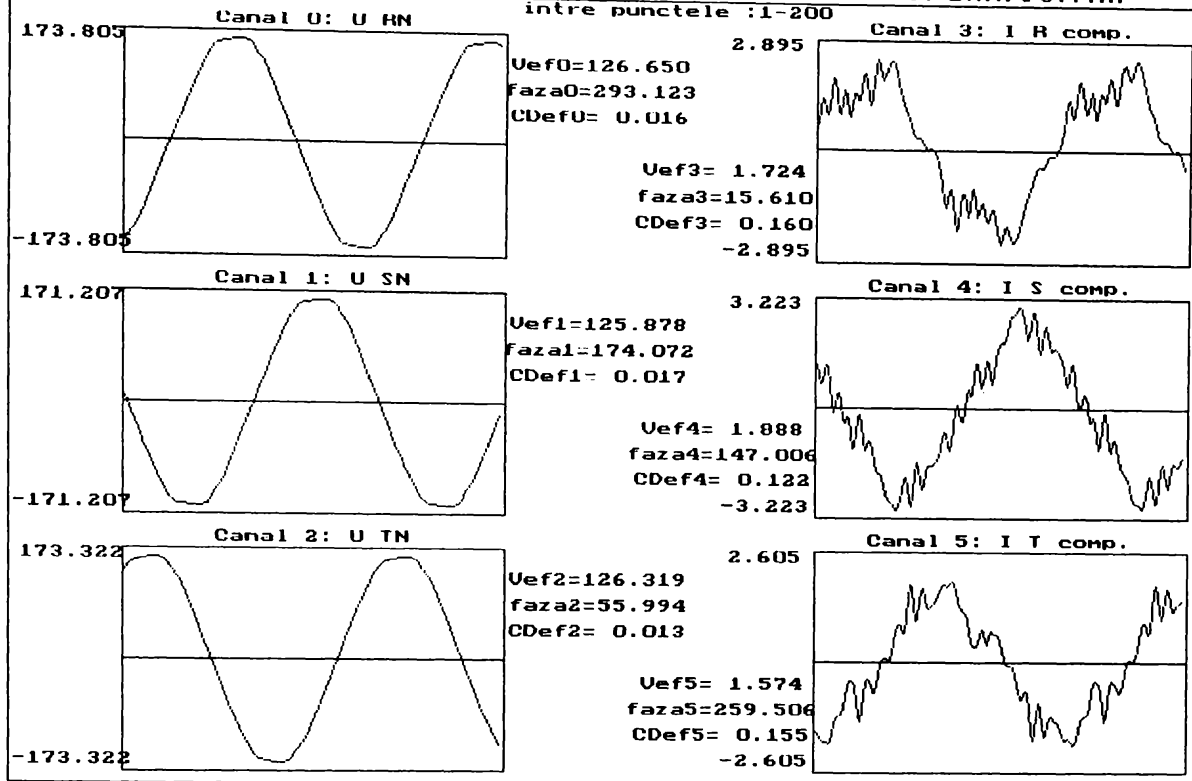
D:\DATA\PS3.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.02900	3.82908	1.69752	482.36339	14.29531
2	0.36607	0.02121	21.60763	0.00722	0.00286
3	1.19599	0.12254	-65.92704	0.05978	-0.13381
4	0.13283	0.00770	-50.17815	0.00066	-0.00079
5	3.45620	0.20535	-70.98961	0.23118	-0.67101
6	0.09012	0.00705	41.44084	0.00048	0.00042
7	0.50958	0.10137	-78.42143	0.01037	-0.05061
8	0.08787	0.00436	-27.90121	0.00034	-0.00018
9	0.68017	0.02657	-98.97735	-0.00282	-0.01785
10	0.05047	0.00472	-126.05412	-0.00014	-0.00019
11	0.22379	0.06958	-95.91761	-0.00161	-0.01549
12	0.04752	0.00471	-106.62006	-0.00006	-0.00021
13	0.07201	0.02105	-203.08024	-0.00139	0.00059
14	0.03574	0.00572	-30.22733	0.00018	-0.00010
15	0.06379	0.02180	-50.51326	0.00088	-0.00107
16	0.01643	0.01152	-22.88736	0.00017	-0.00007
17	0.28512	0.08751	-59.11941	0.01281	-0.02141
18	0.06549	0.01262	-70.84989	0.00027	-0.00078
19	0.18199	0.09340	-45.19502	0.01198	-0.01206
20	0.00853	0.00952	20.63330	0.00008	0.00003
21	0.08570	0.02409	-134.62067	-0.00145	-0.00147
22	0.01743	0.01008	39.75212	0.00014	0.00011
23	0.09046	0.04150	-51.96789	0.00231	-0.00296
24	0.01569	0.01181	-94.86137	-0.00002	-0.00018
25	0.04972	0.04182	-51.71064	0.00129	-0.00163
26	0.03419	0.00479	-50.61775	0.00010	-0.00013
27	0.08699	0.01108	-45.89390	0.00067	-0.00069
28	0.02259	0.01204	-47.96482	0.00018	-0.00020
29	0.05925	0.02542	-16.37230	0.00144	-0.00042
30	0.03741	0.00832	-27.83156	0.00028	-0.00015
31	0.01734	0.01319	-6.08565	0.00023	-0.00002
32	0.02143	0.01025	-28.65868	0.00019	-0.00011
33	0.00542	0.01046	-285.48771	0.00002	0.00005
34	0.03220	0.00796	1.57123	0.00026	0.00001
35	0.01496	0.00562	-175.24250	-0.00008	-0.00001
36	0.02789	0.00409	2.74348	0.00011	0.00001
37	0.03375	0.00573	76.32804	0.00005	0.00019
38	0.02166	0.00321	26.26109	0.00006	0.00003
39	0.00458	0.00734	-40.67450	0.00003	-0.00002
40	0.02056	0.00304	-2.20403	0.00006	-0.00000

Puterea aparenta : S = 483.5860 VA
 Puterea activa: P = 482.6996 W \bar{o} Pk = 0.3362 W
 Puterea reactiva: Q = 13.3660 var \bar{o} Qk = -0.9293 var
 Puterea deformanta: D = 26.0349 vad

t, f. & c. f. comp. @ Date: 06-25-1990 Time: 11:10:44 fisier D:\DATA\PS7.TXT
 intre punctele :1-200



==== Regim nesimetric ==== t, f. & c. f. comp.

UR = 126.6503 V	faza 293.1228°	URS = 217.6423 V	faza 143.4943°	Uh = 1.6596 V	faza 165.5761°
US = 125.8776 V	faza 174.0722°	UST = 216.2625 V	faza 25.0934°	Ud = 126.2547 V	faza 294.3957°
UT = 126.3186 V	faza 55.9945°	UTR = 222.1781 V	faza 264.5996°	Ui = 2.0700 V	faza 247.1307°
IR = 1.7238 A	faza 15.6103°	IR* = 1.7238 A	faza -82.4875°	IR* = 0.2254 + j 1.7090 A	
IS = 1.8883 A	faza 147.0057°	IS* = 1.8883 A	faza 27.0665°	IS* = 1.6815 - j 0.8592 A	
IT = 1.5741 A	faza 259.5064°	IT* = 1.5741 A	faza 156.4881°	IT* = -1.4434 - j 0.6280 A	
Ih = 0.0725 A	faza 194.8065°	Ih* = 0.0725 A	faza -29.2303°	Ih* = 0.0633 + j 0.0354 A	
Id = 0.1803 A	faza 312.3610°	Id* = 0.1803 A	faza -17.9653°	Id* = 0.1715 + j 0.0556 A	
Ii = 1.7226 A	faza 20.9404°	Ii* = 1.7226 A	faza -133.8098°	Ii* = -1.1925 + j 1.2431 A	

knsOu = 0.01315	knsOi = 0.40200
kns2u = 0.01640	kns2i = 9.55204
knsu = 0.02954	knsi = 9.95404
rnu = 0.99390	rni = 0.99390

PR = 28.5440 W	QR = -216.4467 var	Ph = 0.3150 W	Qh = -0.1763 var
PS = 211.6677 W	QS = 108.1597 var	Pd = 64.9744 W	Qd = -21.0679 var
PT = -182.3277 W	QT = 79.3233 var	Pi = -7.4054 W	Qi = -7.7196 var
Pt = 57.8840 W	Qt = -28.9638 var		

==== D:\DATA\PS7.TXT

D:\DATA\PS7.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R comp.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.59377	1.66186	-79.84876	37.07909	-207.08795
2	0.45957	0.01108	-88.38776	0.00014	-0.00509
3	0.92264	0.26644	103.37812	-0.05688	0.23916
4	0.15457	0.00591	-47.74056	0.00061	-0.00068
5	2.73406	0.23186	-111.24238	-0.22968	-0.59086
6	0.06880	0.01423	47.48369	0.00066	0.00072
7	0.87681	0.13770	-66.54566	0.04805	-0.11076
8	0.06716	0.01433	-156.23268	-0.00088	-0.00039
9	0.69468	0.02395	-220.38655	-0.01268	0.01078
10	0.03559	0.01384	-34.42680	0.00041	-0.00028
11	0.26321	0.00544	-86.24901	0.00009	-0.00143
12	0.08508	0.01571	-141.24515	-0.00104	-0.00084
13	0.33110	0.07452	-78.83026	0.00478	-0.02421
14	0.04605	0.02329	-70.82445	0.00035	-0.00101
15	0.42581	0.01523	125.33417	-0.00375	0.00529
16	0.01873	0.01921	26.11713	0.00032	0.00016
17	0.44122	0.14067	-67.42279	0.02383	-0.05731
18	0.10043	0.02425	-90.74742	-0.00003	-0.00243
19	0.03677	0.02907	-131.79606	-0.00071	-0.00080
20	0.02364	0.01274	-57.69542	0.00016	-0.00025
21	0.36292	0.07871	-65.08931	0.01203	-0.02591
22	0.05551	0.00858	-40.59703	0.00036	-0.00031
23	0.30441	0.14313	-35.16131	0.03562	-0.02509
24	0.06524	0.01149	-40.00263	0.00057	-0.00048
25	0.23391	0.07726	-52.30256	0.01105	-0.01430
26	0.01884	0.01289	11.63178	0.00024	0.00005
27	0.05355	0.03133	91.61386	-0.00005	0.00168
28	0.02378	0.00474	-11.99020	0.00011	-0.00002
29	0.08439	0.02515	-44.84286	0.00150	-0.00150
30	0.03059	0.00377	24.55705	0.00010	0.00005
31	0.02803	0.02249	-70.53140	0.00021	-0.00059
32	0.01942	0.00433	53.92858	0.00005	0.00007
33	0.05752	0.01654	15.00354	0.00092	0.00025
34	0.01919	0.00277	43.17170	0.00004	0.00004
35	0.02682	0.01216	87.73776	0.00001	0.00033
36	0.01164	0.00156	-22.54208	0.00002	-0.00001
37	0.02831	0.00227	-252.30848	-0.00002	0.00006
38	0.01820	0.00135	44.79047	0.00002	0.00002
39	0.02638	0.00413	-151.96124	-0.00010	-0.00005
40	0.01926	0.00158	46.52698	0.00002	0.00002

Puterea aparenta : S = 211.6061 VA
 Puterea activa: P = 36.9156 W $\delta P_k = -0.1635$ W
 Puterea reactiva: Q = -207.6939 var $\delta Q_k = -0.6059$ var
 Puterea deformanta: D = 16.6619 vad

D:\DATA\PS7.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S comp.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	125.82514	1.84772	31.17902	198.90738	120.36305
2	0.77099	0.02351	-195.36616	-0.01748	0.00480
3	1.86218	0.15821	-58.49791	0.15395	-0.25120
4	0.39507	0.03500	-51.22977	0.00866	-0.01078
5	2.52102	0.16005	-100.63658	-0.07447	-0.39655
6	0.09714	0.02601	100.70787	-0.00047	0.00248
7	1.06733	0.11119	-78.29005	0.02409	-0.11620
8	0.15004	0.01979	-116.98128	-0.00135	-0.00265
9	0.57268	0.01027	-122.27459	-0.00314	-0.00497
10	0.07446	0.01948	-11.77023	0.00142	-0.00030
11	0.17751	0.02109	-52.76113	0.00227	-0.00298
12	0.04579	0.02023	147.92399	-0.00078	0.00049
13	0.50782	0.08428	-88.18367	0.00136	-0.04278
14	0.12477	0.02328	-103.65666	-0.00069	-0.00282
15	0.48654	0.05492	-25.50322	0.02412	-0.01151
16	0.09803	0.00793	-0.74291	0.00078	-0.00001
17	0.40053	0.12973	-64.54828	0.02233	-0.04692
18	0.06978	0.01598	-151.11708	-0.00098	-0.00054
19	0.37426	0.09867	-56.04066	0.02063	-0.03063
20	0.07821	0.01289	-52.11609	0.00062	-0.00080
21	0.27084	0.14348	-24.99729	0.03522	-0.01642
22	0.07708	0.02136	-16.10369	0.00158	-0.00046
23	0.27055	0.10391	-78.61166	0.00555	-0.02756
24	0.04438	0.01412	23.02859	0.00058	0.00025
25	0.12917	0.10780	-52.44683	0.00849	-0.01104
26	0.01159	0.01025	-289.13198	0.00004	0.00011
27	0.10874	0.00839	52.53568	0.00055	0.00072
28	0.05142	0.01696	-101.68116	-0.00018	-0.00085
29	0.06130	0.02372	115.48400	-0.00063	0.00131
30	0.02904	0.00828	42.93603	0.00018	0.00016
31	0.02226	0.00527	141.87370	-0.00009	0.00007
32	0.02157	0.00351	82.53306	0.00001	0.00008
33	0.04492	0.01166	-204.36550	-0.00048	0.00022
34	0.02492	0.00365	117.46300	-0.00004	0.00008
35	0.07184	0.01129	-38.49286	0.00063	-0.00050
36	0.03279	0.00193	-108.51108	-0.00002	-0.00006
37	0.01370	0.00518	34.77345	0.00006	0.00004
38	0.03471	0.00320	0.07704	0.00011	0.00000
39	0.01498	0.00456	-260.38382	-0.00001	0.00007
40	0.02342	0.00209	52.02042	0.00003	0.00004

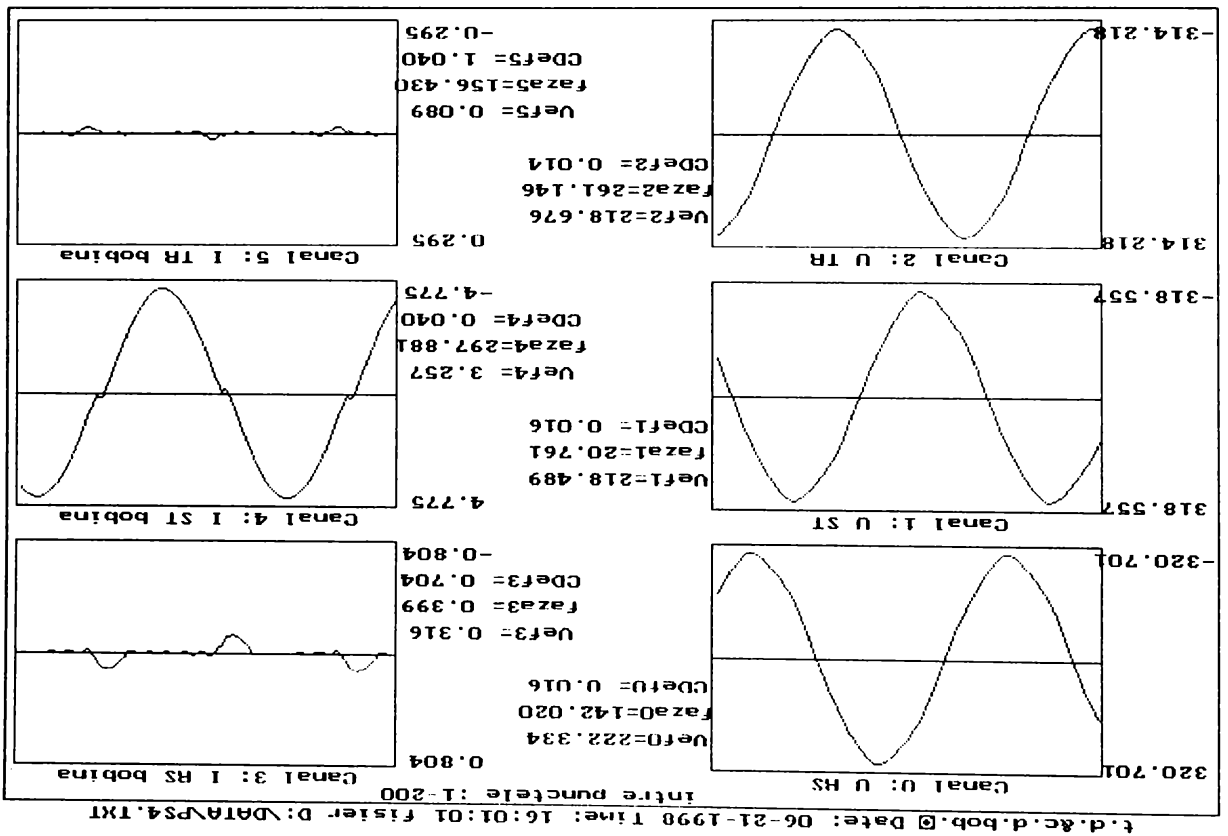
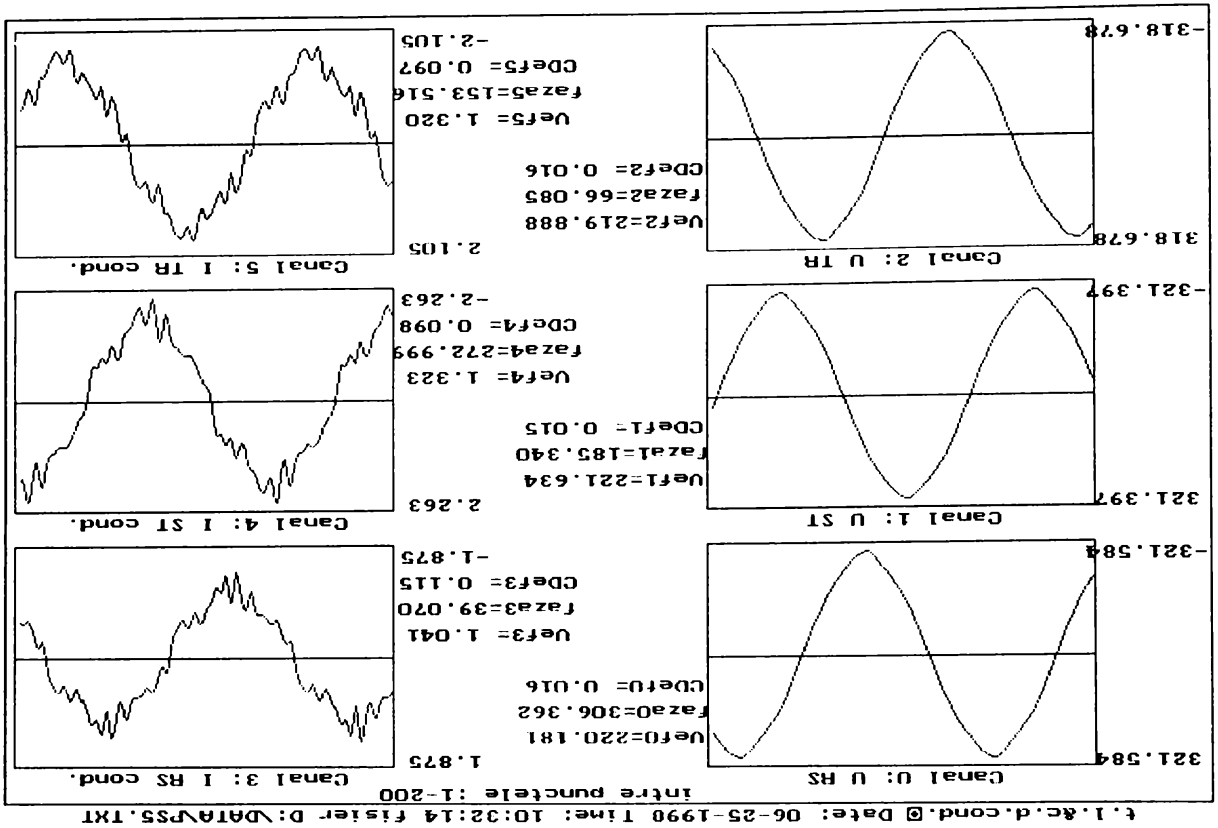
Puterea aparenta : S = 233.6088 VA
 Puterea activa: P = 199.1198 W $\delta P_k = 0.2124$ W
 Puterea reactiva: Q = 119.3955 var $\delta Q_k = -0.9676$ var
 Puterea deformanta: D = 25.8667 vad

D:\DATA\PS7.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T comp.

