

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

BIBLIOTECA CENTRALĂ

Nr. inv. 629. 807
Dulap 369 Lit. 4

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ

ing.Liliana Marilena MATICA

**CONTRIBUTII PRIVIND ANALIZA
SISTEMELOR TRIFAZATE IN REGIMURI
SINUSOIDAL NESIMETRIC SI PERIODIC NESINUSOIDAL**

TEZĂ DE DOCTORAT

**Conducător științific
prof.dr.doc.ing.Constantin Șora**

Timișoara 2001

Introducere	1
Capitolul 1. REGIMUL NESIMETRIC SINUSOIDAL DE FUNCȚIONARE AL REȚELELOR ELECTRICE. CONSIDERAȚII GENERALE	5
1.1. Generalități.....	5
1.2. Cauzele și efectele regimului nesimetric	6
1.3. Echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei – soluție a problemei de optimizare.....	7
1.4. Mărimile caracteristice regimului nesimetric.....	10
1.5. Circulația de puteri în rețelele trifazate cu consumatori dezechilibrați.....	11
1.6. Metoda componentelor de secvență. Forma matricei de secvență.....	12
1.6.1. Element trifazat fără conductor neutru	12
1.6.2 Element trifazat cu conductor neutru.....	14
1.6.3. Element trifazat cu conductor de gardă legat la pământ	17
1.6.4. Determinarea impedanțelor de secvență.....	18
1.7. Propagarea regimului nesimetric. Calculul circulației de curenți și puteri de secvență	20
1.7.1. Considerații generale	20
1.7.2. Alimentarea unui consumator dezechilibrat printr-o linie scurtă	22
1.7.3. Linia scurtă alimentează un consumator echilibrat și altul dezechilibrat	24
1.8 Concluzii	25
Capitolul 2. REGIMUL PERIODIC NESINUSOIDAL DE FUNCȚIONARE AL REȚELELOR ELECTRICE	27
2.1. Cauzele regimului nesinusoidal	27
2.2. Indicatori de calitate ai tensiunii și curentului în rețele poluate armonice	28
2.3. Efectele poluării armonice	30
2.3.1. Generalități.....	30
2.3.2. Efectele energetice	30
2.3.3. Creșterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor sau receptoarelor	33
2.3.4. Supracurenți de rezonanță armonică	35
2.4. Circulația de puteri în rețele cu consumatori neliniari	35
2.5. Impedanța armonică a rețelelor electrice	38
2.5.1. Generalități	38
2.5.2. Metode de estimare	39
2.5.3. Modelarea armonică a elementelor de rețea și a consumatorilor liniari	41
2.5.4. Propagarea regimului nesinusoidal (poluării armonice) în rețelele sistemului electroenergetic	41
2.5.5. Aplicații. Consumator neliniar alimentat din sistemul electroenergetic printr-o stație la care sunt racordați și consumatori liniari	43
2.6. Preocupări și tendințele în domeniul analizei regimului nesinusoidal al rețelelor electrice	53
2.7. Concluzii și contribuții originale	55
Capitolul 3. PROBLEMA PUTERILOR LA SISTEMELE TRIFAZATE ÎN REGIMURI SINUSOIDALE NESIMETRICE ȘI REGIMURI PERIODICE NESINUSOIDALE	57
3.1. Problema puterilor la sistemele trifazate în regimuri nesimetrice	57
3.1.1. Puteri instantanee în regimuri nesimetrice. Putere fluctuantă	57

3.1.2. Analiza puterilor instantanee ale unui sistem trifazat nesimetric prin metoda componentelor simetrice	60
3.1.3 Puterea aparentă echivalentă la sistemele nesimetrice. Componentele puterii aparente	65
3.2. Problema puterilor în regimuri periodic nesinusoidale	69
3.2.1. Unele expresii clasice	69
3.2.2. Relații de calcul practice în regimuri nesinusoidale	72
3.2.3. Definiție neconvențională a puterii reactive în regim nesinusoidal	74
3.3. Concluzii și contribuții originale	79
Capitolul 4. FACTORUL DE PUTERE IN REȚELE CE ALIMENTEAZA CONSUMATORI DEZECHILIBRATI ȘI NELINIARI	81
4.1 Calitatea energiei electrice. Indicatorii de calitate ai energiei electrice	81
4.2. Tendințe în definirea și estimarea factorului de putere în regimuri nesimetrice și nesinusoidale	83
4.2.1. Definirea factorului de putere în condițiile de noncalitate a energiei electrice	83
4.2.2. Criterii pentru definirea unui factor de putere în regim nesimetric și nesinusoidal	84
4.3. Posibilități de definire a factorului de putere în regim nesinusoidal și nesimetric	85
4.3.1. Factorul de putere permite aprecierea gradului de utilizare a puterii active disponibile maxime	85
4.3.2. Factorul de putere oferă informații despre pierderile de putere în rețea	92
4.3.3. Definiția factorului de putere oferă indicații privind creșterea valorii sale și chiar obligă consumatorul să facă acest lucru	94
4.3.4 Factorul de putere oferă informații despre regimul real de funcționare al consumatorului, dar trebuie să fie cât mai simplu măsurat	95
4.3.5. Factorul de putere este un indicator global de calitate a energiei consumate.	96
4.3.6. Observații asupra criteriilor și posibilităților de definire a factorului de putere	97
4.4 Definirea factorului de putere momentan	98
4.4.1. Teoria puterilor instantanee	98
4.4.2. Puterea aparentă și factorul de putere în teoria puterilor instantanee	100
4.5 Concluzii	101
Capitolul 5. SIMULĂRI , DETERMINĂRI EXPERIMENTALE, MĂSURĂTORI.....	103
5.1 Modelare software și analiza prin simulare a circuitelor electrice	103
5.1.1 Model de rețea alimentând consumatori simetrici și nesimetrici	104
5.1.2 Model de rețea alimentând consumatori echilibrați , dezechilibrați și neliniari	109
5.2. Măsurători efectuate pe model fizic în laborator	113
5.2.1. Experiment nr.1	113
5.2.2. Experiment nr.2	116
5.3. Măsurători în instalații	123
5.4. Interpretarea rezultatelor, concluzii	125
Capitolul 6. CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE	127
Anexa 1. Regim nesimetric I , simulare , modelare PSpice	
Anexa 2. Regim nesimetric II , simulare , modelare PSpice	
Anexa 3. Regim nesimetric și nesinusoidal , simulare , modelare PSpice	
Anexa 4. Măsurători în instalații	

INTRODUCERE

Fără îndoială că una din cele mai actuale probleme ale electrotehnicii aplicate în general și ale sistemelor electrice de putere în particular , este *calitatea energiei electrice*. Ea trebuie abordată în contextul mai larg al interacțiunii dintre instalațiile furnizorului și cele ale consumatorului de energie sub acțiunea perturbațiilor . Perturbațiile sunt acelea care determină noncalitatea energiei electrice , scăderea randamentului procesului de transport și distribuție și utilizare ale energiei electrice. Dintre perturbațiile sistemului electroenergetic în ultima perioadă se remarcă regimurile nesimetrice și poluarea armonică. Dezvoltarea rapidă a proceselor industriale și de transport , modernizarea acestora pe seama electronicii de putere au favorizat pătrunderea și extinderea echipamentelor neliniare, multe dintre acestea conectate între două faze sau între o fază și conductorul neutru. Toate acestea au determinat formarea unor importante sarcini dezechilibrate și neliniare , surse veritabile ale unor regimuri sinusoidale nesimetrice sau periodic nesinusoidale.

La început prezența acestor regimuri perturbate a fost pusă pe seama unor receptoare dezechilibrate neliniare de mare putere : instalații de sudare , cuptoare cu arc electric, tracțiune feroviară etc. , ulterior s-a constatat că , alături de acestea la producerea regimurilor perturbate, mai ales periodic nesinusoidale participă și o diversitate mare de receptoare de mică putere (0,1 - 10kw) , dar a căror putere însumată conduce la valori comparabile cu cele ale marilor consumatori, printre acestea fiind : mașinile de spălat automate , congelatoarele , frigiderele , calculatoarele de birou, imprimantele, faxurile și copiatoarele . Majoritatea dintre acestea prezintă la intrare sisteme de alimentare a echipamentelor electronice cu surse de comutație , fapt care conduce la deformarea curbelor de tensiune și de curent.

În aceste condiții , compensarea puterii reactive în nodurile rețelelor de distribuție și în general controlul puterii reactive în sistemele electrice de putere nu poate fi efectuat separat de echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor. Luarea unor măsuri unilaterale poate afecta defavorabil calitatea energiei electrice.

În ceea ce privește calitatea energiei electrice , indiferent cum aceasta este percepută : calitatea produsului energie electrică , calitatea serviciului de alimentare cu energie electrică , calitatea sistemului automat ierarhizat în care se produce energia electrică , ea este apreciată pe baza indicatorilor de calitate , indicatori de calitate ce pot fi specifici sau globali. Având în vedere dezideratele de interconectare

a sistemului energetic național cu sistemul energetic european se manifestă tot mai pregnant preocupările de modernizare , eficientizare și îmbunătățire a calității alimentării cu energie electrică.

Calitatea alimentării cu energie electrică este influențată de două grupări de fenomene [C10] : fenomene aleatoare (supratensiuni tranzitorii, întreruperi de scurtă și lungă durată , goluri de tensiune) și fenomene permanente și semipermanente (variații rapide sau lente de tensiune, nesimetrii de curent și tensiune, , armonici generate) . Dintre acestea printre cele mai frecvent întâlnite și cu efecte mai importante sunt : prezența armonicilor de curent și a armonicilor de tensiune ; nesimetrii ale tensiunilor și curenților de alimentare.

Lucrarea se încadrează în preocupările de studiu ale regimului nesimetric și nesinusoidal periodic de funcționare al sistemelor trifazate în care factorul perturbator este consumatorul dezechilibrat și neliniar , abordând cu precădere problema interacțiunii dintre regimul real de funcționare al rețelelor electrice de distribuție și problema calității energiei electrice distribuite și consumate. În acest context un rol important îl joacă indicatorii de calitate globali , care conțin informații asupra modului în care este distribuită și mai ales consumată energia electrică . Fără îndoială unul dintre cei mai importanți indicatori este și *factorul de putere*, iar definirea lui presupune caracterizarea regimului real de funcționare și modul de definire al puterilor active și aparente.