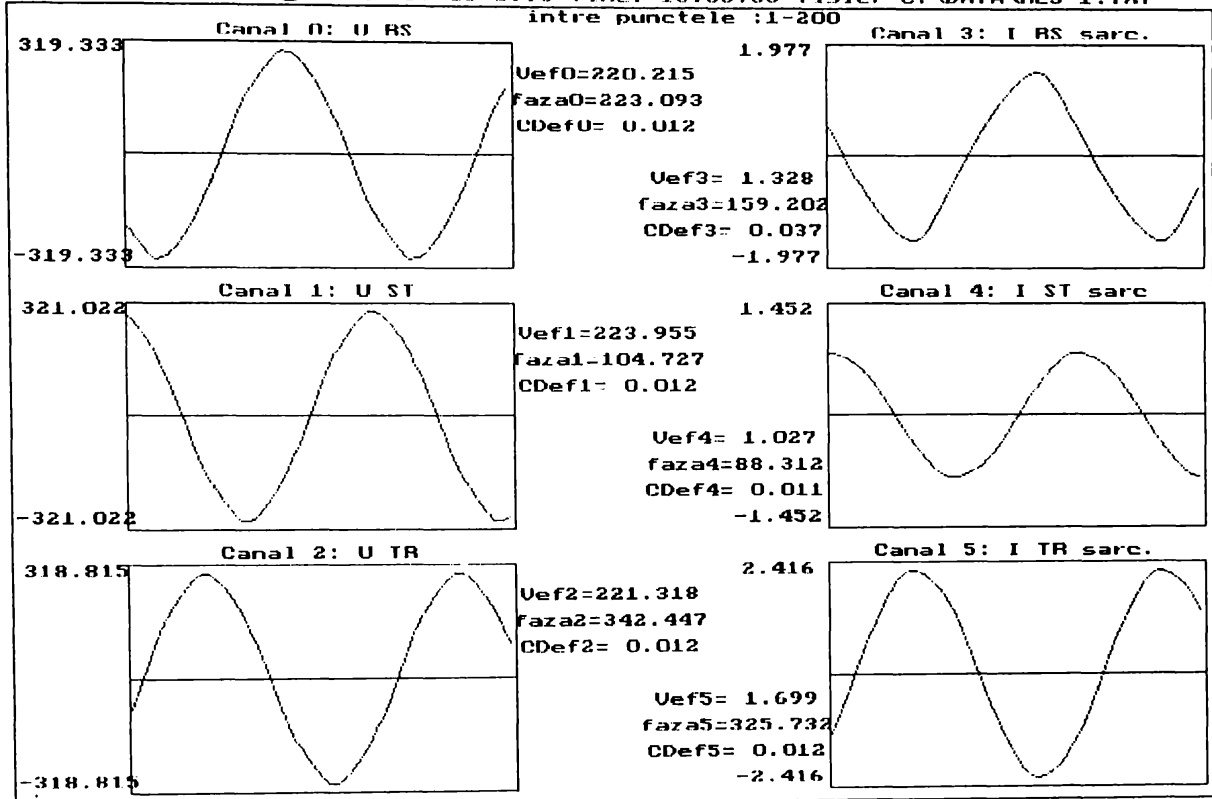
Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.27730	1.51925	149.53449	-165.35891	97.26980
2	0.25990	0.03256	44.64916	0.00602	0.00595
3	1.61582	0.15882	-139.51970	-0.19520	-0.16660
4	0.19059	0.03030	169.33188	-0.00568	0.00107
5	1.99494	0.23081	-89.09862	0.00724	-0.46039
6	0.13559	0.02931	-91.37040	-0.00010	-0.00397
7	0.80700	0.13917	-71.23781	0.03612	-0.10634
8	0.01900	0.03074	-82.24644	0.00008	-0.00058
9	0.66881	0.01971	-19.05718	0.01246	-0.00430
10	0.10132	0.03052	-138.45366	-0.00231	-0.00205
11	0.10196	0.02457	31.92240	0.00213	0.00132
12	0.08419	0.02763	-61.86748	0.00110	-0.00205
13	0.35822	0.07373	-34.89356	0.02166	-0.01511
14	0.04741	0.03642	224.99369	-0.00122	-0.00122
15	0.40956	0.04160	236.87615	-0.00931	-0.01427
16	0.12733	0.04198	-103.27222	-0.00123	-0.00520
17	0.44141	0.17122	-62.32786	0.03510	-0.06693
18	0.04985	0.03012	-55.12603	0.00086	-0.00123
19	0.10034	0.07672	-36.87131	0.00616	-0.00462
20	0.04444	0.01919	217.04286	-0.00068	-0.00051
21	0.20459	0.08436	244.21017	-0.00751	-0.01554
22	0.06884	0.02097	-71.56880	0.00046	-0.00137
23	0.02571	0.07546	-91.08992	-0.00004	-0.00194
24	0.03027	0.00881	167.14987	-0.00026	0.00006
25	0.10475	0.03266	-54.49642	0.00199	-0.00278
26	0.04749	0.01471	-90.20298	-0.00000	-0.00070
27	0.15304	0.03707	-77.45546	0.00123	-0.00554
28	0.01011	0.00746	25.15209	0.00007	0.00003
29	0.06041	0.00981	20.82055	0.00055	0.00021
30	0.03011	0.00459	-169.69019	-0.00014	-0.00002
31	0.01676	0.01826	332.87175	0.00027	-0.00014
32	0.02843	0.00448	-69.23964	0.00005	-0.00012
33	0.05947	0.01396	-95.32314	-0.00008	-0.00083
34	0.00669	0.00203	142.63379	-0.00001	0.00001
35	0.04663	0.00148	102.44115	-0.00001	0.00007
36	0.01216	0.00218	-111.33505	-0.00001	-0.00002
37	0.00420	0.00318	159.51844	-0.00001	0.00000
38	0.01941	0.00032	71.34351	0.00000	0.00001
39	0.01127	0.00096	-155.86598	-0.00001	-0.00000
40	0.03052	0.00190	-156.32018	-0.00005	-0.00002

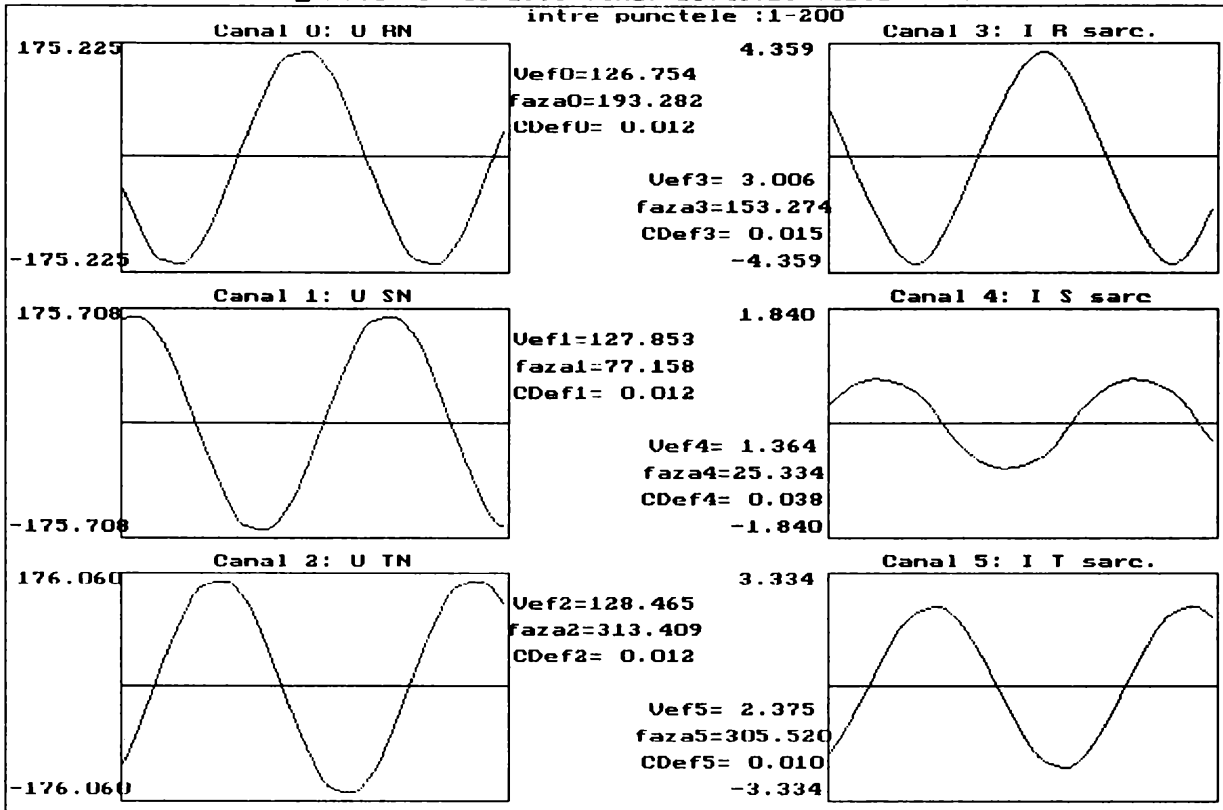
Puterea aparenta : S = 192.8847 VA
 Puterea activa: P = -165.4492 W $\bar{\sigma}$ Pk = -0.0903 W
 Puterea reactiva: Q = 96.3941 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.8757 var
 Puterea deformanta: D = 23.2213 vad



ANEXA 13

Rezultatele experimentului 3





==== Regim nesimetric ==== t.f.&c.f.sarcina

UR = 126.7542 V faza 193.2818° URS = 216.0659 V faza 45.3740° Uh = 2.3402 V faza 161.6599°
 US = 127.8530 V faza 77.1578° UST = 226.0512 V faza 285.3568° Ud = 127.6280 V faza 194.6181°
 UT = 128.4655 V faza 313.4094° UTR = 221.1704 V faza 163.1244° Ui = 3.3285 V faza 44.9854°

IR = 3.0056 A faza 153.2738° IR* = 3.0056 A faza 40.0080° IR* = 2.3022 - j 1.9323 A
 IS = 1.3642 A faza 25.3338° IS* = 1.3642 A faza 51.8240° IS* = 0.8432 - j 1.0724 A
 IT = 2.3750 A faza 305.5199° IT* = 2.3750 A faza 7.8895° IT* = 2.3525 - j 0.3260 A

Ih = 0.0239 A faza 178.1010° Ih* = 0.0239 A faza -16.4411° Ih* = 0.0229 + j 0.0068 A
 Id = 2.1521 A faza 162.8925° Id* = 2.1521 A faza 31.7255° Id* = 1.8305 - j 1.1317 A
 Ii = 0.9380 A faza 130.0668° Ii* = 0.9380 A faza -85.0814° Ii* = 0.0804 + j 0.9346 A

knsOu = 0.01834 knsOi = 0.01112
 kns2u = 0.02608 kns2i = 0.43587
 knsu = 0.04442 knsi = 0.44699
 rnu = 0.98668 rni = 0.98668

PR = 291.8109 W QR = 244.9279 var Ph = 0.1611 W Qh = -0.0475 var
 PS = 107.7998 W QS = 137.1070 var Pd = 700.8642 W Qd = 433.2943 var
 PT = 302.2177 W QT = 41.8797 var Pi = 0.8031 W Qi = -9.3321 var
 Pt = 701.8284 W Qt = 423.9146 var

D:\DATA\RE3~2.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R sarc.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.72825	3.00471	43.80287	274.81947	263.56883
2	0.91676	0.00522	-154.72162	-0.00433	-0.00205
3	1.30172	0.06811	-26.17379	0.07956	-0.03911
4	0.41685	0.00309	-150.85765	-0.00112	-0.00063
5	1.43237	0.02117	42.34387	0.02241	0.02042
6	0.24197	0.00202	-183.88408	-0.00049	0.00003
7	0.82947	0.00964	16.22166	0.00768	0.00223
8	0.09424	0.00099	-185.25326	-0.00009	0.00001
9	0.77077	0.00130	107.14062	-0.00030	0.00096
10	0.16326	0.00067	-178.53120	-0.00011	-0.00000
11	0.28256	0.00262	29.88823	0.00064	0.00037
12	0.09494	0.00072	-191.11033	-0.00007	0.00001
13	0.30482	0.00352	73.01460	0.00031	0.00103
14	0.10768	0.00063	-189.77145	-0.00007	0.00001
15	0.13552	0.00177	-137.46057	-0.00018	-0.00016
16	0.09738	0.00065	166.54327	-0.00006	0.00001
17	0.22154	0.00320	39.71335	0.00055	0.00045
18	0.07793	0.00038	-153.53360	-0.00003	-0.00001
19	0.13789	0.00195	95.33430	-0.00003	0.00027
20	0.07578	0.00039	-183.68119	-0.00003	0.00000
21	0.13407	0.00097	-118.32475	-0.00006	-0.00012
22	0.06105	0.00024	145.43691	-0.00001	0.00001
23	0.09000	0.00066	-60.41673	0.00003	-0.00005
24	0.06779	0.00041	-145.90477	-0.00002	-0.00002
25	0.12355	0.00043	75.36917	0.00001	0.00005
26	0.07503	0.00035	92.21086	-0.00000	0.00003
27	0.10473	0.00025	-34.98130	0.00002	-0.00001
28	0.07809	0.00051	-256.30094	-0.00001	0.00004
29	0.12971	0.00087	-49.46162	0.00007	-0.00009
30	0.07155	0.00034	-127.11059	-0.00001	-0.00002
31	0.07693	0.00029	152.78123	-0.00002	0.00001
32	0.05002	0.00039	-167.84039	-0.00002	-0.00000
33	0.02089	0.00029	-132.14442	-0.00000	-0.00000
34	0.06334	0.00054	-151.57547	-0.00003	-0.00002
35	0.06358	0.00059	-116.88358	-0.00002	-0.00003
36	0.05231	0.00029	-177.40370	-0.00002	-0.00000
37	0.05918	0.00039	-139.34074	-0.00002	-0.00001
38	0.04287	0.00052	-201.70597	-0.00002	0.00001
39	0.04104	0.00027	-280.41476	0.00000	0.00001
40	0.04780	0.00024	-104.18710	-0.00000	-0.00001

Puterea aparenta : S = 380.9199 VA
 Puterea activa: P = 274.9236 W δ Pk = 0.1041 W
 Puterea reactiva: Q = 263.5525 var δ Qk = -0.0164 var
 Puterea deformanta: D = 7.5545 vad

D:\DATA\RE3~2.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S sarc

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.81816	1.36156	55.49919	98.57486	143.42298
2	0.17375	0.00266	84.70253	0.00004	0.00046
3	1.47097	0.07679	171.08391	-0.11159	0.01751
4	0.01709	0.00114	74.08128	0.00001	0.00002
5	1.81071	0.02990	27.43760	0.04805	0.02495
6	0.03014	0.00052	-65.71058	0.00001	-0.00001
7	0.83250	0.01324	7.83665	0.01092	0.00150
8	0.02390	0.00050	69.97022	0.00000	0.00001
9	0.58803	0.00283	-50.97584	0.00105	-0.00129
10	0.00545	0.00026	99.67285	-0.00000	0.00000
11	0.10483	0.00127	10.86782	0.00013	0.00003
12	0.01063	0.00019	-54.44462	0.00000	-0.00000
13	0.20964	0.00222	-5.66434	0.00046	-0.00005
14	0.01838	0.00023	166.93625	-0.00000	0.00000
15	0.14581	0.00025	138.45264	-0.00003	0.00002
16	0.00419	0.00012	71.01084	0.00000	0.00000
17	0.20491	0.00187	41.08048	0.00029	0.00025
18	0.00557	0.00032	69.08078	0.00000	0.00000
19	0.08267	0.00054	-15.35956	0.00004	-0.00001
20	0.03193	0.00032	-55.90730	0.00001	-0.00001
21	0.04879	0.00050	-61.51186	0.00001	-0.00002
22	0.01765	0.00032	104.14747	-0.00000	0.00001
23	0.08854	0.00055	115.27762	-0.00002	0.00004
24	0.01797	0.00030	58.76843	0.00000	0.00000
25	0.07310	0.00058	-282.17317	0.00001	0.00004
26	0.01134	0.00031	97.97812	-0.00000	0.00000
27	0.10056	0.00046	52.39026	0.00003	0.00004
28	0.05424	0.00054	43.08203	0.00002	0.00002
29	0.09084	0.00074	40.44556	0.00005	0.00004
30	0.02510	0.00036	83.17491	0.00000	0.00001
31	0.04810	0.00033	-241.50061	-0.00001	0.00001
32	0.01697	0.00013	135.10108	-0.00000	0.00000
33	0.04443	0.00004	67.19081	0.00000	0.00000
34	0.00737	0.00004	-86.59585	0.00000	-0.00000
35	0.01317	0.00014	34.19405	0.00000	0.00000
36	0.01283	0.00044	69.30994	0.00000	0.00001
37	0.02929	0.00051	31.56322	0.00001	0.00001
38	0.01292	0.00020	93.10333	-0.00000	0.00000
39	0.03425	0.00033	-323.11551	0.00001	0.00001
40	0.00599	0.00014	89.44647	0.00000	0.00000

Puterea aparenta : S = 174.2138 VA
Puterea activa: P = 98.5244 W δ Pk = -0.0505 W
Puterea reactiva: Q = 143.4666 var δ Qk = 0.0436 var
Puterea deformanta: D = 7.7926 vad

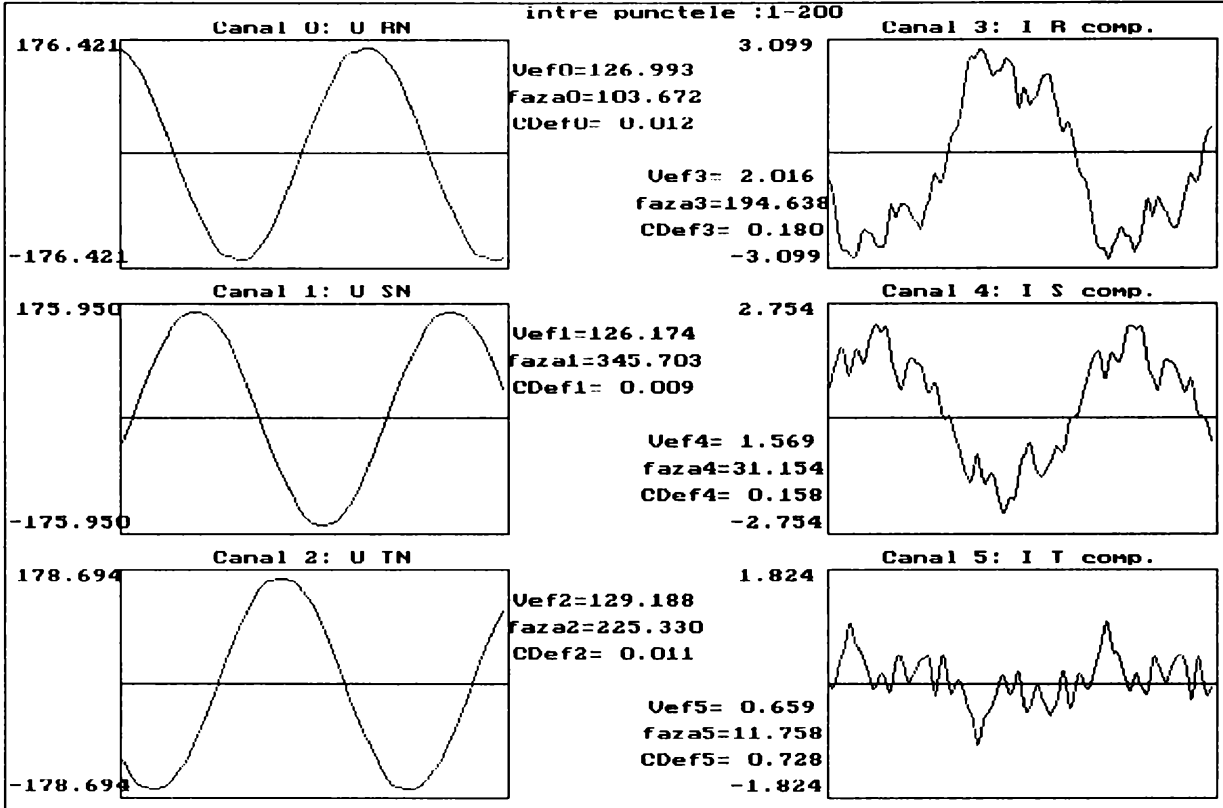
D:\DATA\RE3~2.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T sarc.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	128.43287	2.37475	11.29767	299.08584	59.75062
2	0.19123	0.01195	-167.80934	-0.00223	-0.00048
3	1.84578	0.00752	15.80093	0.01336	0.00378
4	0.11702	0.00338	-179.47756	-0.00040	-0.00000
5	1.48524	0.02503	13.52462	0.03614	0.00869
6	0.12860	0.00290	-204.39314	-0.00034	0.00015
7	0.90832	0.01627	22.71271	0.01363	0.00570
8	0.04678	0.00252	-146.40845	-0.00010	-0.00007
9	0.73761	0.00227	-176.11855	-0.00167	-0.00011
10	0.04484	0.00177	140.92731	-0.00006	0.00005
11	0.05397	0.00299	-43.66914	0.00012	-0.00011
12	0.03603	0.00156	-180.07101	-0.00006	0.00000
13	0.33033	0.00390	8.85869	0.00127	0.00020
14	0.01018	0.00100	-155.90779	-0.00001	-0.00000
15	0.19496	0.00078	32.55521	0.00013	0.00008
16	0.03054	0.00049	-164.85967	-0.00001	-0.00000
17	0.19862	0.00280	41.51979	0.00042	0.00037
18	0.03125	0.00127	-160.88650	-0.00004	-0.00001
19	0.14321	0.00092	54.82756	0.00008	0.00011
20	0.03481	0.00032	-118.76085	-0.00001	-0.00001
21	0.10080	0.00119	-226.88034	-0.00008	0.00009
22	0.01117	0.00065	-36.21527	0.00001	-0.00000
23	0.07196	0.00160	-306.15320	0.00007	0.00009
24	0.01705	0.00095	-131.82850	-0.00001	-0.00001
25	0.08276	0.00029	-3.92666	0.00002	-0.00000
26	0.00295	0.00055	-248.57131	-0.00000	0.00000
27	0.05406	0.00104	-124.31108	-0.00003	-0.00005
28	0.02679	0.00053	-27.53467	0.00001	-0.00001
29	0.07373	0.00135	-227.63248	-0.00007	0.00007
30	0.01150	0.00113	-242.69589	-0.00001	0.00001
31	0.00149	0.00037	-173.87704	-0.00000	-0.00000
32	0.01026	0.00034	-251.44598	-0.00000	0.00000
33	0.00639	0.00065	-271.80687	0.00000	0.00000
34	0.02665	0.00053	-176.75012	-0.00001	-0.00000
35	0.02284	0.00062	-185.57699	-0.00001	0.00000
36	0.01144	0.00031	-204.44221	-0.00000	0.00000
37	0.00515	0.00091	-183.97206	-0.00000	0.00000
38	0.01321	0.00050	-234.36812	-0.00000	0.00001
39	0.03470	0.00049	-248.49626	-0.00001	0.00002
40	0.00966	0.00033	-102.80349	-0.00000	-0.00000

Puterea aparenta : S = 305.0696 VA
 Puterea activa: P = 299.1459 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.0601 W
 Puterea reactiva: Q = 59.7692 var $\bar{\sigma}$ Qk = 0.0186 var
 Puterea deformanta: D = 2.6098 vad

intre punctele :1-200



==== Regim nesimetric ==== t.f.&c.f.comp.