Aceste elemente constituie de fapt esența lucrării de față , iar cercetările efectuate cu ocazia elaborării tezei , vin să adâncească câteva aspecte principale din multitudinea de probleme ce caracterizează funcționarea sistemelor trifazate în regimuri nesimetric sinusoidale și nesinusoidale periodice.

Desigur unul dintre punctele de plecare în analiza efectuată a fost definirea cauzelor perturbațiilor , adică a regimului real de funcționare a rețelei . Prezența unor surse de putere importante încadrate în sisteme electroenergetice puternic interconectate fac posibil alimentarea rețelelor de distribuție cu tensiuni ce alcătuiesc sisteme simetrice de succesiune pozitivă cu o variație aproape perfect sinusoidală . Ca urmare pare firesc ca elementul principal în determinarea regimului perturbat de funcționare să fie consumatorul. Această ipoteză simplifică construirea unor modele matematice și permite realizarea comodă a unui concept privitor la circulația curenților de succesiune negativă și zero , precum și a curenților armonici , evidențiind interacțiunea dintre consumator și rețeaua electrică . Unul dintre indicatorii cei mai reprezentativi ai acestei interacțiuni este fără îndoială factorul de putere și pentru analiza acestuia în lucrare au fost parcurse și dezvoltate aspecte legate de : regimul nesimetric de funcționare al rețelelor electrice , regimul periodic nesinusoidal , definirea puterilor în regim nesimetric și nesinusoidal periodic, definirea factorului de putere , simulări și determinări experimentale în rețele funcționând în regim nesimetric și nesinusoidal periodic.

Astfel în primul capitol sunt prezentate câteva din problemele principale pe care le ridică analiza regimului nesimetric produs de consumatorii dezechilibrați și anume : cauze, efecte, mărimi caracteristice , circulația de puteri, utilizarea metodei componentelor de secvență la analiza regimurilor nesimetrice, propagarea regimului nesimetric.

Capitolul al doilea prezintă aspecte principale pe care le comportă studiul regimului nesinusoidal periodic provocat de consumatori neliniari ai sistemelor electroenergetice . Sunt enumerate cauzele regimului nesinusoidal periodic , principali indicatori de calitate a tensiunii și curentului în sisteme trifazate poluate armonic , circulația de puteri în sisteme ce alimentează consumatori neliniari , problematica impedanței armonice , preocupări și tendințe în domeniul analizei regimului periodic nesinusoidal al rețelelor electrice.

În capitolul al treilea sunt analizate problemele legate de definirea puterilor , puterea aparentă și puterea activă în circuite cu sarcini dezechilibrate sau/și neliniare. O atenție sporită se acordă definirii puterii aparente în circuitele trifazate sinusoidal nesimetrice . În acest sens introducerea puterii aparente echivalente este foarte utilă. Se analizează de asemenea problematica definirii componentelor puterii aparente în regimuri nesimetrice și nesinusoidale periodice.

Capitolul al patrulea prezintă aspecte legate de definirea și estimarea factorului de putere . Legat de circulația puterilor reactive în sistemele trifazate , factorul de putere poate constitui astăzi un indicator de calitate al modului în care este consumată energia electrică. De aceea alături de definirea factorului de putere sunt prezentate și unele aspecte generale privind calitatea energiei electrice distribuite și consumate. Pentru a putea defini factorul de putere în nodurile rețelelor ce funcționează în regimuri sinusoidal nesimetrice și/sau nesinusoidal periodice sunt considerate diferite criterii care permit abordarea ordonată și completă a problemei.

Capitolul al cincilea este rezervat simulărilor și determinărilor experimentale. Acestea și-au propus să valideze afirmațiile efectuate pe parcursul lucrării , mai ales în legătură cu circulația puterilor pe armonici , iar în cadrul acestora pe secvențe. Simulările sunt efectuate cu programul PSpice iar determinările experimentale sunt efectuate în laborator și în posturi de transformare sau stații de alimentare ale Electrica S.A. filiala Bihor.

În ultimul capitol sunt prezentate concluziile care se reliefează din această lucrare și contribuțiile autorului lucrării.

Înainte de a trece efectiv la prezentarea lucrării, se consideră că se cuvine a se menționa rezultatele deosebite obținute de școala tehnică românească în cercetarea regimurilor deformante și nesimetrice, lucrările și mai ales rezultatele obținute de unii dintre membrii acesteia : C.I.Budeanu , P.Andronescu , I.S.Antoniou , A. Țugulea , A.Arie , N. Golovanov , S.C.Ionescu , Al. Poeată , E. Pavel , E. Potolea , Hermina Albert fiind momente de referință și ele au stat la baza elaborării acestei lucrări.

Lucrarea a fost realizată sub competența conducere a domnului profesor dr.doc.ing. Constantin Șora, căruia i se cuvine să îi aduc distinse mulțumiri.

Deosebite mulțumiri se cuvin și domnului profesor dr.ing.Adrian Buta pentru ajutorul acordat în realizarea acestei lucrări prin îndrumări concrete privind unele probleme esențiale specifice funcționării rețelelor trifazate în regimuri sinusoidal nesimetrice și periodic nesinusoidale . De asemenea aduc mulțumiri colectivului de la Sucursala de Distribuție Oradea a S.C.Electrica S.A. pentru sprijinul acordat în conectarea acestei lucrări la situația concretă din rețelele de distribuție ale

sucursalei. Mulțumesc de asemenea pentru și sprijinul acordat în realizarea acestei lucrări domnului profesor dr.ing. Ioan Felea.

Aduc mulțumiri pentru încrederea și sprijinul acordat domnului profesor dr.ing. Teodor Maghiar , domnului profesor dr.ing.Teodor Leuca, domnului profesor dr.ing. Mihai Gavriș.

Doresc, de asemenea să aduc mulțumiri familiei mele pentru încrederea , răbdarea și sprijinul acordat în realizarea acestei lucrări.

CAPITOLUL 1

REGIMUL NESIMETRIC SINUSOIDAL DE FUNCȚIONARE AL REȚELELOR ELECTRICE. CONSIDERAȚII GENERALE

Regimul real de funcționare al rețelelor de distribuție este nesimetric și nesinusoidal. Ca urmare în prima parte a acestei lucrări, mai precis în cadrul acestui capitol se vor prezenta problemele generale pe care le comportă analiza regimurilor nesimetrice sinusoidale, cauze, efecte, mărimi caracteristice, circulația puterilor, propagarea regimurilor nesimetrice.

1.1. Generalități

Rețelele electrice trifazate au fost concepute pentru a funcționa în regimuri simetrice, echilibrate. În aceste regimuri elementele componente: transformatoare, linii, baterii de condensatoare, bobine de reactanță etc. prezintă parametrii de circuit pe fiecare fază identici, iar sistemul de tensiuni și curenți în orice secțiune sunt simetrice. Dacă unul din elementele rețelei sau ale consumatorilor pe care îi alimentează rețeaua cu energie electrică se dezechilibrează, regimul devine nesimetric, iar sistemele de tensiuni și curenți din diferite noduri își pierd simetria.

Principalele probleme pe care le comportă analiza regimului nesimetric sunt prezentate schematic în fig. 1.1 și la baza întocmirii ei au stat cele prezentate în literatură [A9], [B3], [I4], [P1].