UR = 126.9928 V faza 103.6721° URS = 216.9716 V faza 314.5761° Uh = 0.4911 V faza 14.1887°
 US = 126.1740 V faza 345.7030° UST = 221.5689 V faza 195.9042° Ud = 127.4365 V faza 104.9026°
 UT = 129.1878 V faza 225.3304° UTR = 223.6918 V faza 74.2272° Ui = 2.2842 V faza 3.1105°

IR = 2.0158 A faza 194.6376° IR* = 2.0158 A faza -90.9654° IR* = -0.0340 + j 2.0156 A
 IS = 1.5691 A faza 31.1537° IS* = 1.5691 A faza -45.4507° IS* = 1.1008 + j 1.1182 A
 IT = 0.6592 A faza 11.7580° IT* = 0.6592 A faza -146.4276° IT* = -0.5492 + j 0.3645 A

Ih = 0.1461 A faza 85.0626° Ih* = 0.1461 A faza -70.8739° Ih* = 0.0479 + j 0.1380 A
 Id = 1.1838 A faza 186.1168° Id* = 1.1838 A faza -81.2142° Id* = 0.1808 + j 1.1699 A
 Ii = 0.9473 A faza 213.9351° Ii* = 0.9473 A faza 149.1754° Ii* = -0.8135 - j 0.4854 A

knsOu = 0.00385 knsOi = 0.12341
 kns2u = 0.01792 kns2i = 0.80022
 knsu = 0.02178 knsi = 0.92363
 rnu = 0.97667 rni = 0.97667

PR = -4.3134 W QR = -255.9621 var Ph = 0.0705 W Qh = -0.2033 var
 PS = 138.8875 W QS = -141.0902 var Pd = 69.1272 W Qd = -447.2657 var
 PT = -70.9509 W QT = -47.0904 var Pi = -5.5746 W Qi = 3.3263 var
 Pt = 63.6232 W Qt = -444.1427 var

D:\DATA\RE3~10.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R comp.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.95678	1.92890	-93.97145	-16.96072	-244.29866
2	0.21638	0.01959	83.59925	0.00047	0.00421
3	1.41547	0.49279	169.32351	-0.68545	0.12923
4	0.23416	0.02713	-45.81375	0.00443	-0.00456
5	1.20440	0.04363	102.11449	-0.01103	0.05138
6	0.17204	0.01657	-78.92483	0.00055	-0.00280
7	1.10334	0.25140	-61.91827	0.13057	-0.24472
8	0.05999	0.00752	53.80294	0.00027	0.00036
9	0.92452	0.05349	-158.78323	-0.04610	-0.01790
10	0.08673	0.00492	63.94713	0.00019	0.00038
11	0.27804	0.06074	-88.54949	0.00043	-0.01688
12	0.07558	0.00636	58.95569	0.00025	0.00041
13	0.24389	0.10908	334.06387	0.02392	-0.01164
14	0.03059	0.00596	-109.09416	-0.00006	-0.00017
15	0.19838	0.04146	5.80811	0.00818	0.00083
16	0.03442	0.00307	53.49528	0.00006	0.00008
17	0.20249	0.08799	338.74956	0.01661	-0.00646
18	0.01420	0.00724	167.94768	-0.00010	0.00002
19	0.02556	0.02810	39.58509	0.00055	0.00046
20	0.02048	0.00820	103.46773	-0.00004	0.00016
21	0.07764	0.01994	-33.76028	0.00129	-0.00086
22	0.02325	0.00120	236.13963	-0.00002	-0.00002
23	0.06045	0.03993	70.00401	0.00083	0.00227
24	0.00786	0.00024	-8.46131	0.00000	-0.00000
25	0.00426	0.02140	129.78563	-0.00006	0.00007
26	0.02048	0.00309	89.30545	0.00000	0.00006
27	0.06204	0.01731	108.15867	-0.00033	0.00102
28	0.00830	0.01816	57.89609	0.00008	0.00013
29	0.05356	0.03524	124.00935	-0.00106	0.00156
30	0.02142	0.01068	196.65762	-0.00022	-0.00007
31	0.01913	0.01179	106.38465	-0.00006	0.00022
32	0.00754	0.00265	261.12166	-0.00000	-0.00002
33	0.01552	0.00457	8.06075	0.00007	0.00001
34	0.00698	0.00095	177.02114	-0.00001	0.00000
35	0.01870	0.00282	-117.79920	-0.00002	-0.00005
36	0.00544	0.00037	-31.46808	0.00000	-0.00000
37	0.01706	0.00657	137.78096	-0.00008	0.00008
38	0.01018	0.00187	251.12112	-0.00001	-0.00002
39	0.00335	0.00129	-28.55793	0.00000	-0.00000
40	0.02631	0.00092	248.26964	-0.00001	-0.00002

Puterea aparenta : S = 246.0573 VA
 Puterea activa: P = -17.5166 W σ Pk = -0.5559 W
 Puterea reactiva: Q = -244.4119 var σ Qk = -0.1132 var
 Puterea deformanta: D = 22.3646 vad

D:\DATA\RE3~10.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S comp.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.15751	1.51319	-37.58832	151.27176	-116.44580
2	0.74235	0.01659	-4.05444	0.01228	-0.00087
3	0.60752	0.14344	4.65160	0.08686	0.00707
4	0.04134	0.04701	78.00223	0.00040	0.00190
5	1.16853	0.21979	-57.07534	0.13960	-0.21558
6	0.23893	0.04121	-124.03653	-0.00551	-0.00816
7	0.74037	0.21911	-108.08204	-0.05035	-0.15421
8	0.22301	0.05036	-11.63661	0.01100	-0.00227
9	0.79268	0.07051	-10.17453	0.05501	-0.00987
10	0.13361	0.02335	-88.15806	0.00010	-0.00312
11	0.26737	0.08953	-99.65948	-0.00402	-0.02360
12	0.08995	0.02223	42.28276	0.00148	0.00135
13	0.35055	0.05320	-116.81936	-0.00841	-0.01664
14	0.06407	0.04850	-50.54060	0.00197	-0.00240
15	0.17179	0.05670	-188.93799	-0.00962	0.00151
16	0.09794	0.04529	7.36307	0.00440	0.00057
17	0.14964	0.09677	-69.42856	0.00509	-0.01356
18	0.07270	0.00873	-173.75907	-0.00063	-0.00007
19	0.08976	0.05657	-85.18016	0.00043	-0.00506
20	0.05814	0.03316	-157.55188	-0.00178	-0.00074
21	0.07336	0.01814	-153.59772	-0.00119	-0.00059
22	0.06231	0.00660	150.83080	-0.00036	0.00020
23	0.04398	0.02020	-146.58544	-0.00074	-0.00049
24	0.06679	0.01865	-76.05610	0.00030	-0.00121
25	0.08487	0.02404	-124.09781	-0.00114	-0.00169
26	0.05142	0.02803	32.49422	0.00122	0.00077
27	0.00347	0.01607	156.80645	-0.00005	0.00002
28	0.03634	0.00512	-28.90589	0.00016	-0.00009
29	0.09724	0.01587	-105.99230	-0.00043	-0.00148
30	0.03783	0.01296	38.99828	0.00038	0.00031
31	0.03237	0.01272	-18.11435	0.00039	-0.00013
32	0.05063	0.00321	80.53559	0.00003	0.00016
33	0.03663	0.00524	-0.90668	0.00019	-0.00000
34	0.05319	0.00364	29.33343	0.00017	0.00009
35	0.05824	0.00331	29.65558	0.00017	0.00010
36	0.04555	0.00441	-1.79676	0.00020	-0.00001
37	0.06003	0.00345	11.42336	0.00020	0.00004
38	0.03466	0.00666	17.41469	0.00022	0.00007
39	0.04594	0.00489	7.34166	0.00022	0.00003
40	0.02557	0.00431	9.89005	0.00011	0.00002

Puterea aparenta : S = 191.5962 VA
 Puterea activa: P = 151.5101 W \bar{o} Pk = 0.2383 W
 Puterea reactiva: Q = -116.8934 var \bar{o} Qk = -0.4476 var
 Puterea deformanta: D = 9.4718 vad

D:\DATA\RE3~10.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T comp.

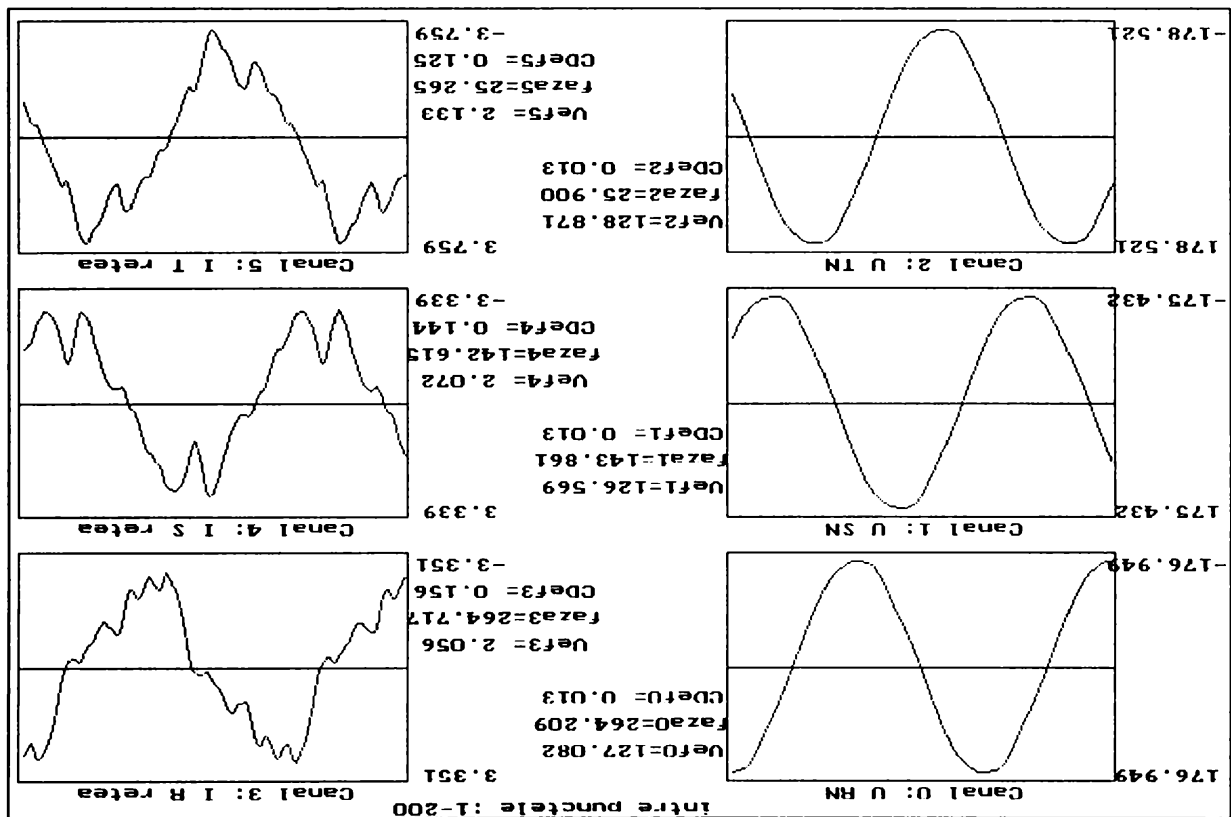
Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	129.15793	0.41336	-157.04143	-49.15930	-20.82495
2	0.59883	0.00389	-24.71658	0.00212	-0.00097
3	1.53665	0.33893	-65.42029	0.21664	-0.47362
4	0.36338	0.01753	-102.71802	-0.00140	-0.00621
5	0.94664	0.21528	-124.12339	-0.11432	-0.16870
6	0.04409	0.01788	-199.11233	-0.00075	0.00026
7	0.87658	0.15186	-67.12091	0.05175	-0.12264
8	0.08018	0.00707	52.14142	0.00035	0.00045
9	0.77032	0.02645	-101.26581	-0.00398	-0.01998
10	0.14483	0.00608	-170.31071	-0.00087	-0.00015
11	0.51303	0.15641	-82.42725	0.01057	-0.07954
12	0.04470	0.00673	-77.93615	0.00006	-0.00029
13	0.27714	0.15682	-63.33967	0.01950	-0.03884
14	0.05540	0.02017	114.03343	-0.00046	0.00102
15	0.34437	0.03655	-72.13261	0.00386	-0.01198
16	0.04728	0.02157	-72.78114	0.00030	-0.00097
17	0.12762	0.14105	-47.95423	0.01206	-0.01337
18	0.08442	0.00137	-71.45367	0.00004	-0.00011
19	0.08816	0.04659	60.93581	0.00200	0.00359
20	0.05332	0.00836	-115.95470	-0.00020	-0.00040
21	0.07607	0.02235	101.00179	-0.00032	0.00167
22	0.05613	0.00565	82.92645	0.00004	0.00031
23	0.07154	0.03697	-79.29115	0.00049	-0.00260
24	0.03025	0.00440	-175.74863	-0.00013	-0.00001
25	0.03230	0.02542	-14.67221	0.00079	-0.00021
26	0.04098	0.00605	-91.05666	-0.00000	-0.00025
27	0.09097	0.01031	-75.98308	0.00023	-0.00091
28	0.02570	0.01466	-116.78390	-0.00017	-0.00034
29	0.02056	0.02564	8.64242	0.00052	0.00008
30	0.03983	0.00632	61.02392	0.00012	0.00022
31	0.03902	0.01255	36.61747	0.00039	0.00029
32	0.03779	0.00201	39.51035	0.00006	0.00005
33	0.03724	0.00291	155.47927	-0.00010	0.00004
34	0.02724	0.00182	84.56229	0.00000	0.00005
35	0.02536	0.00373	-46.08557	0.00007	-0.00007
36	0.02916	0.00011	100.85018	-0.00000	0.00000
37	0.03966	0.00386	-120.10630	-0.00008	-0.00013
38	0.02363	0.00087	109.89310	-0.00001	0.00002
39	0.02130	0.00137	-118.19573	-0.00001	-0.00003
40	0.03090	0.00074	102.67559	-0.00000	0.00002

Puterea aparenta : S = 54.4478 VA
 Puterea activa: P = -48.9601 W \bar{o} Pk = 0.1992 W
 Puterea reactiva: Q = -21.7592 var \bar{o} Qk = -0.9343 var
 Puterea deformanta: D = 9.6955 vad

D:\DATA\RR3_6.TXT

PR = 261.2436 W	QR = -2.3147 var	PH = 0.2104 W	QH = 0.1039 var
PS = 262.2431 W	QS = 5.7018 var	PD = 798.1169 W	QD = 6.3433 var
PT = 274.9121 W	QT = 3.0457 var	PI = 0.0715 W	QI = -0.0144 var
PR = 798.3988 W	QR = 6.4328 var		
kns0 = 0.01200			
kns20 = 0.01260			
knsu = 0.02460			
rnu = 0.98213			
kns01 = 0.02451			
kns21 = 0.00725			
kns1 = 0.03176			
rni = 0.98213			
IR = 2.0558 A	faza 264.7171°	IR* = 2.0558 A	faza -0.5077°
IS = 2.0724 A	faza 142.6155°	IS* = 2.0724 A	faza 1.2456°
IT = 2.1334 A	faza 25.2654°	IT* = 2.1334 A	faza 0.6347°
Ih = 0.0511 A	faza 52.5463°	Ih* = 0.0511 A	faza 26.2728°
Id = 2.0868 A	faza 264.2084°	Id* = 2.0868 A	faza 0.4554°
Ii = 0.0151 A	faza 229.6200°	Ii* = 0.0151 A	faza -11.3607°
UR = 127.0822 V			
URS = 220.0533 V			
faza 113.9688°			
UH = 1.5295 V			
faza 78.8191°			
US = 126.5691 V			
faza 143.8610°			
UST = 218.9136 V			
faza 355.1911°			
UT = 128.8715 V			
faza 25.9002°			
UTR = 223.5281 V			
faza 234.8314°			
UI = 1.6063 V			
faza 218.2593°			
IR* = 2.0557 + j 0.0182 A			
IS* = 2.0719 - j 0.0450 A			
IT* = 2.1332 - j 0.0236 A			
Ih* = 0.0459 - j 0.0226 A			
Id* = 2.0867 - j 0.0166 A			
Ii* = 0.0148 + j 0.0030 A			

Regim nesimetric l.f.c.f.retea



l.f.c.f.retea Date: 07-03-1990 Time: 23:39:58 fisier D:\DATA\RR3_6.TXT

Date: 07-03-1998 Time: 23:39:58
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~6.TXT
 Fisierul contine : t.f.&c.f.retea

CANAL: 3: I R retea

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	-0.55658	-2.74331	2.79920	1.97934	258.531096	1.00000
2	-0.01239	0.00956	0.01565	0.01106	142.359684	0.00559
3	0.38911	-0.49664	0.63092	0.44613	308.078591	0.22539
4	0.00334	-0.02434	0.02456	0.01737	277.812510	0.00878
5	0.14598	0.12511	0.19226	0.13595	40.598656	0.06868
6	0.01762	-0.00268	0.01783	0.01260	351.348758	0.00637
7	-0.17324	0.29475	0.34189	0.24176	120.444978	0.12214
8	-0.00510	0.01466	0.01552	0.01097	109.189547	0.00554
9	0.03726	-0.11034	0.11647	0.08235	288.659801	0.04161
10	0.00792	0.00276	0.00838	0.00593	19.22192	0.00299
11	-0.02825	-0.13073	0.13375	0.09458	257.80785	0.04778
12	0.00975	-0.00121	0.00982	0.00695	352.90560	0.00351
13	-0.14078	-0.02422	0.14285	0.10101	189.76154	0.05103
14	-0.00718	0.00936	0.01180	0.00834	127.48324	0.00421
15	-0.07886	-0.01467	0.08021	0.05672	190.54149	0.02866
16	0.00049	0.00445	0.00448	0.00317	83.75216	0.00160
17	-0.03054	0.00184	0.03059	0.02163	176.54864	0.01093
18	-0.00150	-0.00341	0.00372	0.00263	246.18219	0.00133
19	0.03531	-0.02704	0.04447	0.03145	322.55551	0.01589
20	-0.00212	-0.00609	0.00645	0.00456	250.77016	0.00230
21	-0.00406	-0.00769	0.00869	0.00615	242.14344	0.00311
22	0.00068	-0.00252	0.00261	0.00185	285.06726	0.00093
23	0.00779	-0.01149	0.01388	0.00982	304.11756	0.00496
24	0.00081	-0.00270	0.00282	0.00199	286.71659	0.00101
25	0.02001	0.01403	0.02444	0.01728	35.04950	0.00873
26	0.00209	0.00293	0.00360	0.00254	54.45841	0.00129
27	0.00103	0.00465	0.00477	0.00337	77.55083	0.00170
28	0.01366	0.00382	0.01418	0.01003	15.61374	0.00507
29	-0.01626	-0.00304	0.01654	0.01169	190.59174	0.00591
30	-0.00551	-0.00338	0.00646	0.00457	211.52469	0.00231
31	-0.00958	0.00660	0.01163	0.00823	145.46428	0.00416
32	-0.00341	0.00055	0.00345	0.00244	170.83304	0.00123
33	-0.00271	0.00274	0.00386	0.00273	134.74784	0.00138
34	-0.00248	0.00086	0.00263	0.00186	160.98039	0.00094
35	-0.00021	0.00658	0.00659	0.00466	91.82046	0.00235
36	-0.00050	0.00162	0.00170	0.00120	107.05455	0.00061
37	-0.00216	0.00155	0.00265	0.00188	144.33956	0.00095
38	-0.00091	0.00167	0.00191	0.00135	118.58128	0.00068
39	-0.00144	-0.00059	0.00156	0.00110	202.33211	0.00056
40	-0.00114	0.00088	0.00144	0.00102	142.45186	0.00051

VMed	Vef	PVirf	VMRed	FForma
-0.01415	2.05579	1.63003	1.78743	1.15014
FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.28052	0.15609	0.96281	0.55523	264.84362

Date: 07-03-1998 Time: 23:39:58
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~6.TXT
 Fisierul contine : t.f.&c.f.retea

CANAL: 4: I S retea

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	-2.19233	1.80017	2.83671	2.00586	140.609918	1.00000
2	-0.00388	-0.00942	0.01019	0.00720	247.636538	0.00359
3	-0.04690	0.20173	0.20711	0.14645	103.089194	0.07301
4	0.01317	0.01200	0.01782	0.01260	42.326865	0.00628
5	-0.51685	0.01109	0.51697	0.36556	178.770498	0.18224
6	-0.02617	0.00615	0.02688	0.01901	166.772921	0.00948
7	0.39098	-0.18369	0.43198	0.30545	334.834953	0.15228
8	0.01012	-0.00367	0.01077	0.00761	340.096866	0.00380
9	-0.00964	0.14461	0.14493	0.10248	93.813403	0.05109
10	-0.00455	0.00847	0.00961	0.00680	118.24434	0.00339
11	-0.02985	-0.06000	0.06701	0.04739	243.55248	0.02362
12	-0.01008	-0.00318	0.01057	0.00748	197.49304	0.00373
13	0.10393	0.04241	0.11225	0.07937	22.20019	0.03957
14	0.00201	-0.00312	0.00371	0.00262	302.77010	0.00131
15	0.03073	0.01356	0.03359	0.02375	23.81610	0.01184
16	0.00820	-0.00232	0.00852	0.00603	344.16969	0.00300
17	0.00746	-0.03418	0.03498	0.02474	282.31044	0.01233
18	-0.00394	0.00376	0.00545	0.00385	136.38362	0.00192
19	-0.01416	-0.01015	0.01742	0.01232	215.63371	0.00614
20	-0.00041	0.00025	0.00048	0.00034	148.39436	0.00017
21	-0.01976	0.00939	0.02188	0.01547	154.59360	0.00771
22	0.00065	0.00594	0.00598	0.00423	83.76340	0.00211
23	-0.00999	0.01291	0.01632	0.01154	127.73434	0.00575
24	-0.00439	0.00620	0.00760	0.00537	125.26831	0.00268
25	0.00439	-0.00857	0.00963	0.00681	297.11697	0.00339
26	-0.00353	-0.00260	0.00438	0.00310	216.35598	0.00154
27	-0.00069	0.00145	0.00160	0.00113	115.56058	0.00056
28	-0.01285	0.01441	0.01931	0.01365	131.71309	0.00681
29	0.01422	-0.01833	0.02320	0.01640	307.81137	0.00818
30	0.00365	-0.00613	0.00713	0.00504	300.76821	0.00251
31	0.00927	-0.00468	0.01039	0.00734	333.20107	0.00366
32	0.00198	-0.00279	0.00342	0.00242	305.41065	0.00121
33	0.00449	-0.00493	0.00667	0.00472	312.33123	0.00235
34	0.00169	-0.00313	0.00356	0.00251	298.39609	0.00125
35	-0.00519	-0.00436	0.00678	0.00479	220.00135	0.00239
36	0.00065	-0.00139	0.00154	0.00109	294.97700	0.00054
37	0.00233	-0.00334	0.00407	0.00288	304.81319	0.00144
38	0.00065	-0.00121	0.00138	0.00097	298.14232	0.00049
39	0.00015	0.00051	0.00053	0.00037	73.49691	0.00019
40	0.00045	-0.00143	0.00150	0.00106	287.68624	0.00053