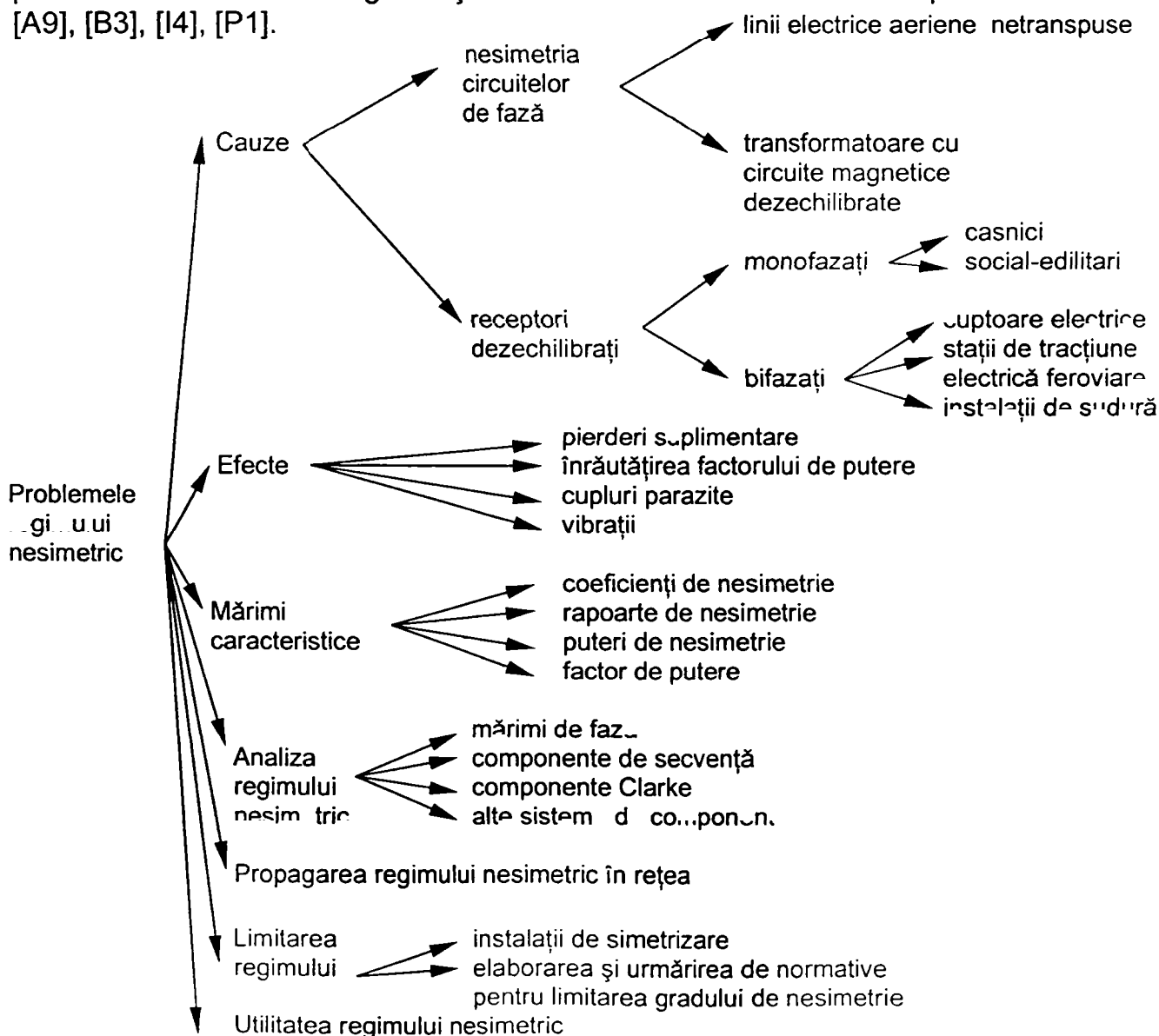


Fig. 1.1. Problemele regimului nesimetric

În cele ce urmează vor fi prezentate câteva din aceste probleme, insistându-se pe efectele energetice ale regimului nesimetric sinusoidal și pe cele legate de analiza acestuia.

1.2. Cauzele și efectele regimului nesimetric

Prezența regimului nesimetric sinusoidal poate fi datorată construcției nesimetrice a circuitelor electrice a liniilor electrice aeriene (cauzată de dispoziția neidentică a conductoarelor) sau a circuitelor magnetice a transformatoarelor și bobinelor de compensare. Această situație conduce la valori diferite ale impedanțelor pentru fazele rețelei. Desigur ponderea pe care o deține impedanța elementelor de rețea din totalul impedanței sistemului este redusă și valoarea ei poate fi evidențiată în fig. 1.2. La întocmirea diagramei prezentate în această figură s-au avut în vedere cele prezentate în [B2], [I1] iar sistemul considerat a fost unul idealizat, a cărui elemente au fost considerate de același putere nominală. Pentru sistemul sursă s-a considerat puterea de scurtcircuit egală cu 6000 MVA.

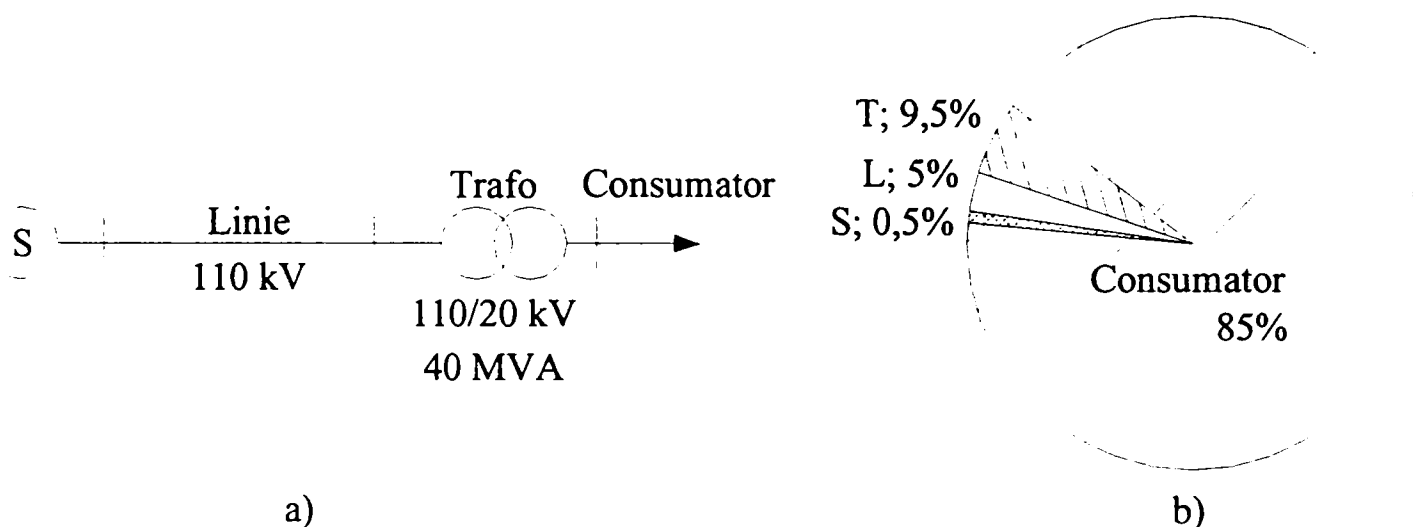


Fig. 1.2. Ponderea impedanțelor în sistemele de distribuție: a) schema principală monofilară a sistemului de distribuție; b) ponderea impedanțelor.

Din cele prezentate în fig. 1.2. rezultă ponderea relativ mică (cca. 10%) pe care o dețin elementele de rețea în impedanța sistemului de distribuție. Rolul **important îl dețin consumatorii**. Deci cauza principală a nesimetriilor o constituie alimentarea consumatorilor, mare parte din ei dezechilibrați, monofazați – racordați între două faze ale rețelei sau între o fază și neutru.