VMed	Vbf	FVirf	VMRed	PForma
-0.02943	2.07243	1.61138	1.81841	1.13969

PDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.25935	0.14369	0.96788	0.52022	142.54347

D:\DATA\RE3~6.TXT

Date: 07-03-1998 Time: 23:39:58
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~6.TXT
 Fisierul contine : t.f.&c.f.retea

CANAL: 5: I T retea

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	2.78734	0.92412	2.93654	2.07645	18.342581	1.00000
2	0.01581	-0.00038	0.01581	0.01118	358.630417	0.00539
3	-0.32361	0.31305	0.45025	0.31837	135.950370	0.15333
4	-0.01557	0.01387	0.02085	0.01474	138.303445	0.00710
5	0.36237	-0.14299	0.38956	0.27546	338.465187	0.13266
6	0.00804	-0.00139	0.00816	0.00577	350.205716	0.00278
7	-0.24145	-0.10923	0.26501	0.18739	204.340972	0.09024
8	-0.00625	-0.01108	0.01272	0.00900	240.566856	0.00433
9	-0.02178	-0.03286	0.03942	0.02788	236.463475	0.01343
10	-0.00406	-0.00916	0.01002	0.00708	246.11799	0.00341
11	0.08504	0.18306	0.20184	0.14273	65.08232	0.06874
12	0.00097	0.00623	0.00631	0.00446	81.10962	0.00215
13	0.03540	-0.03607	0.05054	0.03574	314.46405	0.01721
14	0.00340	-0.00623	0.00710	0.00502	298.61929	0.00242
15	0.04936	-0.01448	0.05144	0.03637	343.64800	0.01752
16	-0.00862	-0.00042	0.00863	0.00611	182.79367	0.00294
17	0.02710	0.02533	0.03709	0.02623	43.06653	0.01263
18	0.00588	-0.00085	0.00594	0.00420	351.80494	0.00202
19	-0.01116	0.04417	0.04556	0.03222	104.17646	0.01551
20	0.00433	0.00534	0.00688	0.00487	50.96484	0.00234
21	0.02386	-0.00658	0.02475	0.01750	344.57862	0.00843
22	-0.00152	-0.00162	0.00222	0.00157	226.88459	0.00076
23	0.00416	-0.00079	0.00423	0.00299	349.27133	0.00144
24	0.00383	-0.00401	0.00555	0.00392	313.65774	0.00189
25	-0.02649	0.00381	0.02676	0.01892	171.80887	0.00911
26	0.00131	0.00039	0.00136	0.00096	16.45042	0.00046
27	-0.00208	-0.00517	0.00557	0.00394	248.11049	0.00190
28	-0.00409	-0.01450	0.01507	0.01065	254.26257	0.00513
29	0.00760	0.01672	0.01836	0.01298	65.55364	0.00625
30	0.00518	0.00711	0.00879	0.00622	53.93846	0.00299
31	-0.00247	-0.00288	0.00379	0.00268	229.44614	0.00129
32	0.00177	0.00106	0.00206	0.00146	30.87838	0.00070
33	-0.00180	0.00213	0.00279	0.00198	130.20569	0.00095
34	0.00108	0.00129	0.00168	0.00119	49.98386	0.00057
35	0.00375	-0.00332	0.00501	0.00354	318.52086	0.00171
36	0.00045	0.00024	0.00051	0.00036	27.66358	0.00017
37	0.00050	0.00095	0.00107	0.00076	62.15651	0.00037
38	0.00022	-0.00012	0.00025	0.00018	330.51757	0.00008
39	0.00147	-0.00070	0.00163	0.00115	334.62568	0.00055
40	0.00068	0.00018	0.00070	0.00050	14.91713	0.00024

VMed	Vef	FVirf	VMRed	FForma
0.00761	2.13336	1.75981	1.89184	1.12766
FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.23569	0.12499	0.97332	0.48940	25.11144

D:\DATA\RB3~6.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.05347	1.97934	4.96599	250.53756	21.76934
2	0.22292	0.01106	117.28602	-0.00113	0.00219
3	0.57850	0.44613	-200.17573	-0.24225	0.08901
4	0.16103	0.01737	-67.08558	0.00109	-0.00258
5	2.13020	0.13595	-44.02206	0.20824	-0.20125
6	0.06801	0.01260	-51.62513	0.00053	-0.00067
7	0.99221	0.24176	-75.96838	0.05816	-0.23271
8	0.06072	0.01097	-119.37347	-0.00033	-0.00058
9	0.69731	0.08235	-133.80371	-0.03975	-0.04145
10	0.01669	0.00593	-124.78200	-0.00006	-0.00008
11	0.30871	0.09458	-109.78918	-0.00988	-0.02747
12	0.02794	0.00695	-140.24297	-0.00015	-0.00012
13	0.16394	0.10101	-99.07366	-0.00261	-0.01635
14	0.01193	0.00834	-78.25646	0.00002	-0.00010
15	0.12991	0.05672	-131.01340	-0.00484	-0.00556
16	0.01413	0.00317	-90.25061	-0.00000	-0.00004
17	0.05918	0.02163	-5.92056	0.00127	-0.00013
18	0.01389	0.00263	-54.22888	0.00002	-0.00003
19	0.08682	0.03145	-28.81326	0.00239	-0.00132
20	0.02766	0.00456	-51.40451	0.00008	-0.00010
21	0.08260	0.00615	64.62505	0.00022	0.00046
22	0.00235	0.00185	11.15683	0.00000	0.00000
23	0.03231	0.00982	-51.56650	0.00020	-0.00025
24	0.00535	0.00199	56.72835	0.00001	0.00001
25	0.02499	0.01728	-85.80981	0.00003	-0.00043
26	0.01298	0.00254	-106.68164	-0.00001	-0.00003
27	0.04729	0.00337	-10.02468	0.00016	-0.00003
28	0.01451	0.01003	-84.47123	0.00001	-0.00014
29	0.01081	0.01169	-47.47710	0.00009	-0.00009
30	0.00328	0.00457	-69.45535	0.00001	-0.00001
31	0.01533	0.00823	123.06392	-0.00007	0.00011
32	0.00294	0.00244	-168.55637	-0.00001	-0.00000
33	0.02549	0.00273	0.58679	0.00007	0.00000
34	0.00796	0.00186	70.52183	0.00000	0.00001
35	0.01986	0.00466	135.27433	-0.00007	0.00007
36	0.00572	0.00120	-50.11605	0.00000	-0.00001
37	0.00957	0.00188	23.65638	0.00002	0.00001
38	0.01175	0.00135	165.26723	-0.00002	0.00000
39	0.01650	0.00110	47.65699	0.00001	0.00001
40	0.00297	0.00102	-118.28747	-0.00000	-0.00000

Puterea aparenta : S = 252.3932 VA
 Puterea activa: P = 250.5090 W \bar{o} Pk = -0.0285 W
 Puterea reactiva: Q = 21.3297 var \bar{o} Qk = -0.4397 var
 Puterea deformanta: D = 22.1943 vad

D:\DATA\RE3~6.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.54084	2.00586	2.73852	253.53276	12.12712
2	0.39848	0.00720	-87.52107	0.00012	-0.00287
3	1.05953	0.14645	-7.99444	0.15366	-0.02158
4	0.10450	0.01260	149.01034	-0.00113	0.00068
5	2.09036	0.36556	-55.30621	0.43494	-0.62828
6	0.12389	0.01901	-29.83269	0.00204	-0.00117
7	1.02075	0.30545	-81.39303	0.04666	-0.30828
8	0.06174	0.00761	-166.76406	-0.00046	-0.00011
9	0.39122	0.10248	55.72308	0.02258	0.03313
10	0.09422	0.00680	40.41215	0.00049	0.00042
11	0.17013	0.04739	-43.99910	0.00580	-0.00560
12	0.06145	0.00748	-39.34212	0.00036	-0.00029
13	0.09915	0.07937	-178.07950	-0.00787	-0.00026
14	0.05927	0.00262	-131.68893	-0.00010	-0.00012
15	0.10244	0.02375	-133.95424	-0.00169	-0.00175
16	0.04748	0.00603	-179.04042	-0.00029	-0.00000
17	0.05835	0.02474	-81.84991	0.00020	-0.00143
18	0.04035	0.00385	14.94910	0.00015	0.00004
19	0.07021	0.01232	-65.17108	0.00036	-0.00078
20	0.04747	0.00034	-0.54171	0.00002	-0.00000
21	0.04787	0.01547	107.10077	-0.00022	0.00071
22	0.04274	0.00423	66.57480	0.00007	0.00017
23	0.03361	0.01154	0.50310	0.00039	0.00000
24	0.04043	0.00537	12.98488	0.00021	0.00005
25	0.02199	0.00681	-79.36659	0.00003	-0.00015
26	0.02151	0.00310	-62.73826	0.00003	-0.00006
27	0.04017	0.00113	-35.35582	0.00004	-0.00003
28	0.02251	0.01365	-0.35607	0.00031	-0.00000
29	0.02431	0.01640	-163.11737	-0.00038	-0.00012
30	0.02462	0.00504	-162.92953	-0.00012	-0.00004
31	0.01971	0.00734	-249.87440	-0.00005	0.00014
32	0.01677	0.00242	-159.23039	-0.00004	-0.00001
33	0.03391	0.00472	-206.43147	-0.00014	0.00007
34	0.01994	0.00251	-188.81173	-0.00005	0.00001
35	0.00811	0.00479	-32.67373	0.00003	-0.00002
36	0.02641	0.00109	-184.12565	-0.00003	0.00000
37	0.02416	0.00288	-175.49062	-0.00007	-0.00001
38	0.02899	0.00097	-186.34405	-0.00003	0.00000
39	0.02584	0.00037	86.08498	0.00000	0.00001
40	0.02889	0.00106	-147.20437	-0.00003	-0.00002

Puterea aparenta : S = 255.1264 VA
 Puterea activa: P = 254.1886 W $\delta P_k = 0.6558$ W
 Puterea reactiva: Q = 11.1896 var $\delta Q_k = -0.9376$ var
 Puterea deformanta: D = 18.7740 vad

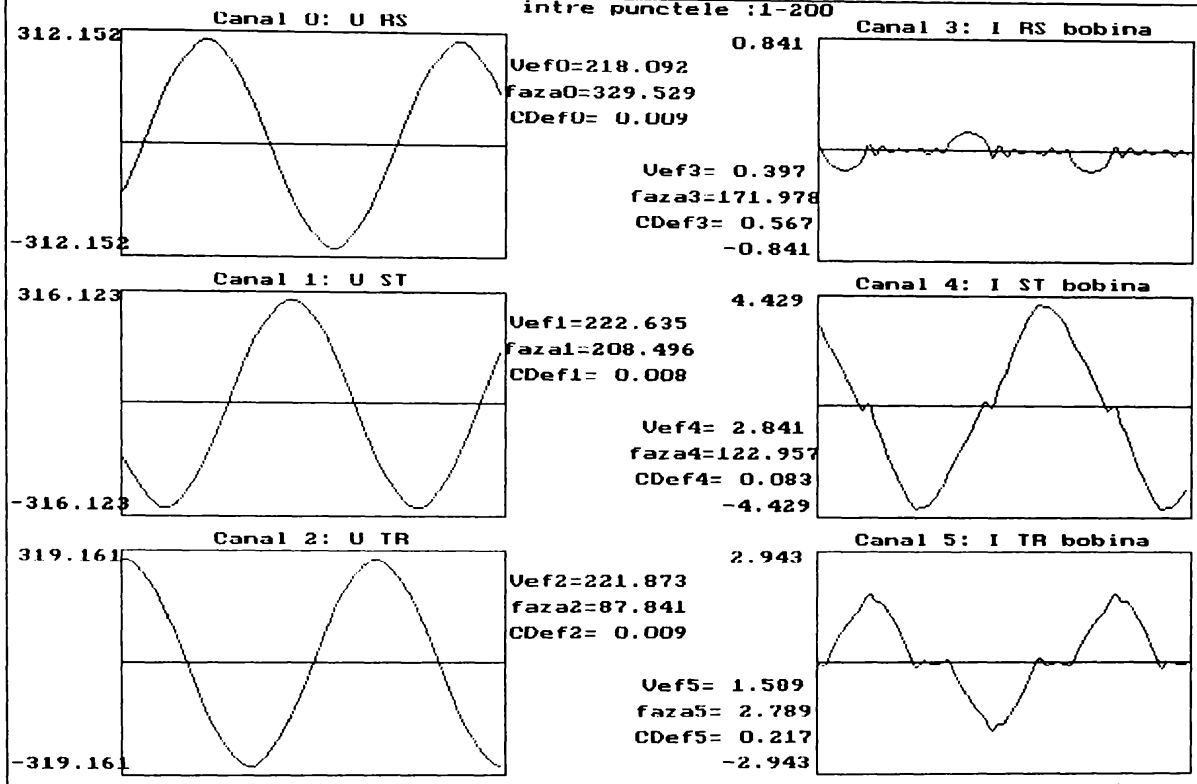
D:\DATA\RE3~6.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T retea

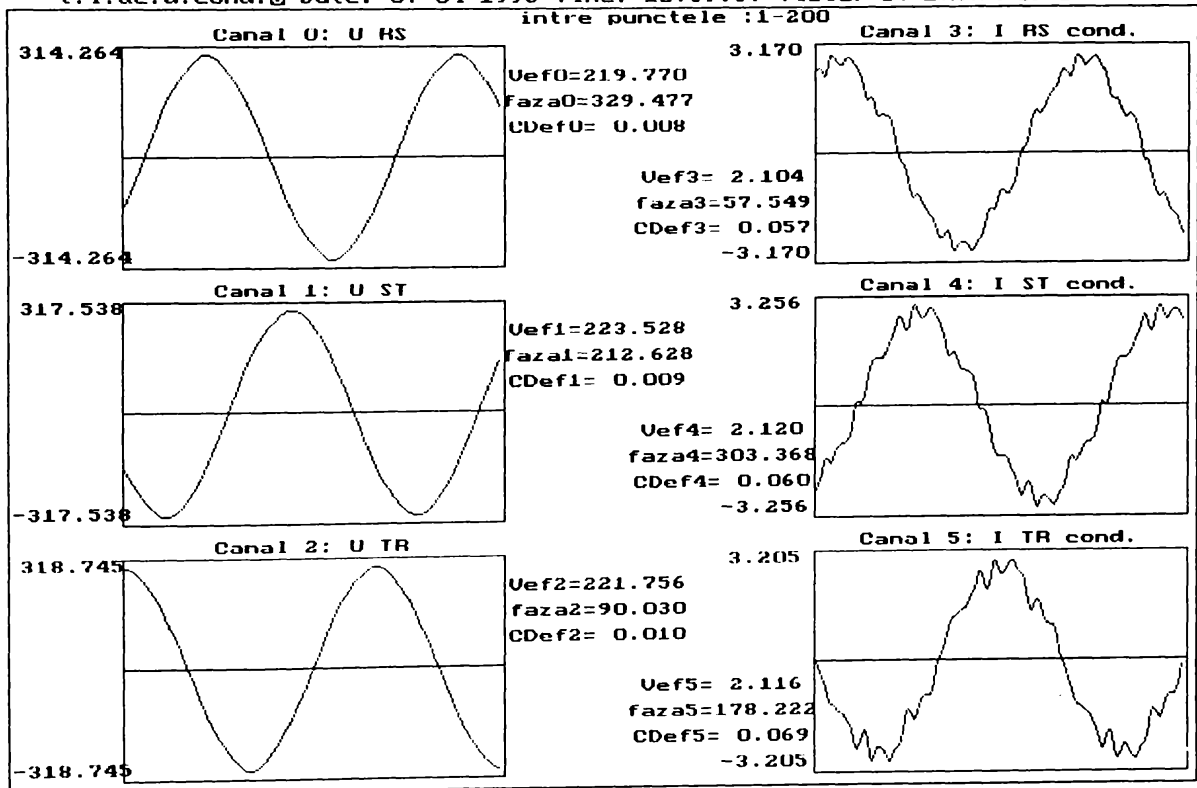
Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	128.83828	2.07645	5.63413	266.23383	26.26459
2	0.71720	0.01118	-168.08326	-0.00785	-0.00166
3	1.20814	0.31837	-66.90175	0.15090	-0.35380
4	0.27626	0.01474	39.39711	0.00315	0.00258
5	1.94664	0.27546	-104.90906	-0.13796	-0.51817
6	0.23921	0.00577	-191.07709	-0.00135	0.00027
7	1.01827	0.18739	-44.86062	0.13525	-0.13460
8	0.14887	0.00900	-62.48407	0.00062	-0.00119
9	0.60053	0.02788	-73.70887	0.00470	-0.01607
10	0.07638	0.00708	-75.27826	0.00014	-0.00052
11	0.17673	0.14273	-87.93164	0.00091	-0.02521
12	0.10063	0.00446	93.73124	-0.00003	0.00045
13	0.15751	0.03574	-92.48296	-0.00024	-0.00562
14	0.06919	0.00502	-138.62932	-0.00026	-0.00023
15	0.06459	0.03637	-107.23987	-0.00070	-0.00224
16	0.08618	0.00611	-36.20074	0.00042	-0.00031
17	0.03163	0.02623	123.60019	-0.00046	0.00069
18	0.06719	0.00420	-202.02523	-0.00026	0.00011
19	0.07279	0.03222	20.66409	0.00219	0.00083
20	0.04466	0.00487	102.40491	-0.00005	0.00021
21	0.05317	0.01750	-71.17846	0.00030	-0.00088
22	0.07264	0.00157	-75.37517	0.00003	-0.00011
23	0.04833	0.00299	-186.41899	-0.00014	0.00002
24	0.04805	0.00392	-180.94006	-0.00019	0.00000
25	0.03201	0.01892	2.09518	0.00061	0.00002
26	0.04395	0.00096	121.89620	-0.00002	0.00004
27	0.07049	0.00394	-134.03402	-0.00019	-0.00020
28	0.03102	0.01065	-97.26076	-0.00004	-0.00033
29	0.04353	0.01298	79.06962	0.00011	0.00055
30	0.04962	0.00622	83.29234	0.00004	0.00031
31	0.03754	0.00268	-100.63012	-0.00002	-0.00010
32	0.04056	0.00146	117.58743	-0.00003	0.00005
33	0.06769	0.00198	17.54461	0.00013	0.00004
34	0.03777	0.00119	77.86206	0.00001	0.00004
35	0.03725	0.00354	-165.40918	-0.00013	-0.00003
36	0.03968	0.00036	101.54366	-0.00000	0.00001
37	0.05141	0.00076	73.12674	0.00001	0.00004
38	0.03044	0.00018	-195.60463	-0.00001	0.00000
39	0.03010	0.00115	-191.95409	-0.00003	0.00001
40	0.02815	0.00050	103.64332	-0.00000	0.00001

Puterea aparenta : S = 268.7123 VA
 Puterea activa: P = 266.3834 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.1495 W
 Puterea reactiva: Q = 25.2096 var $\bar{\sigma}$ Qk = -1.0550 var
 Puterea deformanta: D = 24.7117 vad

t.l.&c.d.bob.Ⓞ Date: 07-04-1998 Time: 12:44:09 fisier D:\DATA\RE3~11.TXT
 intre punctele :1-200



t.l.&c.d.cond.Ⓞ Date: 07-04-1998 Time: 12:59:57 fisier D:\DATA\RE3~12.TXT
 intre punctele :1-200



Date: 07-04-1998 Time: 12:59:57
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~12.TXT
 Fisierul contine : t.l.&c.d.cond.

CANAL: 5: I TR cond.

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	-2.96633	0.18298	2.97197	2.10150	176.470164	1.00000
2	-0.01344	0.00097	0.01348	0.00953	175.871368	0.00453
3	-0.06162	-0.01714	0.06396	0.04522	195.543412	0.02152
4	-0.00367	0.00023	0.00367	0.00260	176.334282	0.00124
5	-0.09253	0.14010	0.16790	0.11872	123.441886	0.05649
6	-0.00308	0.00359	0.00473	0.00334	130.624156	0.00159
7	-0.17529	-0.00556	0.17537	0.12401	181.816299	0.05901
8	-0.00920	0.00564	0.01079	0.00763	148.477494	0.00363
9	0.00475	0.01624	0.01692	0.01196	73.694952	0.00569
10	-0.00588	0.00103	0.00597	0.00422	170.04363	0.00201
11	0.09007	0.06836	0.11307	0.07995	37.19574	0.03805
12	0.00416	0.00774	0.00879	0.00621	61.75419	0.00296
13	-0.11432	-0.03755	0.12033	0.08509	198.18183	0.04049
14	-0.00847	0.00567	0.01019	0.00721	146.16346	0.00343
15	-0.04016	0.05235	0.06598	0.04666	127.49340	0.02220
16	-0.00570	0.01378	0.01492	0.01055	112.47473	0.00502
17	-0.01568	-0.15620	0.15699	0.11101	264.26897	0.05282
18	-0.00585	-0.00506	0.00773	0.00547	220.83416	0.00260
19	0.00477	0.02144	0.02196	0.01553	77.46608	0.00739
20	-0.00387	0.00483	0.00619	0.00438	128.74383	0.00208
21	0.01752	-0.00115	0.01756	0.01241	356.24052	0.00591
22	0.00373	0.00460	0.00593	0.00419	50.95773	0.00199
23	-0.04324	-0.01125	0.04468	0.03159	194.58963	0.01503
24	-0.00662	0.00400	0.00774	0.00547	148.89922	0.00260
25	0.00514	-0.00662	0.00839	0.00593	307.83217	0.00282
26	-0.00180	-0.00327	0.00373	0.00264	241.10956	0.00126
27	-0.00519	0.01065	0.01185	0.00838	115.98126	0.00399
28	-0.00799	0.01322	0.01544	0.01092	121.14385	0.00520
29	0.01741	-0.01417	0.02244	0.01587	320.86024	0.00755
30	0.00572	-0.00378	0.00685	0.00485	326.52671	0.00231
31	-0.00943	-0.01130	0.01472	0.01041	230.14447	0.00495
32	-0.00085	-0.00147	0.00170	0.00120	240.03095	0.00057
33	0.00135	0.00102	0.00170	0.00120	37.09706	0.00057
34	-0.00032	0.00062	0.00070	0.00050	116.99580	0.00024
35	-0.00107	-0.00558	0.00568	0.00402	259.12782	0.00191
36	0.00001	-0.00102	0.00102	0.00072	270.66383	0.00034
37	-0.00586	0.00151	0.00605	0.00428	165.54654	0.00204
38	-0.00026	0.00114	0.00117	0.00083	102.66041	0.00039
39	-0.00143	-0.00225	0.00267	0.00189	237.60381	0.00090
40	-0.00004	-0.00050	0.00050	0.00035	265.43523	0.00017

VMed	Vef	FVirf	VMRed	FForma
0.01074	2.11630	1.51457	1.93491	1.09375

FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.11880	0.06927	0.99300	0.24966	178.22238

Date: 07-04-1998 Time: 12:59:57
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~12.TXT
 Fisierul contine : t.l.&c.d.cond.