Multe dintre sarcinile dezechilibrate provin de la consumatorii casnici și social-edilitari care sunt racordați la rețeaua de joasă tensiune și sunt de puteri mici (de la câțiva zeci de watt până la 5 – 10 kW). Cele mai importante dezechilibre le produc consumatorii industriali monofazați de puteri mari, racordați la rețele electrice de medie sau înaltă tensiune, cum ar fi spre exemplu instalațiile de sudură (de puteri cuprinse între 100 kVA și 3 MVA), cuptoarele electrice monofazate, stațiile de transformare pentru alimentarea tracțiunii electrice feroviare etc. Nesimetriile provocate de aceste sarcini sunt însoțite de cele mai multe ori și de alte forme de perturbații: armonici, șocuri de tensiune, goluri de tensiune etc. [A1], [A10].

Dintre efectele energetice, cele mai semnificative sunt fără îndoială creșterea pierderilor de putere și înrăutățirea factorului de putere.

Astfel dacă ne referim la pierderile longitudinale de putere, în regim simetric acestea pot fi scrise sub forma:

$$\Delta P_{sim} = 3I^2 \cdot r = 3I_+^2 \cdot r \quad (1.1)$$

Iar în regim nesimetric

$$\Delta P_{nes} = r(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) + r_N \cdot I_N^2 \quad (1.2)$$

unde : I este valoarea efectivă a curentului pe faza rețelei ce alimentează un consumator simetric, egal cu componenta de secvență directă a curenților de fază;

I_R, I_S, I_T – curenții pe fazele rețelei ce alimentează consumatorul nesimetric;

I_N – curentul pe conductorul neutru; este egal cu $3I^0$;

r, r_N – rezistența conductorului de fază, respectiv a conductorului neutru;

$$\text{Dar } I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 = 3(I_+^2 + I_-^2 + I_0^2) \quad [P\ 9] \quad (1.3)$$

de unde rezultă că

$$\Delta P_{nes} = 3r \left[I_+^2 + I_-^2 + I_0^2 \left(1 + \frac{3r_N}{r} \right) \right] \quad (1.4)$$

Ca urmare

$$\frac{\Delta P_{nes}}{\Delta P_{sim}} = 1 + \left(\frac{I^-}{I^+} \right)^2 + \left(\frac{I^0}{I^+} \right)^2 \left(1 + \frac{3r_N}{r} \right) > 1 \quad (1.5)$$

deci pierderile de putere longitudinale în regim nesimetric cresc.

Aceeași observație se poate face și pentru pierderile de putere transversale δP , dacă se au în vedere relațiile [B2], [B5].

$$\delta P_{sim} = 3U_f^2 G = 3U_+^2 G \quad (1.6)$$

$$\delta P_{nes} = 3(U_+^2 + U_-^2 + U_0^2) \cdot G \quad (1.7)$$

$$\frac{\delta P_{nes}}{\delta P_{sim}} = 1 + \left(\frac{U^-}{U^+} \right)^2 + \left(\frac{U^0}{U^+} \right)^2 > 1 \quad (1.8)$$

Mărimile care intervin în relațiile (1.6) – (1.8) au semnificația consacrată.

În ceea ce privește factorul de putere dacă se consideră definiția clasică [T6], [T7] ce are în vedere gradul de utilizare al puterii maxime se pot scrie relațiile:

$$k_{nes} = \frac{P}{P_{max}} = \frac{P^+ + P^- + P^0}{S} = \frac{P^+ + P_{nes}}{S} \quad (1.9)$$

și

$$k_{sim} = \frac{P}{P_{max}} = \frac{P^+}{S} \quad (1.10)$$

de unde

$$\frac{k_{nes}}{k_{sim}} = 1 + \frac{P_{nes}}{P^+} \quad (1.11)$$

Dar, deoarece rețeaua alimentează un consumator dezechilibrat, puterile P^- și P^0 sunt debitate de către acesta adică $P_{nes} < 0$ [T5], [T4], deci $k_{nes} / k_{sim} < 1$, adică factorul de putere în regim nesimetric se înrăutățește. La relațiile (1.9) și (1.10) s-a considerat că puterea maximă absorbită de consumatorul echilibrat și respectiv dezechilibrat este aceeași.

1.3 Echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei – soluție a problemei de optimizare

În literatură [B2], [B3], se arată că alimentarea simetrică a consumatorilor conduce la pierderi minime în rețeaua de alimentare.

În cele ce urmează se va arăta că optimizarea regimului de funcționare al rețelei de alimentare a unui consumator dezechilibrat impune uniformizarea (echilibrarea) sarcinii pe cele trei faze. Pentru aceasta se poate apela la componente de fază sau la cele de secvență.