CANAL: 4: I ST cond.

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	1.42653	-2.61874	2.98208	2.10865	298.578900	1.00000
2	-0.01135	0.00440	0.01217	0.00860	158.821239	0.00408
3	0.02840	0.01865	0.03398	0.02402	33.286533	0.01139
4	-0.00588	-0.00963	0.01129	0.00798	238.615509	0.00378
5	0.14036	0.00757	0.14057	0.09940	3.089098	0.04714
6	0.00036	0.00407	0.00408	0.00289	84.932900	0.00137
7	0.07060	-0.10271	0.12464	0.08813	304.501077	0.04180
8	-0.00120	0.00347	0.00367	0.00259	109.046052	0.00123
9	0.02537	0.00601	0.02607	0.01844	13.333392	0.00874
10	-0.00320	-0.00685	0.00756	0.00535	244.923339	0.00253
11	-0.03273	-0.09552	0.10097	0.07140	251.08933	0.03386
12	0.00609	0.00487	0.00779	0.00551	38.63745	0.00261
13	0.14079	0.02481	0.14295	0.10108	9.99379	0.04794
14	-0.01230	0.00457	0.01312	0.00928	159.60134	0.00440
15	-0.00448	-0.01236	0.01314	0.00929	250.06328	0.00441
16	-0.01144	-0.00121	0.01151	0.00814	186.02046	0.00386
17	-0.13356	0.04044	0.13955	0.09867	163.15508	0.04679
18	0.00670	-0.00031	0.00671	0.00475	357.39464	0.00225
19	-0.01872	-0.01823	0.02613	0.01848	224.24375	0.00876
20	0.00321	0.00695	0.00766	0.00541	65.17288	0.00257
21	0.00822	-0.00195	0.00844	0.00597	346.62762	0.00283
22	-0.00313	0.00351	0.00470	0.00332	131.75394	0.00158
23	-0.02109	0.04598	0.05059	0.03577	114.63428	0.01696
24	0.00601	-0.00057	0.00603	0.00427	354.61796	0.00202
25	0.00988	0.01869	0.02114	0.01495	62.15098	0.00709
26	0.00044	-0.00229	0.00233	0.00165	280.99541	0.00078
27	0.00661	-0.00154	0.00679	0.00480	346.85716	0.00228
28	-0.00049	0.00395	0.00398	0.00281	97.05420	0.00133
29	-0.00978	-0.00916	0.01340	0.00947	223.13595	0.00449
30	-0.00045	-0.00312	0.00315	0.00223	261.75414	0.00106
31	0.00967	-0.00190	0.00986	0.00697	348.88524	0.00330
32	-0.00299	-0.00200	0.00360	0.00254	213.86648	0.00121
33	0.00413	-0.00459	0.00617	0.00437	311.92946	0.00207
34	-0.00175	0.00045	0.00181	0.00128	165.52419	0.00061
35	-0.00407	-0.00197	0.00452	0.00320	205.77983	0.00152
36	-0.00041	-0.00086	0.00095	0.00067	244.44069	0.00032
37	0.00308	-0.00079	0.00318	0.00225	345.54583	0.00106
38	-0.00056	0.00122	0.00134	0.00095	114.76775	0.00045
39	0.00025	-0.00276	0.00277	0.00196	275.09023	0.00093
40	-0.00054	-0.00035	0.00064	0.00046	212.49959	0.00022

VMed	Vef	FVirf	VMRed	FForma
-0.04643	2.12010	1.53585	1.92776	1.09977
FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.10199	0.06036	0.99460	0.21506	303.36793

Date: 07-04-1998 Time: 12:59:57
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~12.TXT
 Fisierul contine : t.l.&c.d.cond.

CANAL: 3: I RS cond.

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	1.59404	2.49677	2.96224	2.09462	57.444163	1.00000
2	0.00902	0.00676	0.01127	0.00797	36.836352	0.00380
3	0.02176	-0.01840	0.02850	0.02015	319.774728	0.00962
4	0.00841	0.00499	0.00977	0.00691	30.679782	0.00330
5	-0.04420	-0.13068	0.13795	0.09755	251.312995	0.04657
6	-0.00409	-0.01361	0.01421	0.01005	253.290307	0.00480
7	0.10866	0.13365	0.17225	0.12180	50.888475	0.05815
8	0.00238	-0.00158	0.00285	0.00202	326.465960	0.00096
9	-0.03345	-0.01489	0.03661	0.02589	203.992748	0.01236
10	0.00178	0.00294	0.00343	0.00243	58.86779	0.00116
11	-0.02827	0.01110	0.03037	0.02148	158.56924	0.01025
12	0.00057	-0.00238	0.00245	0.00173	283.53696	0.00083
13	-0.04752	0.06998	0.08459	0.05981	124.17768	0.02856
14	-0.00116	-0.00366	0.00384	0.00271	252.43060	0.00130
15	0.04547	-0.01755	0.04873	0.03446	338.89626	0.01645
16	-0.00173	0.00046	0.00179	0.00126	164.96798	0.00060
17	0.08844	0.07993	0.11921	0.08429	42.10468	0.04024
18	0.00357	0.00201	0.00410	0.00290	29.33221	0.00138
19	0.03094	-0.00059	0.03095	0.02188	358.90854	0.01045
20	0.00694	-0.00572	0.00900	0.00636	320.52166	0.00304
21	-0.02024	0.00195	0.02033	0.01438	174.49491	0.00686
22	-0.00009	0.00049	0.00049	0.00035	100.23293	0.00017
23	0.03966	-0.02306	0.04588	0.03244	329.82203	0.01549
24	0.00621	-0.00292	0.00686	0.00485	334.86632	0.00232
25	-0.01889	-0.01572	0.02457	0.01737	219.76336	0.00829
26	-0.00117	-0.00120	0.00168	0.00119	225.62462	0.00057
27	0.00068	-0.00787	0.00790	0.00559	274.95665	0.00267
28	0.00587	-0.01417	0.01533	0.01084	292.49329	0.00518
29	-0.00974	0.00506	0.01098	0.00776	152.55467	0.00371
30	-0.00234	-0.00007	0.00234	0.00165	181.64240	0.00079
31	-0.00570	0.01721	0.01812	0.01282	108.32419	0.00612
32	0.00056	0.00184	0.00192	0.00136	73.10887	0.00065
33	-0.00205	0.00385	0.00436	0.00308	117.97645	0.00147
34	0.00078	0.00022	0.00082	0.00058	15.96789	0.00028
35	0.00112	0.00141	0.00180	0.00128	51.49262	0.00061
36	-0.00055	0.00051	0.00075	0.00053	136.81693	0.00025
37	0.00505	0.00587	0.00774	0.00547	49.29826	0.00261
38	0.00160	0.00044	0.00166	0.00118	15.23816	0.00056
39	0.00049	0.00155	0.00163	0.00115	72.46071	0.00055
40	0.00006	-0.00037	0.00038	0.00027	278.88627	0.00013

VMed	Vef	FVirf	VMRed	FForma
0.00660	2.10428	1.50642	1.92842	1.09119

FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.09611	0.05732	0.99541	0.20132	57.54891

Date: 07-04-1998 Time: 12:44:09
 Nume fisier : D:\DATA\RB3~11.TXT
 Fisierul contine : t.l.&c.d.bob.

CANAL: 5: I TR bobina

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	2.07184	0.41210	2.11243	1.49372	11.249642	1.00000
2	0.01680	0.00077	0.01682	0.01189	2.608214	0.00796
3	-0.63831	-0.38029	0.74300	0.52538	210.785451	0.35173
4	-0.00217	-0.00075	0.00230	0.00163	199.148260	0.00109
5	-0.00525	-0.13082	0.13092	0.09257	267.699621	0.06198
6	0.00230	-0.00351	0.00420	0.00297	303.210543	0.00199
7	-0.00045	-0.03126	0.03127	0.02211	269.181766	0.01480
8	0.00042	-0.00591	0.00593	0.00419	274.059668	0.00281
9	-0.03993	0.09537	0.10339	0.07311	112.721605	0.04894
10	0.00054	0.00124	0.00135	0.00096	66.55416	0.00064
11	-0.03327	0.03417	0.04769	0.03372	134.23683	0.02257
12	-0.00017	-0.00057	0.00059	0.00042	253.70767	0.00028
13	-0.05691	-0.00923	0.05765	0.04076	189.21144	0.02729
14	-0.00403	-0.00038	0.00405	0.00286	185.38868	0.00192
15	0.01004	0.01556	0.01851	0.01309	57.16786	0.00876
16	-0.00233	0.00196	0.00304	0.00215	139.90284	0.00144
17	0.01168	-0.02586	0.02838	0.02007	294.31640	0.01343
18	-0.00137	-0.00262	0.00296	0.00209	242.43565	0.00140
19	0.01260	0.03426	0.03651	0.02581	69.81244	0.01728
20	-0.00081	0.00286	0.00298	0.00210	105.79370	0.00141
21	0.00529	-0.00056	0.00532	0.00376	353.94581	0.00252
22	0.00056	0.00072	0.00091	0.00064	52.14246	0.00043
23	-0.01013	0.00530	0.01143	0.00808	152.38084	0.00541
24	-0.00160	0.00208	0.00262	0.00185	127.53138	0.00124
25	0.00297	-0.00788	0.00842	0.00595	290.65879	0.00398
26	-0.00002	0.00055	0.00055	0.00039	91.70507	0.00026
27	0.00023	-0.00483	0.00483	0.00342	272.72715	0.00229
28	0.00053	0.00023	0.00057	0.00041	23.51179	0.00027
29	0.00372	-0.00081	0.00380	0.00269	347.72287	0.00180
30	0.00122	-0.00009	0.00123	0.00087	355.94755	0.00058
31	-0.00212	0.00012	0.00213	0.00150	176.81060	0.00101
32	0.00043	0.00067	0.00079	0.00056	57.13530	0.00038
33	-0.00018	-0.00069	0.00071	0.00050	255.35602	0.00034
34	0.00101	0.00014	0.00102	0.00072	7.63039	0.00048
35	-0.00135	-0.00201	0.00242	0.00171	236.07150	0.00114
36	-0.00056	-0.00056	0.00079	0.00056	225.23128	0.00038
37	0.00136	0.00108	0.00173	0.00123	38.42979	0.00082
38	0.00084	-0.00012	0.00085	0.00060	351.80150	0.00040
39	-0.00013	-0.00055	0.00056	0.00040	256.18642	0.00027
40	-0.00022	-0.00060	0.00064	0.00045	249.95396	0.00030

VMed	VEf	FVirf	VMRed	FForma
-0.00878	1.58936	1.85070	1.21004	1.31347
FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.36350	0.21735	0.93982	0.54296	2.78917

Date: 07-04-1998 Time: 12:44:09
 Nume fisier : D:\DATA\RB3~11.TXT
 Fisierul contine : t.l.&c.d.bob.

CANAL: 4: I ST bobina

Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	-1.69120	3.60550	3.98243	2.81600	115.129405	1.00000
2	-0.00288	0.00313	0.00425	0.00301	132.561019	0.00107
3	-0.49091	-0.02216	0.49141	0.34748	182.585007	0.12339
4	-0.01182	0.00279	0.01215	0.00859	166.717936	0.00305
5	0.10171	0.01758	0.10322	0.07299	9.806926	0.02592
6	0.00198	0.00290	0.00351	0.00248	55.624829	0.00088
7	-0.05504	-0.06184	0.08279	0.05854	228.328213	0.02079
8	-0.00484	-0.00562	0.00742	0.00525	229.248306	0.00186
9	-0.02233	0.09463	0.09723	0.06875	103.276783	0.02442
10	-0.00380	0.00540	0.00660	0.00467	125.17479	0.00166
11	0.02527	-0.01551	0.02965	0.02097	328.45559	0.00745
12	0.00123	-0.00187	0.00224	0.00158	303.38334	0.00056
13	-0.04196	-0.00509	0.04227	0.02989	186.91847	0.01061
14	-0.00540	-0.00036	0.00541	0.00383	183.81188	0.00136
15	0.03427	0.03902	0.05194	0.03672	48.70691	0.01304
16	0.00015	0.00420	0.00421	0.00297	87.94180	0.00106
17	0.00228	-0.03290	0.03298	0.02332	273.96378	0.00828
18	-0.00111	-0.00357	0.00374	0.00264	252.66790	0.00094
19	0.00192	0.04268	0.04273	0.03021	87.42023	0.01073
20	-0.00135	0.00466	0.00485	0.00343	106.09589	0.00122
21	0.00877	-0.01073	0.01386	0.00980	309.27530	0.00348
22	0.00169	0.00058	0.00178	0.00126	19.12905	0.00045
23	-0.01238	0.00482	0.01329	0.00940	158.71745	0.00334
24	-0.00228	0.00174	0.00287	0.00203	142.61564	0.00072
25	0.00804	-0.00399	0.00898	0.00635	333.63173	0.00225
26	0.00039	0.00123	0.00129	0.00091	72.55868	0.00032
27	-0.00054	-0.00297	0.00302	0.00213	259.70688	0.00076
28	-0.00053	0.00102	0.00115	0.00081	117.61108	0.00029
29	0.00330	-0.00013	0.00330	0.00234	357.81687	0.00083
30	0.00013	0.00042	0.00044	0.00031	72.59731	0.00011
31	-0.00231	0.00012	0.00231	0.00163	176.98008	0.00058
32	-0.00028	0.00081	0.00085	0.00060	108.93862	0.00021
33	0.00183	-0.00036	0.00186	0.00132	348.82085	0.00047
34	0.00094	0.00046	0.00105	0.00074	25.82747	0.00026
35	-0.00221	-0.00230	0.00319	0.00225	226.11334	0.00080
36	-0.00067	-0.00003	0.00067	0.00047	182.62871	0.00017
37	0.00065	0.00193	0.00204	0.00144	71.33355	0.00051
38	0.00041	0.00110	0.00117	0.00083	69.30389	0.00029
39	-0.00014	-0.00228	0.00228	0.00161	266.45494	0.00057
40	-0.00011	0.00019	0.00021	0.00015	119.76352	0.00005

VMed	VBf	FVirf	VMRed	FForma
0.01817	2.84060	1.55751	2.44324	1.16264
FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.13230	0.08301	0.99134	0.37256	122.95745

Date: 07-04-1998 Time: 12:44:09
 Nume fisier : D:\DATA\RE3~11.TXT
 Fisierul contine : t.l.&c.d.bob.

CANAL: 3: I RS bobina

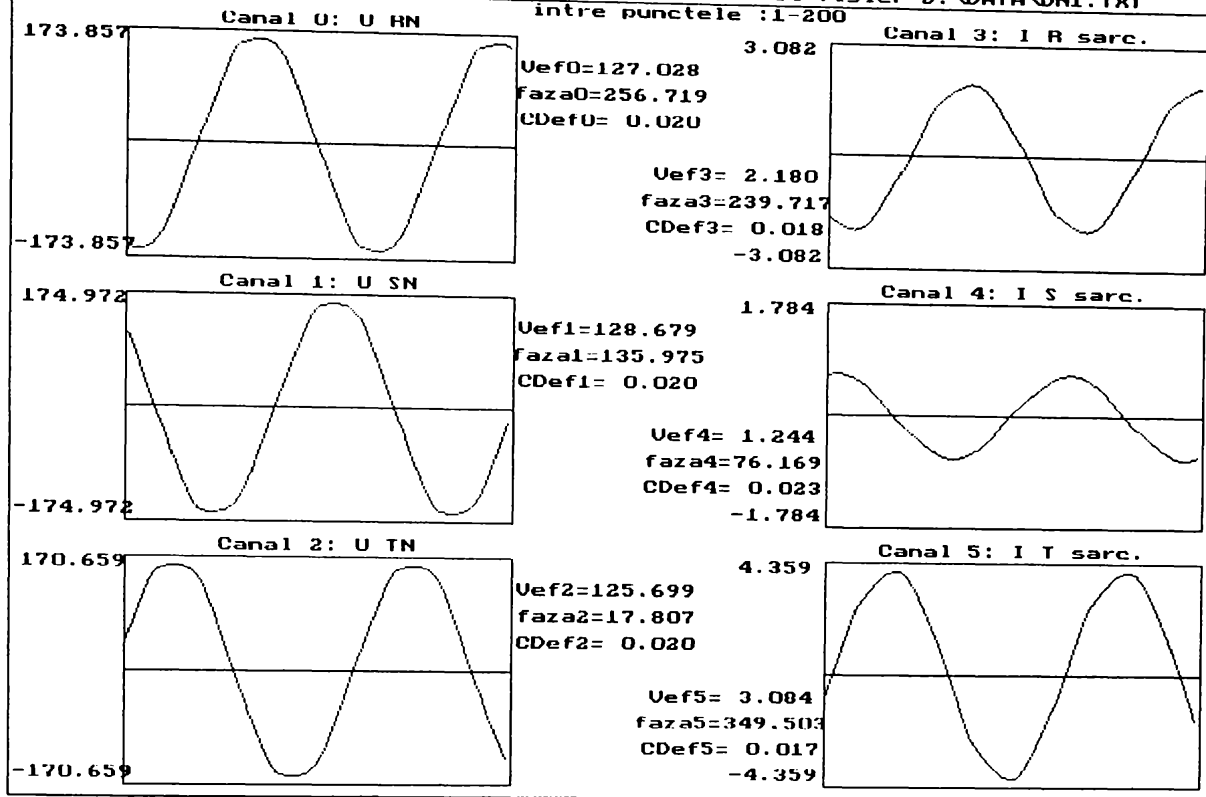
Arm	A	B	AmArm	VefArm	Faza	Nivel
1	-0.23863	-0.33246	0.40924	0.28937	234.330547	1.00000
2	-0.01308	0.00096	0.01311	0.00927	175.810327	0.03204
3	-0.29448	0.11355	0.31561	0.22317	158.913732	0.77123
4	0.00256	0.00761	0.00803	0.00568	71.430251	0.01962
5	0.00779	0.16070	0.16089	0.11376	87.225096	0.39314
6	0.00208	-0.00396	0.00448	0.00316	297.718834	0.01094
7	0.01939	-0.00256	0.01956	0.01383	352.486713	0.04779
8	-0.00339	0.00178	0.00383	0.00271	152.335297	0.00936
9	-0.03334	0.02151	0.03968	0.02806	147.165188	0.09695
10	0.00520	0.00300	0.00600	0.00424	29.98022	0.01467
11	0.05050	0.03715	0.06269	0.04433	36.33969	0.15319
12	-0.00110	-0.00234	0.00259	0.00183	244.91390	0.00632
13	0.02967	-0.02273	0.03738	0.02643	322.54342	0.09134
14	-0.00178	0.00846	0.00865	0.00611	101.89254	0.02113
15	-0.00388	0.08770	0.08779	0.06207	92.53142	0.21451
16	0.00017	-0.00673	0.00673	0.00476	271.44047	0.01644
17	0.03579	-0.02392	0.04304	0.03044	326.24454	0.10518
18	-0.00437	0.00452	0.00629	0.00445	133.99532	0.01537
19	-0.03024	0.04479	0.05404	0.03821	124.02495	0.13204
20	0.00247	-0.00485	0.00544	0.00385	297.02722	0.01330
21	0.01837	-0.00776	0.01994	0.01410	337.09401	0.04873
22	-0.00175	-0.00020	0.00176	0.00125	186.45553	0.00430
23	-0.01060	-0.00569	0.01203	0.00851	208.25391	0.02939
24	0.00265	0.00030	0.00267	0.00189	6.41923	0.00653
25	0.01506	0.00299	0.01535	0.01086	11.21271	0.03752
26	-0.00077	-0.00019	0.00079	0.00056	194.00941	0.00194
27	0.00455	-0.00434	0.00628	0.00444	316.36265	0.01535
28	0.00022	0.00106	0.00108	0.00076	78.07615	0.00264
29	0.00299	0.00385	0.00487	0.00345	52.19409	0.01191
30	-0.00056	-0.00078	0.00096	0.00068	234.32910	0.00234
31	0.00297	-0.00322	0.00438	0.00310	312.73569	0.01070
32	-0.00002	0.00042	0.00042	0.00030	93.04722	0.00103
33	0.00117	-0.00067	0.00135	0.00095	330.05261	0.00330
34	-0.00044	-0.00009	0.00045	0.00032	191.33364	0.00110
35	0.00325	-0.00199	0.00381	0.00269	328.46191	0.00931
36	-0.00020	0.00023	0.00031	0.00022	130.93849	0.00075
37	0.00095	-0.00062	0.00114	0.00081	326.91800	0.00278
38	0.00003	0.00051	0.00051	0.00036	86.73732	0.00125
39	0.00210	-0.00050	0.00216	0.00153	346.59469	0.00529
40	-0.00026	-0.00006	0.00027	0.00019	193.64528	0.00066

VMed	VBF	FVirf	VMRed	FForma
0.01288	0.39653	2.12115	0.26792	1.48002

FDist	CDef	CFundam	Rd	Faza
0.93580	0.56740	0.72977	0.27079	171.97836

ANEXA 14

Rezultatele experimentului 4



Regim nesimetric t.f.&c.f.sarc.