În primul caz se consideră $I_R \neq I_S \neq I_T$ și defazajele $\varphi_R \neq \varphi_S \neq \varphi_T$ (fig. 1.3). Cu acestea curenții de fază și de pe conductorul neutru se exprimă în componente într-un sistem de axe rectangulare xOy; se înlocuiesc în expresia pierderilor de putere ΔP . Se efectuează derivatele parțiale $\frac{\partial \Delta P}{\partial I_f}$ și $\frac{\partial \Delta P}{\partial \varphi_f}$ (f = R, S, T) și se anulează. Vor rezulta condițiile de echilibrare a sarcinii :

$$I_R = I_S = I_T$$

$$\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$$

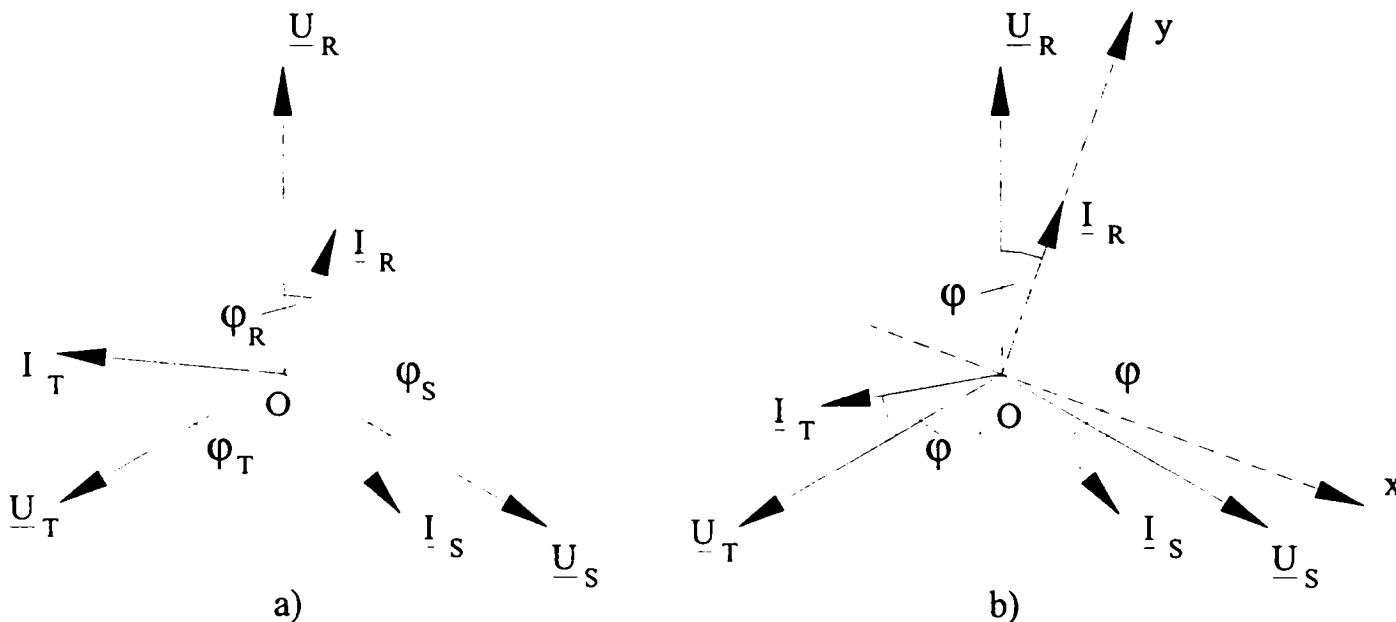


Fig. 1.3 Sisteme de curenți dezechilibrați. a) $I_R \neq I_S \neq I_T, \varphi_R \neq \varphi_S \neq \varphi_T$, b) $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$

O simplificare sensibilă se obține dacă se consideră situația în care:

$$\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T \quad (1.12)$$

adică consumatorii de pe cele trei faze sunt de aceeași natură (fig. 1.3b). În acest caz se pot scrie relațiile:

$$I_N^2 = I_X^2 + I_Y^2$$

$$I_X = I_S \cos \frac{\pi}{6} - I_T \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} (I_S - I_T)$$

$$I_Y = I_R - I_S \cos \frac{\pi}{3} - I_T \cos \frac{\pi}{3} = I_R - \frac{1}{2} (I_S + I_T)$$

$$I_R = k_1 I \quad (1.13)$$

$$I_S = k_2 I$$

$$I_T = (1 - k_1 - k_2) I = k_3 I$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1; I_R + I_S + I_T = I$$

iar

$$\Delta P = I^2 (k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) (r + r_N) - I^2 r_N (k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3)$$

Înlocuind pe k_3 cu $1 - k_1 - k_2$ se obține

$$\Delta P = \varphi(k_1, k_2) \quad (1.14)$$

Efectuând apoi derivatele parțiale $\frac{\partial \Delta P}{\partial k_1; \partial k_2}$ și egalându-le cu zero se obține sistemul:

$$\begin{cases} 2k_1 + k_2 - 1 = 0 \\ 2k_2 + k_1 - 1 = 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

a cărei soluționare permite obținerea relațiilor optime pentru k_i ($i=1, 2, 3$) și anume

$$k_1 = k_2 = k_3 = \frac{1}{3} \quad (1.16)$$

adică pentru ca pierderile de putere în rețeaua de alimentare să fie minime este necesar ca sarcina să fie echilibrată pe cele trei faze.