UR = 127.0284 V	faza 256.7187°	URS = 222.2767 V	faza 106.5570°	Uh = 1.5664 V	faza 115.5894°
US = 128.6795 V	faza 135.9746°	UST = 218.2419 V	faza 346.4887°	Ud = 127.1247 V	faza 256.8263°
UT = 125.6991 V	faza 17.8069°	UTR = 220.0595 V	faza 227.4330°	Ui = 1.3478 V	faza 290.2484°
IR = 2.1803 A	faza 239.7174°	IR* = 2.1803 A	faza 17.0014°	IR* = 2.0851 - j 0.6375 A	
IS = 1.2435 A	faza 76.1689°	IS* = 1.2435 A	faza 59.8057°	IS* = 0.6254 - j 1.0748 A	
IT = 3.0835 A	faza 349.5035°	IT* = 3.0835 A	faza 28.3034°	IT* = 2.7149 - j 1.4620 A	
Ih = 0.8500 A	faza 330.9772°	Ih* = 0.8500 A	faza 144.6122°	Ih* = -0.6929 - j 0.4922 A	
Id = 2.0918 A	faza 226.7933°	Id* = 2.0918 A	faza 30.0330°	Id* = 1.8109 - j 1.0469 A	
Ii = 0.4142 A	faza 172.4821°	Ii* = 0.4142 A	faza 117.7663°	Ii* = -0.1930 - j 0.3665 A	
kns0u = 0.01232		kns0i = 0.40635			
kns2u = 0.01060		kns2i = 0.19801			
knsu = 0.02292		knsi = 0.60436			
rnu = 0.97684		rni = 0.97684			

PR = 264.8624 W	QR = 80.9835 var	Ph = -3.2564 W	Qh = 2.3131 var
PS = 80.4775 W	QS = 138.3056 var	Pd = 690.6352 W	Qd = 399.2691 var
PT = 341.2587 W	QT = 183.7750 var	Pi = -0.7802 W	Qi = 1.4819 var
Pt = 686.5986 W	Qt = 403.0642 var		

D:\DATA\DN1.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R sarc.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.96198	2.17931	18.87895	261.80439	89.52822
2	0.09597	0.00230	38.12840	0.00017	0.00014
3	0.66622	0.01024	-279.15167	0.00108	0.00673
4	0.13882	0.00259	9.22703	0.00036	0.00006
5	3.79648	0.06137	-349.92479	0.22940	0.04076
6	0.15069	0.00256	24.58777	0.00035	0.00016
7	0.67326	0.00946	10.79424	0.00626	0.00119
8	0.01528	0.00028	46.50139	0.00000	0.00000
9	0.44709	0.00582	26.85591	0.00232	0.00118
10	0.02372	0.00009	175.50290	-0.00000	0.00000
11	0.35610	0.00602	10.95008	0.00211	0.00041
12	0.04276	0.00009	-90.67952	-0.00000	-0.00000
13	0.23959	0.00450	11.97921	0.00105	0.00022
14	0.00561	0.00045	-182.84263	-0.00000	0.00000
15	0.07507	0.00117	25.29008	0.00008	0.00004
16	0.01616	0.00025	-101.08021	-0.00000	-0.00000
17	0.25881	0.00385	17.44847	0.00095	0.00030
18	0.01575	0.00045	-7.55982	0.00001	-0.00000
19	0.21715	0.00347	28.43999	0.00066	0.00036
20	0.00665	0.00051	-133.49254	-0.00000	-0.00000
21	0.07618	0.00097	41.43195	0.00006	0.00005
22	0.00877	0.00013	43.64256	0.00000	0.00000
23	0.10881	0.00193	39.31373	0.00016	0.00013
24	0.00279	0.00015	23.30635	0.00000	0.00000
25	0.06878	0.00124	53.38505	0.00005	0.00007
26	0.04001	0.00054	48.63587	0.00001	0.00002
27	0.09419	0.00101	52.86828	0.00006	0.00008
28	0.01131	0.00039	135.87468	-0.00000	0.00000
29	0.07729	0.00094	35.52037	0.00006	0.00004
30	0.00231	0.00026	-141.77709	-0.00000	-0.00000
31	0.03224	0.00055	69.97029	0.00001	0.00002
32	0.01655	0.00019	21.58279	0.00000	0.00000
33	0.03621	0.00057	-332.49110	0.00002	0.00001
34	0.00948	0.00008	-338.34008	0.00000	0.00000
35	0.01037	0.00013	48.94830	0.00000	0.00000
36	0.00761	0.00024	116.54990	-0.00000	0.00000
37	0.05217	0.00067	51.81393	0.00002	0.00003
38	0.00752	0.00026	-19.12772	0.00000	-0.00000
39	0.01575	0.00015	30.46185	0.00000	0.00000
40	0.00683	0.00009	10.21269	0.00000	0.00000

Puterea aparenta : S = 276.9446 VA
 Puterea activa: P = 262.0496 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.2453 W
 Puterea reactiva: Q = 89.5802 var $\bar{\sigma}$ Qk = 0.0520 var
 Puterea deformanta: D = 1.9138 vad

D:\DATA\DN1.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S sarc.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	128.60973	1.24261	60.76224	78.05745	139.45149
2	0.24742	0.00200	95.57079	-0.00005	0.00049
3	1.60533	0.04346	-284.04874	0.01693	0.06768
4	0.11108	0.00042	-145.27843	-0.00004	-0.00003
5	3.74830	0.01701	28.18076	0.05619	0.03011
6	0.14061	0.00053	109.97772	-0.00003	0.00007
7	0.12662	0.00252	26.98455	0.00028	0.00015
8	0.01572	0.00049	-107.60816	-0.00000	-0.00001
9	0.33730	0.00152	45.10815	0.00036	0.00036
10	0.02485	0.00070	-193.82870	-0.00002	0.00000
11	0.42305	0.00181	32.50435	0.00065	0.00041
12	0.03317	0.00041	-174.96189	-0.00001	-0.00000
13	0.20219	0.00075	51.64219	0.00009	0.00012
14	0.03655	0.00051	-164.12688	-0.00002	-0.00001
15	0.06713	0.00041	60.67101	0.00001	0.00002
16	0.02724	0.00018	-133.42357	-0.00000	-0.00000
17	0.35420	0.00124	25.34372	0.00040	0.00019
18	0.02141	0.00036	-133.39596	-0.00001	-0.00001
19	0.16997	0.00092	38.42778	0.00012	0.00010
20	0.01936	0.00017	111.77558	-0.00000	0.00000
21	0.06650	0.00050	52.22456	0.00002	0.00003
22	0.02505	0.00022	-134.33888	-0.00000	-0.00000
23	0.09535	0.00061	-41.07557	0.00004	-0.00004
24	0.01332	0.00016	-33.02154	0.00000	-0.00000
25	0.13386	0.00070	71.07699	0.00003	0.00009
26	0.03013	0.00040	76.72853	0.00000	0.00001
27	0.04249	0.00050	8.94580	0.00002	0.00000
28	0.00711	0.00015	37.41678	0.00000	0.00000
29	0.10782	0.00038	-11.19131	0.00004	-0.00001
30	0.01272	0.00041	-164.92568	-0.00001	-0.00000
31	0.08268	0.00016	-137.25809	-0.00001	-0.00001
32	0.02355	0.00017	-186.14684	-0.00000	0.00000
33	0.02058	0.00014	58.88185	0.00000	0.00000
34	0.01738	0.00019	-190.94617	-0.00000	0.00000
35	0.04415	0.00042	-14.14693	0.00002	-0.00000
36	0.01898	0.00014	18.72031	0.00000	0.00000
37	0.03439	0.00013	-160.36807	-0.00000	-0.00000
38	0.01018	0.00027	-66.53549	0.00000	-0.00000
39	0.02144	0.00023	-208.14558	-0.00000	0.00000
40	0.01197	0.00021	138.81144	-0.00000	0.00000

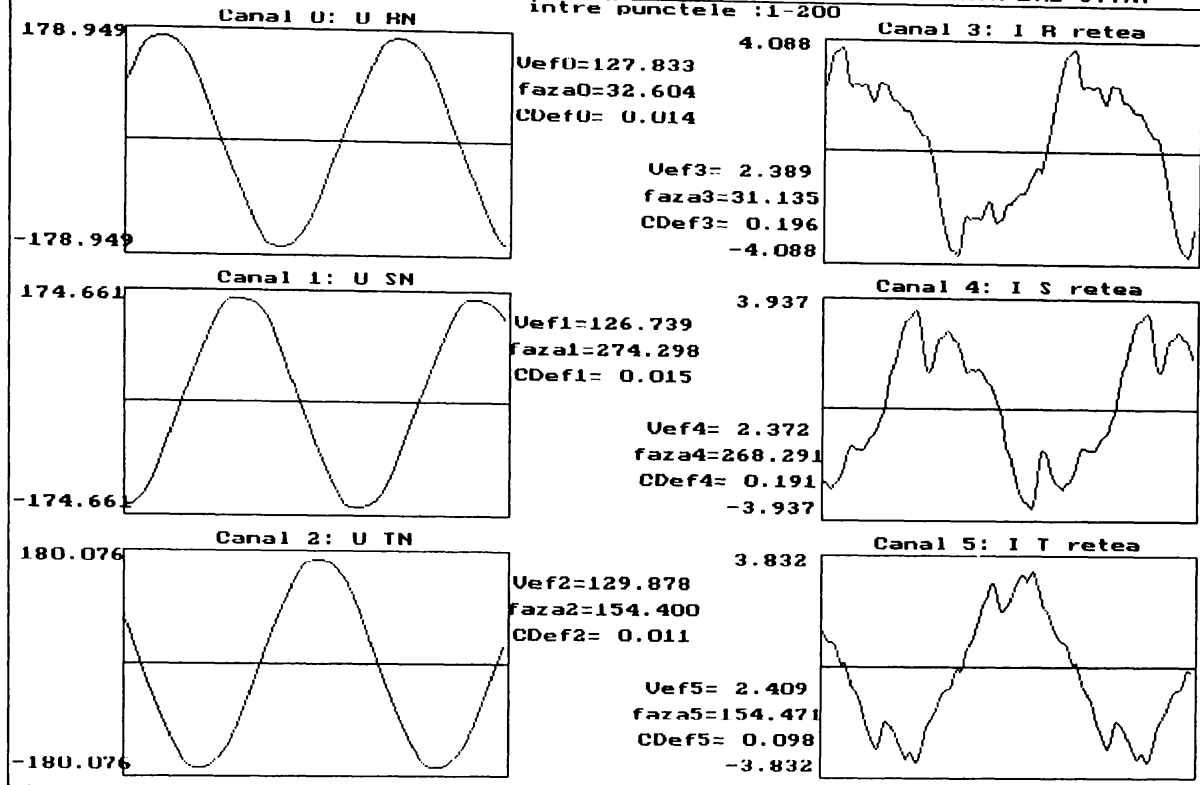
Puterea aparenta : S = 159.9483 VA
 Puterea activa: P = 78.1325 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.0750 W
 Puterea reactiva: Q = 139.5512 var $\bar{\sigma}$ Qk = 0.0997 var
 Puterea deformanta: D = 2.0585 vad

D:\DATA\DN1.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T sarc.

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	125.62803	3.08219	28.55985	340.09256	185.11546
2	1.00216	0.00657	-172.97070	-0.00653	-0.00081
3	1.65032	0.04933	64.58663	0.03494	0.07353
4	0.41761	0.00469	184.41542	-0.00195	-0.00015
5	3.50493	0.07378	15.45558	0.24923	0.06891
6	0.20053	0.00270	-137.13268	-0.00040	-0.00037
7	0.62076	0.00643	25.28957	0.00361	0.00171
8	0.16935	0.00081	-167.88189	-0.00013	-0.00003
9	0.45609	0.01022	62.96747	0.00212	0.00415
10	0.13710	0.00088	-133.01065	-0.00008	-0.00009
11	0.26373	0.00730	3.58606	0.00192	0.00012
12	0.12020	0.00103	167.06086	-0.00012	0.00003
13	0.13308	0.00492	-2.52649	0.00065	-0.00003
14	0.13181	0.00094	-138.95785	-0.00009	-0.00008
15	0.16118	0.00155	100.97666	-0.00005	0.00024
16	0.06625	0.00061	138.62028	-0.00003	0.00003
17	0.15227	0.00392	41.10492	0.00045	0.00039
18	0.09491	0.00065	163.96139	-0.00006	0.00002
19	0.08844	0.00279	45.18002	0.00017	0.00018
20	0.09248	0.00059	176.75252	-0.00005	0.00000
21	0.01153	0.00149	80.76588	0.00000	0.00002
22	0.09118	0.00036	-177.35477	-0.00003	-0.00000
23	0.07033	0.00180	123.23061	-0.00007	0.00011
24	0.07171	0.00090	145.07765	-0.00005	0.00004
25	0.10452	0.00304	103.11139	-0.00007	0.00031
26	0.07796	0.00065	-148.34909	-0.00004	-0.00003
27	0.03474	0.00176	176.37404	-0.00006	0.00000
28	0.06824	0.00085	-117.01239	-0.00003	-0.00005
29	0.04915	0.00123	-112.13854	-0.00002	-0.00006
30	0.08690	0.00018	-151.32092	-0.00001	-0.00001
31	0.09746	0.00110	146.21051	-0.00009	0.00006
32	0.05892	0.00045	168.12860	-0.00003	0.00001
33	0.04053	0.00082	-146.08183	-0.00003	-0.00002
34	0.06298	0.00050	171.10838	-0.00003	0.00000
35	0.06497	0.00121	176.48785	-0.00008	0.00000
36	0.05454	0.00038	175.00313	-0.00002	0.00000
37	0.06383	0.00030	150.09999	-0.00002	0.00001
38	0.05461	0.00039	-163.00815	-0.00002	-0.00001
39	0.04943	0.00061	-149.52445	-0.00003	-0.00002
40	0.05430	0.00032	-112.36877	-0.00001	-0.00002

Puterea aparenta : S = 387.5721 VA
Puterea activa: P = 340.3754 W $\delta P_k = 0.2829$ W
Puterea reactiva: Q = 185.2636 var $\delta Q_k = 0.1481$ var
Puterea deformanta: D = 5.8402 vad



Regim nesimetric t.f.&c.f.retea

UR = 127.8335 V	faza 32.6037°	URS = 218.5607 V	faza 243.3037°	Uh = 0.4615 V	faza 272.4789°
US = 126.7387 V	faza 274.2980°	UST = 222.1282 V	faza 124.7542°	Ud = 128.1367 V	faza 33.7689°
UT = 129.8778 V	faza 154.3995°	UTR = 225.1785 V	faza 3.2486°	Ui = 2.2071 V	faza 301.4306°
IR = 2.3889 A	faza 31.1346°	IR* = 2.3889 A	faza 1.4691°	IR* = 2.3881 - j 0.0612 A	
IS = 2.3721 A	faza 268.2914°	IS* = 2.3721 A	faza 6.0066°	IS* = 2.3591 - j 0.2482 A	
IT = 2.4087 A	faza 154.4706°	IT* = 2.4087 A	faza -0.0711°	IT* = 2.4087 + j 0.0030 A	
Ih = 0.0741 A	faza 206.1230°	Ih* = 0.0741 A	faza 66.3559°	Ih* = 0.0297 - j 0.0678 A	
Id = 2.3876 A	faza 31.3146°	Id* = 2.3876 A	faza 2.4543°	Id* = 2.3854 - j 0.1022 A	
Ii = 0.0764 A	faza 20.5955°	Ii* = 0.0764 A	faza -79.1649°	Ii* = 0.0144 + j 0.0750 A	
knsOu = 0.00360		knsOi = 0.03102			
kns2u = 0.01722		kns2i = 0.03199			
knsu = 0.02083		knsi = 0.06300			
rnu = 0.97583		rni = 0.97583			
PR = 305.2764 W	QR = 7.8291 var	Ph = 0.0411 W	Qh = 0.0939 var		
PS = 298.9886 W	QS = 31.4596 var	Pd = 916.9625 W	Qd = 39.3034 var		
PT = 312.8337 W	QT = -0.3880 var	Pi = 0.0951 W	Qi = -0.4967 var		
Pt = 917.0987 W	Qt = 38.9006 var				

D:\DATA\DN2~8.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.79407	2.26546	3.52524	288.96442	17.80158
2	0.08078	0.01048	-96.31797	-0.00009	-0.00084
3	1.17195	0.62167	-126.68466	-0.43525	-0.58426
4	0.09096	0.00210	-10.99031	0.00019	-0.00004
5	2.55192	0.37339	-55.01617	0.54633	-0.78070
6	0.04863	0.00708	-67.88648	0.00013	-0.00032
7	0.75028	0.10297	-80.96755	0.01213	-0.07630
8	0.01462	0.00219	-71.85422	0.00001	-0.00003
9	0.59128	0.09647	-102.04501	-0.01190	-0.05579
10	0.01958	0.00372	-133.32974	-0.00005	-0.00005
11	0.24579	0.12537	-60.89860	0.01499	-0.02693
12	0.01292	0.00630	-52.43283	0.00005	-0.00006
13	0.06945	0.05456	13.83941	0.00368	0.00091
14	0.01468	0.00565	-64.76043	0.00004	-0.00008
15	0.12596	0.02624	-132.58927	-0.00224	-0.00243
16	0.02243	0.00461	-98.30564	-0.00001	-0.00010
17	0.12087	0.04664	-31.78447	0.00479	-0.00297
18	0.01421	0.00427	-117.31230	-0.00003	-0.00005
19	0.06438	0.03726	-135.70521	-0.00172	-0.00168
20	0.01568	0.00590	-73.00032	0.00003	-0.00009
21	0.08706	0.04102	-75.49612	0.00089	-0.00346
22	0.00395	0.00182	-75.99445	0.00000	-0.00001
23	0.07689	0.03476	-54.88845	0.00154	-0.00219
24	0.00858	0.00195	-45.38641	0.00001	-0.00001
25	0.05382	0.03074	-79.38461	0.00030	-0.00163
26	0.00772	0.00550	-137.29077	-0.00003	-0.00003
27	0.01659	0.00536	-107.21094	-0.00003	-0.00008
28	0.00553	0.00208	-80.60829	0.00000	-0.00001
29	0.02114	0.01884	-33.20355	0.00033	-0.00022
30	0.01651	0.00158	-93.60482	-0.00000	-0.00003
31	0.01303	0.01033	63.64941	0.00006	0.00012
32	0.00303	0.00155	32.72632	0.00000	0.00000
33	0.01499	0.00511	-65.37442	0.00003	-0.00007
34	0.01032	0.00083	-111.00233	-0.00000	-0.00001
35	0.00792	0.00828	-90.91546	-0.00000	-0.00007
36	0.00805	0.00144	-76.37156	0.00000	-0.00001
37	0.01475	0.00435	-92.98787	-0.00000	-0.00006
38	0.01175	0.00153	-38.02229	0.00001	-0.00001
39	0.00459	0.00216	-68.76328	0.00000	-0.00001
40	0.01968	0.00128	-124.83708	-0.00001	-0.00002

Puterea aparenta : S = 291.3847 VA
Puterea activa: P = 289.0986 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.1342 W
Puterea reactiva: Q = 16.2620 var $\bar{\sigma}$ Qk = -1.5396 var
Puterea deformanta: D = 32.5976 vad

D:\DATA\DN2~8.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.69233	2.25151	-2.68306	284.93670	-13.35282
2	0.02292	0.00844	25.38913	0.00017	0.00008
3	0.55514	0.48817	106.22752	-0.07573	0.26021
4	0.09778	0.01437	-71.79922	0.00044	-0.00134
5	2.89494	0.47556	-95.19923	-0.12476	-1.37106
6	0.08768	0.00728	318.65058	0.00048	-0.00042
7	0.87226	0.22378	-98.70349	-0.02954	-0.19295
8	0.03355	0.00552	304.54718	0.00011	-0.00015
9	0.43639	0.09445	-33.11363	0.03452	-0.02252
10	0.01142	0.00506	215.09509	-0.00005	-0.00003
11	0.25699	0.13085	-80.10334	0.00578	-0.03313
12	0.01454	0.00474	-161.22917	-0.00007	-0.00002
13	0.13117	0.06924	-121.92179	-0.00480	-0.00771
14	0.01446	0.00441	-36.74473	0.00005	-0.00004
15	0.02081	0.05112	234.49160	-0.00062	-0.00087
16	0.02329	0.00544	242.07183	-0.00006	-0.00011
17	0.09428	0.06001	279.11199	0.00090	-0.00559
18	0.00723	0.00357	-74.35414	0.00001	-0.00002
19	0.01329	0.00932	174.37327	-0.00012	0.00001
20	0.01569	0.00527	-156.55878	-0.00008	-0.00003
21	0.01469	0.02030	-67.23435	0.00012	-0.00027
22	0.00974	0.00338	4.35371	0.00003	0.00000
23	0.02729	0.03026	-12.05614	0.00081	-0.00017
24	0.00854	0.00085	101.40035	-0.00000	0.00001
25	0.01983	0.02127	-44.41417	0.00030	-0.00030
26	0.01110	0.00412	76.48109	0.00001	0.00004
27	0.01977	0.00457	-134.75526	-0.00006	-0.00006
28	0.00996	0.00176	271.47857	0.00000	-0.00002
29	0.00557	0.01757	-14.86929	0.00009	-0.00003
30	0.00768	0.00177	265.09599	-0.00000	-0.00001
31	0.01629	0.00998	103.62196	-0.00004	0.00016
32	0.01081	0.00048	10.22078	0.00001	0.00000
33	0.00646	0.00215	90.23109	-0.00000	0.00001
34	0.01003	0.00084	150.23554	-0.00001	0.00000
35	0.00566	0.00712	161.48997	-0.00004	0.00001
36	0.00264	0.00051	-103.47072	-0.00000	-0.00000
37	0.01251	0.00196	87.18005	0.00000	0.00002
38	0.00440	0.00061	-82.57636	0.00000	-0.00000
39	0.01140	0.00122	-61.31559	0.00001	-0.00001
40	0.00338	0.00030	163.76784	-0.00000	0.00000

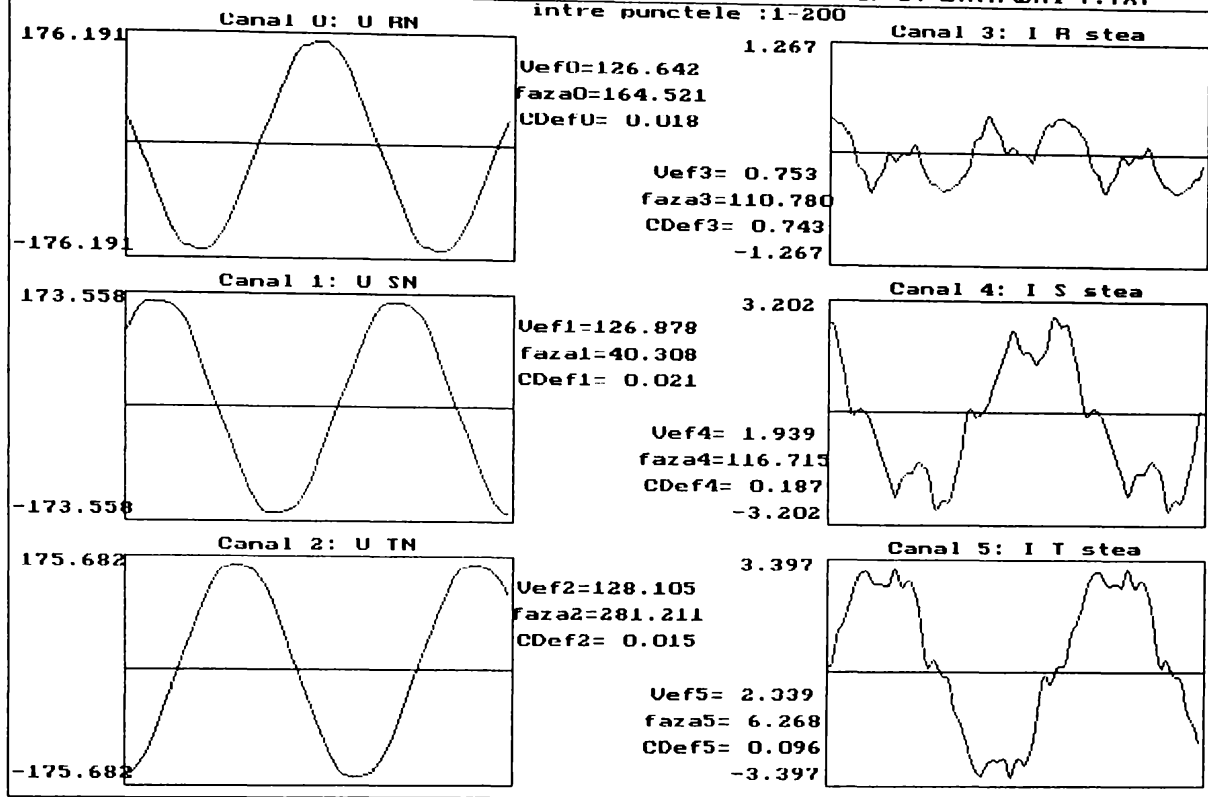
Puterea aparenta : S = 287.1881 VA
 Puterea activa: P = 284.7446 W $\bar{\sigma}$ Pk = -0.1921 W
 Puterea reactiva: Q = -14.7291 var $\bar{\sigma}$ Qk = -1.3763 var
 Puterea deformanta: D = 34.3596 vad

D:\DATA\DN2~8.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T retea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	129.85518	2.37334	7.45924	305.58283	40.00961
2	0.01738	0.00440	-144.09984	-0.00006	-0.00004
3	0.65800	0.10602	-28.51931	0.06130	-0.03331
4	0.04684	0.00812	-108.77846	-0.00012	-0.00036
5	2.10352	0.33964	-87.93967	0.02569	-0.71397
6	0.05934	0.00811	-86.72760	0.00003	-0.00048
7	0.58501	0.12351	-46.74287	0.04951	-0.05262
8	0.00827	0.00185	4.90798	0.00002	0.00000
9	0.51021	0.09165	-59.35880	0.02383	-0.04023
10	0.02603	0.00575	-45.71700	0.00010	-0.00011
11	0.21629	0.07975	-76.46594	0.00404	-0.01677
12	0.01629	0.00312	-40.49455	0.00004	-0.00003
13	0.11213	0.04055	-70.66724	0.00151	-0.00429
14	0.00573	0.00391	-247.01165	-0.00001	0.00002
15	0.09228	0.03830	-86.77426	0.00020	-0.00353
16	0.01221	0.00330	-43.56028	0.00003	-0.00003
17	0.06532	0.06952	-88.62017	0.00011	-0.00454
18	0.00996	0.00067	-95.24112	-0.00000	-0.00001
19	0.04127	0.03321	-73.40915	0.00039	-0.00131
20	0.01207	0.00159	-111.00432	-0.00001	-0.00002
21	0.00879	0.02414	-52.82740	0.00013	-0.00017
22	0.02301	0.00311	32.80915	0.00006	0.00004
23	0.02406	0.00710	-0.04371	0.00017	-0.00000
24	0.00701	0.00181	81.46247	0.00000	0.00001
25	0.01942	0.02847	-3.58117	0.00055	-0.00003
26	0.01047	0.00298	41.21906	0.00002	0.00002
27	0.01557	0.00772	-50.20839	0.00008	-0.00009
28	0.01531	0.00198	25.73602	0.00003	0.00001
29	0.01961	0.01725	7.46698	0.00034	0.00004
30	0.00708	0.00008	148.42536	-0.00000	0.00000
31	0.00611	0.00930	-30.84823	0.00005	-0.00003
32	0.01087	0.00108	-10.13436	0.00001	-0.00000
33	0.01687	0.00230	-164.92212	-0.00004	-0.00001
34	0.00727	0.00058	-110.31700	-0.00000	-0.00000
35	0.00764	0.00483	2.12057	0.00004	0.00000
36	0.00214	0.00118	70.23188	0.00000	0.00000
37	0.00596	0.00120	-176.31051	-0.00001	-0.00000
38	0.00101	0.00114	115.02792	-0.00000	0.00000
39	0.00419	0.00174	93.55729	-0.00000	0.00001
40	0.01151	0.00081	-65.49604	0.00000	-0.00001

Puterea aparenta : S = 309.1283 VA
 Puterea activa: P = 305.7508 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.1680 W
 Puterea reactiva: Q = 39.1378 var $\bar{\sigma}$ Qk = -0.8718 var
 Puterea deformanta: D = 23.3446 vad



Regim nesimetric t.f.&c.f.stea

UR = 126.6425 V	faza 164.5211°	URS = 224.0658 V	faza 12.4428°	Uh = 3.2638 V	faza 267.7310°
US = 126.8779 V	faza 40.3083°	UST = 219.8105 V	faza 250.9219°	Ud = 127.1450 V	faza 162.0093°
UT = 128.1046 V	faza 281.2114°	UTR = 216.8485 V	faza 132.6635°	Ui = 2.4224 V	faza 245.8435°
IR = 0.7533 A	faza 110.7798°	IR* = 0.7533 A	faza 53.7413°	IR* = 0.4455 - j 0.6074 A	
IS = 1.9394 A	faza 116.7149°	IS* = 1.9394 A	faza -76.4066°	IS* = 0.4558 + j 1.8851 A	
IT = 2.3392 A	faza 6.2678°	IT* = 2.3392 A	faza -85.0564°	IT* = 0.2016 + j 2.3305 A	
Ih = 0.9806 A	faza 66.2221°	Ih* = 0.9806 A	faza -158.4911°	Ih* = -0.9123 + j 0.3595 A	
Id = 1.2702 A	faza 233.3790°	Id* = 1.2702 A	faza -71.3697°	Id* = 0.4058 + j 1.2036 A	
Ii = 0.8318 A	faza 83.4382°	Ii* = 0.8318 A	faza 162.4053°	Ii* = -0.7929 - j 0.2515 A	

kns0u = 0.02567	kns0i = 0.77202
kns2u = 0.01905	kns2i = 0.65490
knsu = 0.04472	knsi = 1.42692
rnu = 0.98859	rni = 0.98859

PR = 56.4234 W	QR = 76.9273 var	Ph = -8.9328 W	Qh = -3.5203 var
PS = 57.8332 W	QS = -239.1741 var	Pd = 154.7753 W	Qd = -459.1019 var
PT = 25.8237 W	QT = -298.5482 var	Pi = -5.7623 W	Qi = 1.8273 var
Pt = 140.0802 W	Qt = -460.7949 var		

D:\DATA\DN4~7.TXT

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R stea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.58865	0.49199	36.99254	49.74368	37.47440
2	0.90181	0.00858	91.57598	-0.00021	0.00774
3	1.15205	0.54243	-135.90934	-0.44883	-0.43481
4	0.38989	0.00749	-120.28969	-0.00147	-0.00252
5	2.99574	0.07778	-48.90362	0.15316	-0.17560
6	0.19828	0.00205	-352.54686	0.00040	0.00005
7	0.91465	0.11697	-122.13173	-0.05690	-0.09060
8	0.18337	0.00416	155.95580	-0.00070	0.00031
9	0.59265	0.06053	-81.31363	0.00542	-0.03546
10	0.13733	0.00387	9.27378	0.00052	0.00009
11	0.38123	0.03280	-47.44279	0.00846	-0.00921
12	0.13492	0.00128	179.88991	-0.00017	0.00000
13	0.56997	0.03416	-97.36252	-0.00250	-0.01931
14	0.07386	0.00344	168.12338	-0.00025	0.00005
15	0.14236	0.00879	-17.10011	0.00120	-0.00037
16	0.06135	0.00602	-150.20329	-0.00032	-0.00018
17	0.19840	0.03656	-49.19274	0.00474	-0.00549
18	0.06631	0.00440	-16.81454	0.00028	-0.00008
19	0.16438	0.05725	-51.71980	0.00583	-0.00739
20	0.10044	0.00306	149.35813	-0.00026	0.00016
21	0.10003	0.00961	-62.48529	0.00044	-0.00085
22	0.06917	0.00218	-165.80719	-0.00015	-0.00004
23	0.09051	0.01277	20.34280	0.00108	0.00040
24	0.06123	0.00215	64.23447	0.00006	0.00012
25	0.11258	0.01095	-55.96929	0.00069	-0.00102
26	0.05425	0.00229	-68.54768	0.00005	-0.00012
27	0.04463	0.00203	123.69602	-0.00005	0.00008
28	0.04880	0.00075	-76.44877	0.00001	-0.00004
29	0.02713	0.00202	84.81057	0.00000	0.00005
30	0.05672	0.00090	134.77986	-0.00004	0.00004
31	0.04467	0.00302	28.67039	0.00012	0.00006
32	0.03263	0.00055	-159.82130	-0.00002	-0.00001
33	0.04154	0.00184	135.47045	-0.00005	0.00005
34	0.04748	0.00106	-132.47816	-0.00003	-0.00004
35	0.05713	0.00634	96.46973	-0.00004	0.00036
36	0.04510	0.00053	-75.75835	0.00001	-0.00002
37	0.03642	0.00360	147.01536	-0.00011	0.00007
38	0.03006	0.00111	7.22220	0.00003	0.00000
39	0.03527	0.00492	-90.31149	-0.00000	-0.00017
40	0.04535	0.00143	16.12313	0.00006	0.00002

Puterea aparenta : S = 63.3492 VA
 Puterea activa: P = 49.4141 W δ Pk = -0.3295 W
 Puterea reactiva: Q = 36.7007 var δ Qk = -0.7737 var
 Puterea deformanta: D = 14.9807 vad

D:\DATA\DN4~7.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S stea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.81062	1.85504	-84.45806	22.71805	-234.13965
2	0.37111	0.00837	-167.42434	-0.00303	-0.00068
3	0.42601	0.31742	110.26208	-0.04683	0.12686
4	0.04873	0.00515	118.94532	-0.00012	0.00022
5	3.95002	0.43650	-102.17816	-0.36372	-1.68540
6	0.10271	0.00395	212.38349	-0.00034	-0.00022
7	0.46906	0.06565	288.16257	0.00960	-0.02926
8	0.09899	0.00769	-93.86265	-0.00005	-0.00076
9	0.39941	0.04818	-34.23784	0.01591	-0.01083
10	0.08779	0.00740	281.89047	0.00013	-0.00064
11	0.37679	0.11667	-78.96685	0.00841	-0.04315
12	0.03246	0.00203	170.84829	-0.00007	0.00001
13	0.22078	0.03305	-54.02583	0.00429	-0.00591
14	0.05995	0.00383	-26.12228	0.00021	-0.00010
15	0.11056	0.01674	-115.33946	-0.00079	-0.00167
16	0.02379	0.00481	114.43652	-0.00005	0.00010
17	0.19132	0.06285	-48.21007	0.00801	-0.00896
18	0.01623	0.00443	54.00838	0.00004	0.00006
19	0.13414	0.04580	-32.11426	0.00520	-0.00327
20	0.04789	0.00355	312.14481	0.00011	-0.00013
21	0.02060	0.01084	-8.29755	0.00022	-0.00003
22	0.02534	0.00270	18.49909	0.00006	0.00002
23	0.05546	0.00823	264.97071	-0.00004	-0.00045
24	0.03719	0.00394	304.26178	0.00008	-0.00012
25	0.00496	0.01376	56.45918	0.00004	0.00006
26	0.02095	0.00054	333.82557	0.00001	-0.00000
27	0.04077	0.00201	180.49426	-0.00008	-0.00000
28	0.02739	0.00130	-39.37890	0.00003	-0.00002
29	0.01172	0.00477	196.30673	-0.00005	-0.00002
30	0.03140	0.00085	-6.74398	0.00003	-0.00000
31	0.03206	0.00162	193.83907	-0.00005	-0.00001
32	0.01579	0.00044	126.89277	-0.00000	0.00001
33	0.02422	0.00319	29.60980	0.00007	0.00004
34	0.01877	0.00053	49.30906	0.00001	0.00001
35	0.03040	0.00298	4.56501	0.00009	0.00001
36	0.01677	0.00042	16.62591	0.00001	0.00000
37	0.01966	0.00270	22.75553	0.00005	0.00002
38	0.01112	0.00058	59.26646	0.00000	0.00001
39	0.00662	0.00173	75.54985	0.00000	0.00001
40	0.01729	0.00103	63.67114	0.00001	0.00002

Puterea aparenta : S = 237.2273 VA
 Puterea activa: P = 22.3554 W \bar{o} Pk = -0.3626 W
 Puterea reactiva: Q = -235.8038 var \bar{o} Qk = -1.6642 var
 Puterea deformanta: D = 13.1745 vad

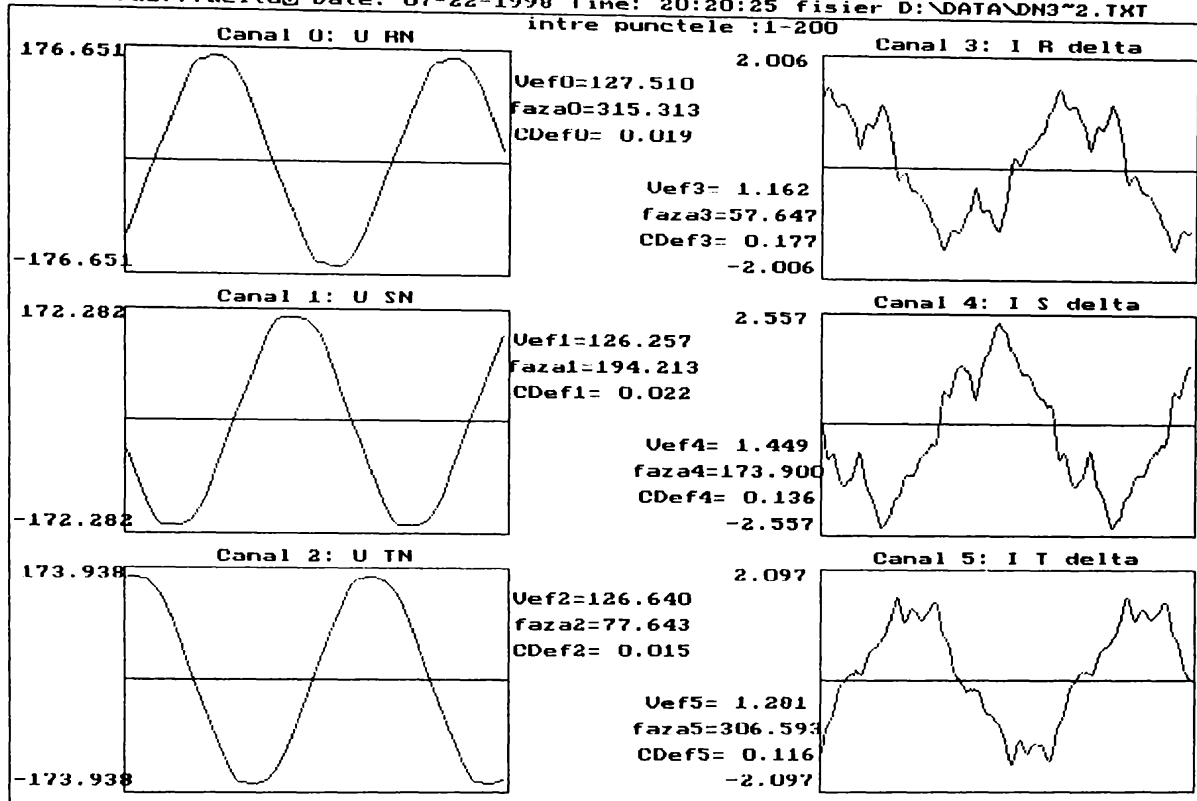
D:\DATA\DN4~7.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T stea

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	128.06151	2.30840	-86.85968	16.19435	-295.17298
2	0.20205	0.02030	118.24185	-0.00194	0.00361
3	1.06151	0.02714	71.93988	0.00893	0.02739
4	0.05581	0.01727	83.95391	0.00010	0.00096
5	2.76578	0.31896	-100.19478	-0.15614	-0.86825
6	0.01627	0.00739	-93.95570	-0.00001	-0.00012
7	0.75960	0.05837	-83.83709	0.00476	-0.04408
8	0.01807	0.00449	-47.25656	0.00006	-0.00006
9	0.51183	0.12735	-81.01779	0.01018	-0.06438
10	0.01105	0.01206	-168.91142	-0.00013	-0.00003
11	0.28146	0.05515	-116.69031	-0.00697	-0.01387
12	0.02585	0.01068	102.26670	-0.00006	0.00027
13	0.27852	0.09077	-92.87711	-0.00127	-0.02525
14	0.02042	0.00589	99.48225	-0.00002	0.00012
15	0.07178	0.02303	-71.09562	0.00054	-0.00156
16	0.01159	0.00562	15.25770	0.00006	0.00002
17	0.19893	0.07643	-101.83569	-0.00312	-0.01488
18	0.03092	0.00728	-32.22681	0.00019	-0.00012
19	0.06876	0.03419	-89.11314	0.00004	-0.00235
20	0.00799	0.00563	-120.02813	-0.00002	-0.00004
21	0.02276	0.01831	-63.54729	0.00019	-0.00037
22	0.00431	0.00163	-98.53215	-0.00000	-0.00001
23	0.00971	0.00870	-172.24704	-0.00008	-0.00001
24	0.00487	0.00430	31.56412	0.00002	0.00001
25	0.01605	0.01750	-42.10099	0.00021	-0.00019
26	0.00390	0.00333	-56.44610	0.00001	-0.00001
27	0.01310	0.00271	-39.37938	0.00003	-0.00002
28	0.00958	0.00135	41.37926	0.00001	0.00001
29	0.01321	0.00620	13.38481	0.00008	0.00002
30	0.00997	0.00143	57.51792	0.00001	0.00001
31	0.00636	0.00115	-98.54991	-0.00000	-0.00001
32	0.01602	0.00121	43.43441	0.00001	0.00001
33	0.00976	0.00351	-318.35835	0.00003	0.00002
34	0.00698	0.00160	117.16534	-0.00001	0.00001
35	0.00764	0.00180	-16.26736	0.00001	-0.00000
36	0.01632	0.00080	34.53200	0.00001	0.00001
37	0.01323	0.00178	2.92162	0.00002	0.00000
38	0.00342	0.00049	115.01089	-0.00000	0.00000
39	0.00275	0.00361	-224.10997	-0.00001	0.00001
40	0.01024	0.00211	171.58050	-0.00002	0.00000

Puterea aparenta : S = 296.7047 VA
 Puterea activa: P = 16.0500 W $\delta P_k = -0.1443$ W
 Puterea reactiva: Q = -296.1761 var $\delta Q_k = -1.0031$ var
 Puterea deformanta: D = 7.4673 vad

t.f.&c.f.delta@ Date: 07-22-1998 Time: 20:20:25 fisier D:\DATA\DN3~2.TXT
 intre punctele :1-200



Regim nesimetric t.f.&c.f.delta

UR = 127.5097 V faza 315.3132° URS = 220.9770 V faza 164.6035° Uh = 1.8476 V faza 146.7753°
 US = 126.2569 V faza 194.2132° UST = 215.1325 V faza 45.9817° Ud = 126.7627 V faza 315.7237°
 UT = 126.6395 V faza 77.6431° UTR = 222.6382 V faza 286.5861° Ui = 2.6176 V faza 303.3840°

IR = 1.1622 A faza 57.6466° IR* = 1.1622 A faza -102.3334° IR* = -0.2483 + j 1.1354 A
 IS = 1.4493 A faza 173.8999° IS* = 1.4493 A faza 20.3133° IS* = 1.3591 - j 0.5031 A
 IT = 1.2808 A faza 306.5926° IT* = 1.2808 A faza 131.0506° IT* = -0.8411 - j 0.9659 A

Ih = 0.0403 A faza 117.3441° Ih* = 0.0403 A faza 29.4312° Ih* = 0.0351 - j 0.0198 A
 Id = 0.1648 A faza 262.6537° Id* = 0.1648 A faza 53.0699° Id* = 0.0990 - j 0.1317 A
 Ii = 1.2917 A faza 59.1914° Ii* = 1.2917 A faza -115.8074° Ii* = -0.5623 + j 1.1628 A

knsOu = 0.01458 knsOi = 0.24483
 kns2u = 0.02065 kns2i = 7.83985
 knsu = 0.03522 knsi = 8.08469
 rnu = 0.99017 rni = 0.99017

PR = -31.6548 W QR = -144.7765 var Ph = 0.1947 W Qh = 0.1099 var
 PS = 171.5983 W QS = 63.5213 var Pd = 37.6455 W Qd = 50.0844 var
 PT = -106.5190 W QT = 122.3179 var Pi = -4.4158 W Qi = -9.1316 var
 Pt = 33.4244 W Qt = 41.0627 var

D:\DATA\DN3~2.TXT

D:\DATA\DN3~2.TXT

Puterea calculata cu 2: U TN si 5: I T delta

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.59314	1.25572	124.86023	-90.86099	130.43902
2	0.01263	0.00434	-3.39671	0.00005	-0.00000
3	0.94349	0.10977	-90.29485	-0.00053	-0.10356
4	0.03823	0.00191	-45.63517	0.00005	-0.00005
5	2.85211	0.17287	-96.81284	-0.05849	-0.48957
6	0.03180	0.00146	156.26767	-0.00004	0.00002
7	0.69316	0.07016	-95.26735	-0.00446	-0.04843
8	0.02718	0.00220	-111.29147	-0.00002	-0.00006
9	0.46848	0.02975	52.32379	0.00852	0.01103
10	0.01950	0.00215	-73.12253	0.00001	-0.00004
11	0.32075	0.09095	-79.22054	0.00546	-0.02866
12	0.01139	0.00046	152.27515	-0.00000	0.00000
13	0.23680	0.04998	262.01778	-0.00164	-0.01172
14	0.00346	0.00348	-144.31641	-0.00001	-0.00001
15	0.13332	0.02159	231.57374	-0.00179	-0.00225
16	0.00967	0.00508	-62.61883	0.00002	-0.00004
17	0.20173	0.05101	-70.52109	0.00343	-0.00970
18	0.00605	0.00046	151.13243	-0.00000	0.00000
19	0.06196	0.02826	-85.92015	0.00012	-0.00175
20	0.00677	0.00356	186.18600	-0.00002	-0.00000
21	0.01561	0.00778	177.31650	-0.00012	0.00001
22	0.00650	0.00368	-30.02924	0.00002	-0.00001
23	0.01092	0.01579	45.32535	0.00012	0.00012
24	0.00743	0.00002	-69.58203	0.00000	-0.00000
25	0.00323	0.00394	299.65506	0.00001	-0.00001
26	0.00351	0.00478	-26.10292	0.00002	-0.00001
27	0.00598	0.00352	-6.97387	0.00002	-0.00000
28	0.01218	0.00053	168.52693	-0.00001	0.00000
29	0.00892	0.00429	-83.35510	0.00000	-0.00004
30	0.01267	0.00090	123.74984	-0.00001	0.00001
31	0.00810	0.00291	107.10032	-0.00001	0.00002
32	0.01147	0.00146	153.93353	-0.00002	0.00001
33	0.00460	0.00311	-159.32653	-0.00001	-0.00001
34	0.00372	0.00132	209.63771	-0.00000	-0.00000
35	0.00616	0.00262	-140.62023	-0.00001	-0.00001
36	0.00967	0.00107	34.82581	0.00001	0.00001
37	0.01082	0.00292	-7.55885	0.00003	-0.00000
38	0.00626	0.00135	-102.91489	-0.00000	-0.00001
39	0.00570	0.00205	-113.58869	-0.00000	-0.00001
40	0.00206	0.00169	8.57897	0.00000	0.00000

Puterea aparenta : S = 159.6816 VA
 Puterea activa: P = -90.9103 W \bar{o} Pk = -0.0493 W
 Puterea reactiva: Q = 129.7543 var \bar{o} Qk = -0.6847 var
 Puterea deformanta: D = 19.9340 vad

D:\DATA\DN3~2.TXT

Puterea calculata cu 1: U SN si 4: I S delta

Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	126.18314	1.40584	16.33498	170.23267	49.89236
2	0.04265	0.00215	-135.08949	-0.00006	-0.00006
3	0.46934	0.14103	10.09708	0.06517	0.01160
4	0.08002	0.00305	-72.12336	0.00007	-0.00023
5	4.19336	0.27719	-87.48961	0.05091	-1.16124
6	0.05485	0.00192	-71.30025	0.00003	-0.00010
7	0.21231	0.08223	-69.42785	0.00613	-0.01634
8	0.02908	0.00118	16.56399	0.00003	0.00001
9	0.43969	0.02769	-27.78168	0.01077	-0.00567
10	0.00986	0.00096	-15.01895	0.00001	-0.00000
11	0.50328	0.08616	-116.18688	-0.01914	-0.03891
12	0.01660	0.00372	-55.09947	0.00004	-0.00005
13	0.23044	0.06603	-21.95053	0.01411	-0.00569
14	0.00186	0.00179	95.76500	-0.00000	0.00000
15	0.10437	0.02356	-44.15525	0.00176	-0.00171
16	0.01716	0.00284	-71.73612	0.00002	-0.00005
17	0.18972	0.05409	-81.76585	0.00147	-0.01016
18	0.00620	0.00197	-115.09741	-0.00001	-0.00001
19	0.11716	0.05595	-41.56025	0.00490	-0.00435
20	0.00758	0.00054	-43.50723	0.00000	-0.00000
21	0.02688	0.01149	-58.02032	0.00016	-0.00026
22	0.00159	0.00156	1.67720	0.00000	0.00000
23	0.02973	0.01233	-127.97171	-0.00023	-0.00029
24	0.01159	0.00161	28.32551	0.00002	0.00001
25	0.01921	0.02221	-56.48318	0.00024	-0.00036
26	0.00730	0.00153	-7.62905	0.00001	-0.00000
27	0.00870	0.00554	-121.71806	-0.00003	-0.00004
28	0.01559	0.00037	98.25911	-0.00000	0.00001
29	0.01374	0.00374	95.99412	-0.00001	0.00005
30	0.00787	0.00129	-143.90310	-0.00001	-0.00001
31	0.01004	0.00854	21.00288	0.00008	0.00003
32	0.01261	0.00137	96.48571	-0.00000	0.00002
33	0.01140	0.00250	-225.86617	-0.00002	0.00002
34	0.00629	0.00063	67.83506	0.00000	0.00000
35	0.01118	0.00077	-242.06818	-0.00000	0.00001
36	0.00566	0.00139	16.64537	0.00001	0.00000
37	0.01462	0.00093	-103.99057	-0.00000	-0.00001
38	0.00414	0.00179	-77.01704	0.00000	-0.00001
39	0.00097	0.00371	-39.98091	0.00000	-0.00000
40	0.00629	0.00070	93.33117	-0.00000	0.00000

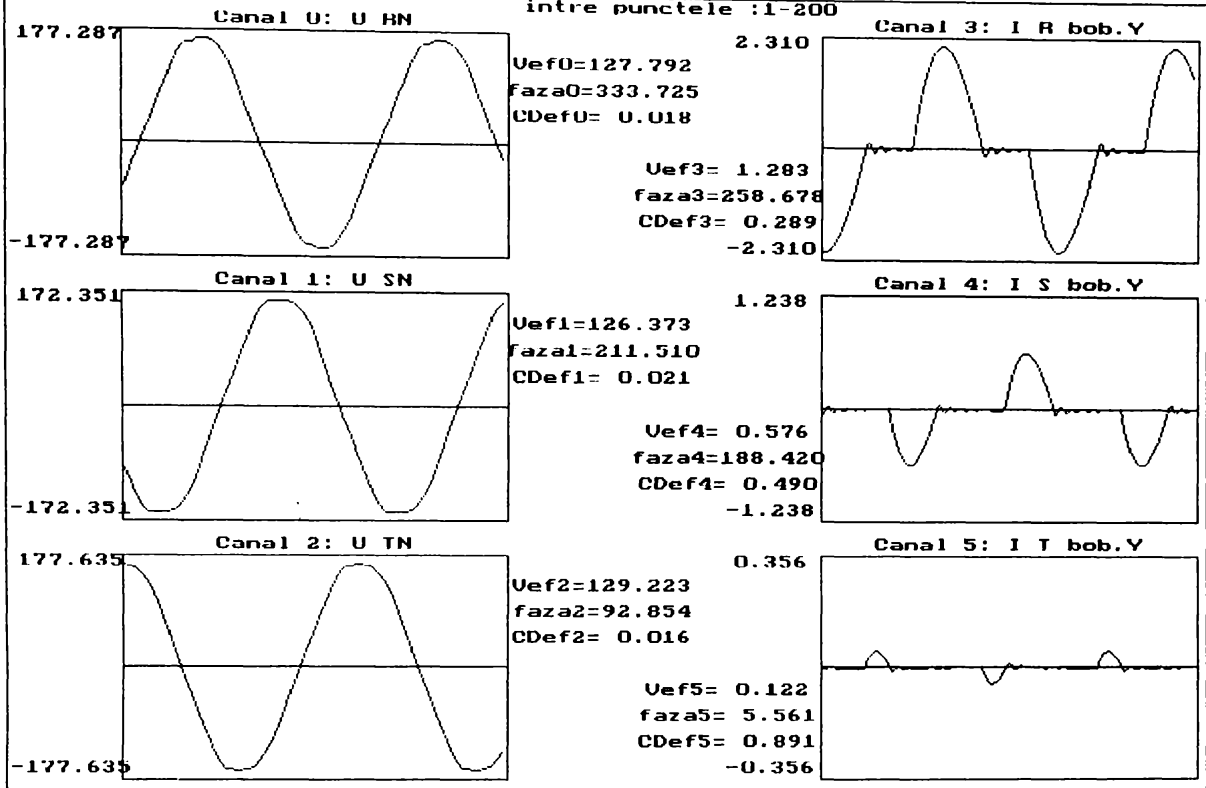
Puterea aparenta : S = 178.7314 VA
 Puterea activa: P = 170.3691 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.1365 W
 Puterea reactiva: Q = 48.6586 var $\bar{\sigma}$ Qk = -1.2338 var
 Puterea deformanta: D = 23.4869 vad

Puterea calculata cu 0: U RN si 3: I R delta

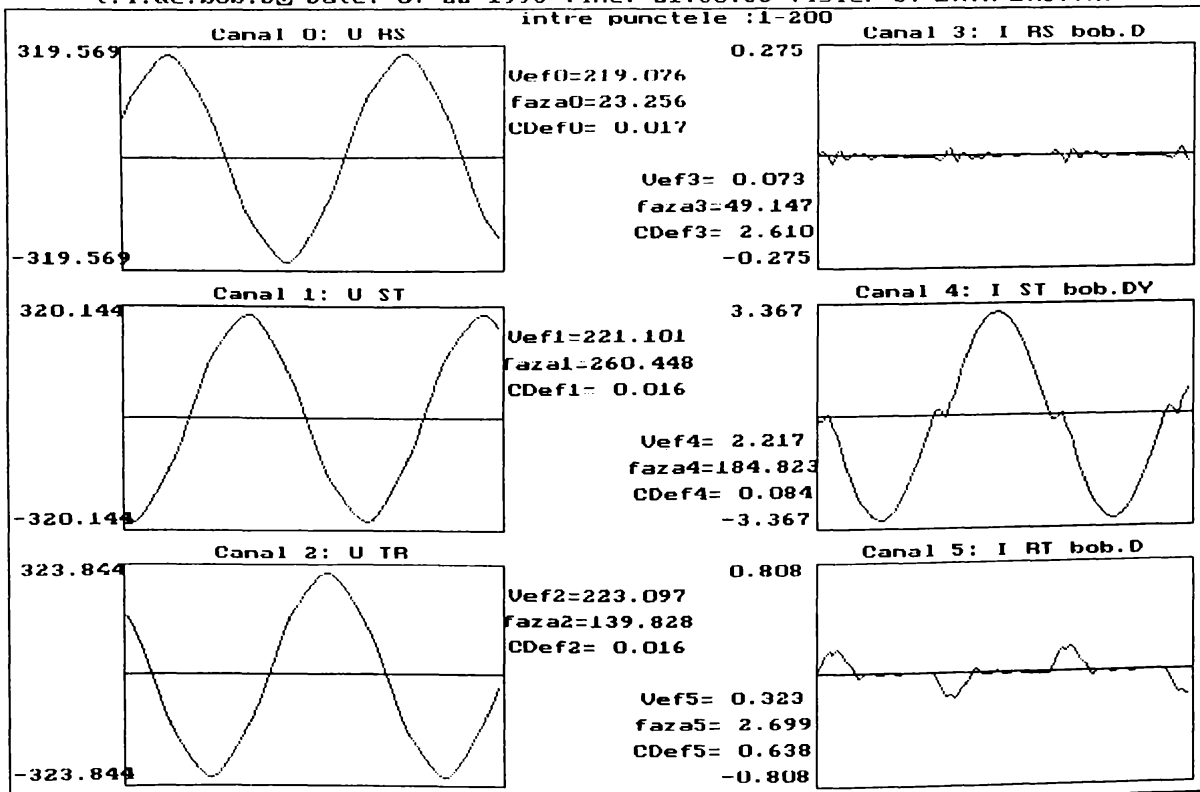
Arm	Ui	Ii	defi	Pi	Qi
1	127.45275	1.10049	-102.16318	-29.55244	-137.11194
2	0.04377	0.00579	-250.02067	-0.00009	0.00024
3	0.90290	0.21566	-106.12496	-0.05408	-0.18706
4	0.04436	0.00419	-20.42653	0.00017	-0.00006
5	3.32867	0.24718	-57.05585	0.44744	-0.69047
6	0.05636	0.00085	42.19952	0.00004	0.00003
7	0.87737	0.10630	-50.77452	0.05898	-0.07225
8	0.01380	0.00135	51.67298	0.00001	0.00001
9	0.55962	0.04648	-147.55730	-0.02195	-0.01395
10	0.02496	0.00091	-343.14372	0.00002	0.00001
11	0.45568	0.09192	-74.35800	0.01129	-0.04033
12	0.00856	0.00280	29.54267	0.00002	0.00001
13	0.39697	0.06662	-59.49542	0.01342	-0.02278
14	0.02727	0.00386	-115.05837	-0.00004	-0.00010
15	0.12526	0.01482	-117.85038	-0.00087	-0.00164
16	0.03270	0.00262	-98.81831	-0.00001	-0.00008
17	0.19871	0.03138	-33.51228	0.00520	-0.00344
18	0.01952	0.00113	-0.68994	0.00002	-0.00000
19	0.22259	0.05470	-69.98350	0.00417	-0.01144
20	0.03001	0.00323	-64.23876	0.00004	-0.00009
21	0.02200	0.00434	-38.05158	0.00008	-0.00006
22	0.00481	0.00245	-55.88514	0.00001	-0.00001
23	0.06641	0.01272	-49.42020	0.00055	-0.00064
24	0.00799	0.00166	-98.20549	-0.00000	-0.00001
25	0.05408	0.02340	-50.90509	0.00080	-0.00098
26	0.01414	0.00645	-36.78732	0.00007	-0.00005
27	0.01359	0.00356	7.05026	0.00005	0.00001
28	0.01494	0.00075	-103.49636	-0.00000	-0.00001
29	0.00822	0.00216	-96.77647	-0.00000	-0.00002
30	0.01725	0.00302	-88.08958	0.00000	-0.00005
31	0.01639	0.01070	-56.18730	0.00010	-0.00015
32	0.00727	0.00206	-125.52375	-0.00001	-0.00001
33	0.00758	0.00377	117.99475	-0.00001	0.00003
34	0.00600	0.00201	-82.60142	0.00000	-0.00001
35	0.01155	0.00276	47.13666	0.00002	0.00002
36	0.01123	0.00296	51.78450	0.00002	0.00003
37	0.01968	0.00364	116.90949	-0.00003	0.00006
38	0.00583	0.00249	-50.39347	0.00001	-0.00001
39	0.01065	0.00310	53.04415	0.00002	0.00003
40	0.00229	0.00165	-77.30455	0.00000	-0.00000

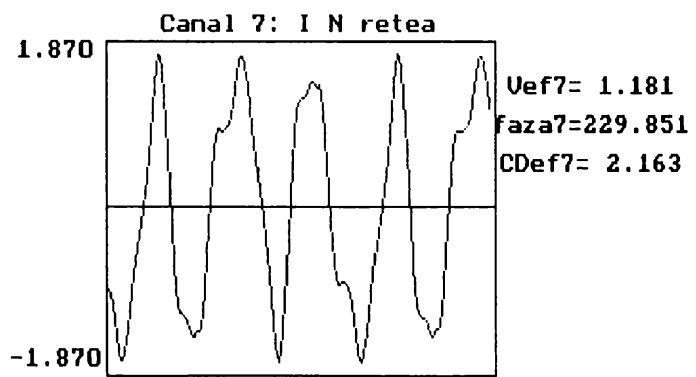
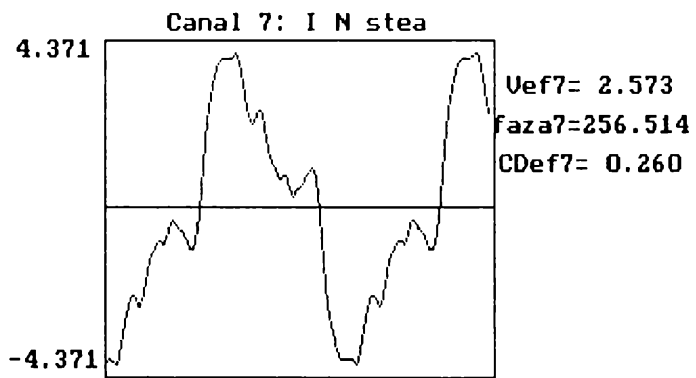
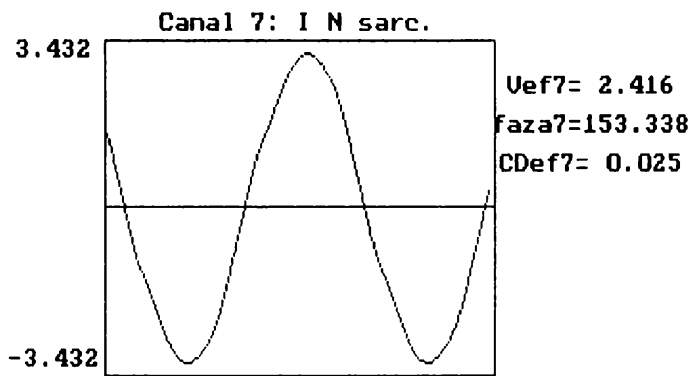
Puterea aparenta : S = 141.4897 VA
 Puterea activa: P = -29.0870 W $\bar{\sigma}$ Pk = 0.4655 W
 Puterea reactiva: Q = -138.1572 var $\bar{\sigma}$ Qk = -1.0453 var
 Puterea deformanta: D = 9.2663 vad

t.f.&c.f.bob.Y@ Date: 07-22-1998 Time: 21:16:43 fisier D:\DATA\DNS.TXT
 intre punctele :1-200

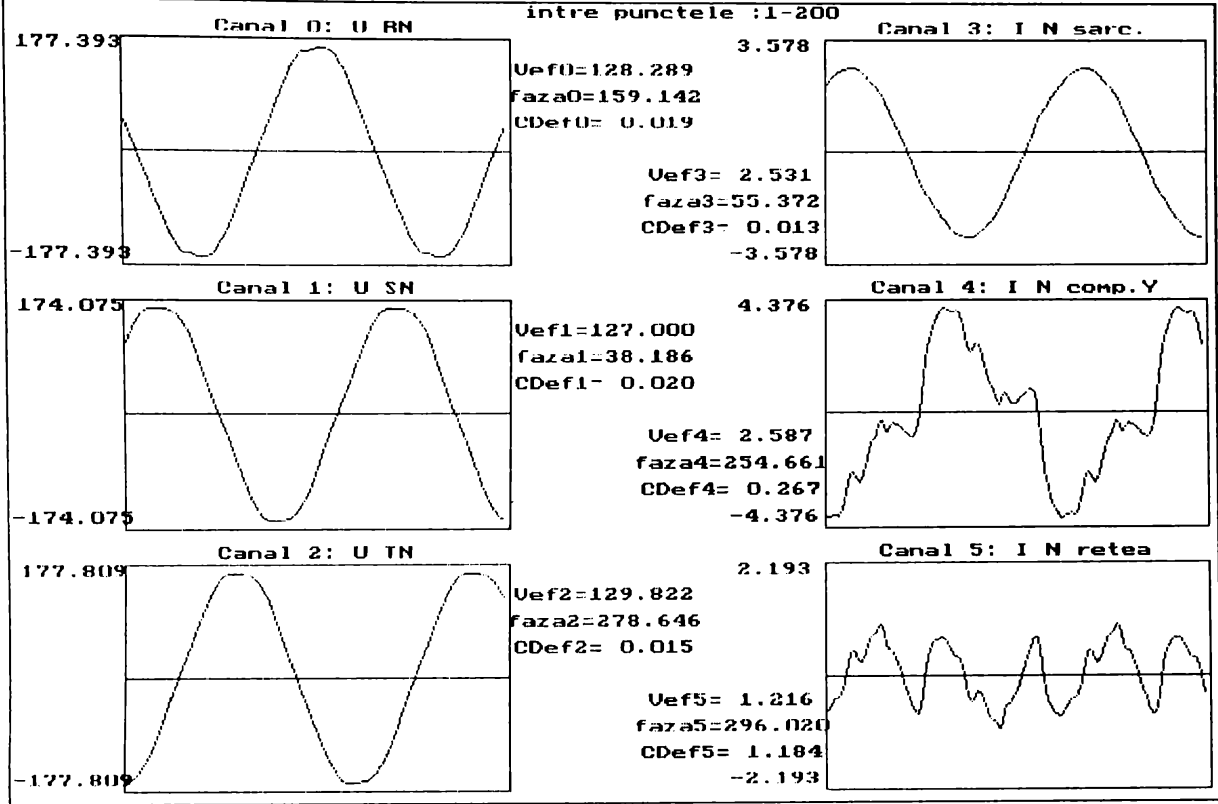


t.l.&c.bob.D@ Date: 07-22-1998 Time: 21:30:35 fisier D:\DATA\DN6.TXT
 intre punctele :1-200





Δ14-18



*Acum, când pot rosti bucuros : “ am reușit !”, îi am în
față pe toți cei care, cu un gând, o vorbă, o mână de ajutor, au
fost alături de mine... Vă spun cu emoție tuturor : Mulțumesc !
N-aș fi reușit fără voi !*

Adi Pană