Acceptarea ipotezei simplificatoare (1.12) permite foarte comod estimarea creșterii pierderilor de putere într-un regim nesimetric față de unul simetric caracterizat prin aceeași sumă a valorilor efective a curenților. Astfel raportul pierderilor poate fi exprimat :

$$\frac{\Delta P_{nes}}{\Delta P_{sim}} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{min}} = k^* = \frac{3[(2A+1)(r+r_N) + A \cdot r_N]}{r} = 3 \left[2 \left(A + \frac{1}{2} \right) \left(1 + \frac{r_N}{r} \right) + A \frac{r_N}{r} \right] \quad (1.17)$$

unde $A = k_1^2 + k_2^2 + k_1 k_2 - k_1 - k_2$

$$\text{Pentru situația în care } r_N = r, \quad k^* = 3[4A + 1,5] \quad (1.18)$$

Iar dacă $r_N = 2r$, situație întâlnită îndeosebi la cablurile de joasă tensiune

$$k^* = 3[8A + 3] \quad (1.19)$$

În ceea ce privește mărimea cantității A este firește util de a urmări cum se modifică valoarea acesteia cu gradul de încărcare al fazelor. Astfel, dacă se consideră $k_2 = ct.$ și k_1

$$\text{variabil și se efectuează } \frac{\partial A}{\partial k_1} \text{ se obține: } \left. \frac{\partial A}{\partial k_1} \right|_{k_2=ct} = 2k_1 + k_2 - 1 \quad (1.20)$$

care anulată conduce la $k_1^* = \frac{1-k_2}{2}$, adică sarcina rămasă trebuie uniform repartizată pe

cele două faze. În aceste condiții expresia lui A devine $A(k_1^*) = A^*$, adică :

$$A^* = \frac{3k_2^2}{4} - \frac{k_2}{2} - \frac{1}{4} \quad (1.21)$$

Variația lui A^* și k_1^* în funcție de k_2 în fig.1.4 iar a lui k^* în funcție de k_1, k_2 și r_N/r se prezintă în fig.1.5.

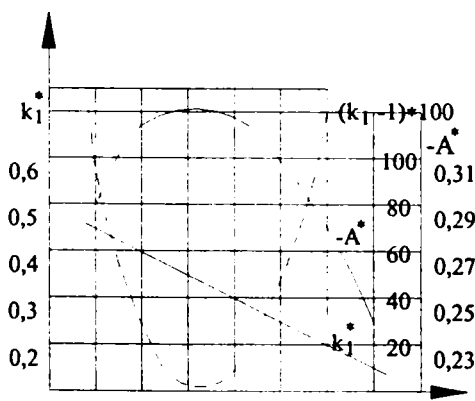


Fig. 1.4. Variația lui A^* și k_1 în funcție de k_2

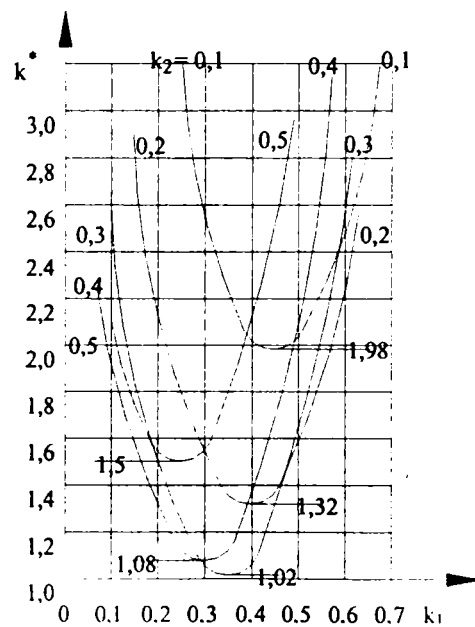


Fig.1.5. Variația lui $k^* = \Delta P / \Delta P_{min}$ în funcție de k_1, k_2 și r_N/r

O altă abordare are în vedere componentele de secvență. Astfel

$$\Delta P = 3(I_+^2 + I_-^2 + I_0^2)r + 9I_0^2 r_N \quad (1.22)$$

sau

$$\Delta P = 3r \left[I_+^2 + I_-^2 + I_0^2 \left(1 + \frac{3r_N}{r} \right) \right] \quad (1.23)$$

Obținerea valorii minime pentru ΔP înseamnă minimizarea expresiei

$$I_+^2 + I_-^2 + \left(I_0 \sqrt{1 + \frac{3r_N}{r}} \right)^2, \text{ adică a unei sume de pătrate, ceea ce conduce la minimizarea}$$

fiecărui termen în parte. De aici rezultă evident: $I^- = 0$ și $I^0 = 0$. Prin urmare sarcina trebuie să fie echilibrată, simetrică.

1.4. Mărimile caracteristice regimului nesimetric

Pentru a caracteriza mărimile nesimetrice într-un nod al sistemului electroenergetic se pot folosi următoarele mărimi [I3], [I4], [P3]:

a) Coeficientul de nesimetrie inversă (disimetrie):

$$K_{nsh} = K_{ns}^- = \frac{A_i}{A_d} = \frac{A^-}{A^+} \quad (1.24)$$

unde

A_i (A^-) este componenta de secvență inversă (negativă) a tensiunii sau a curentului.

A_d (A^+) – componenta de secvență directă (pozitivă) a tensiunii sau a curentului.

b) Coeficientul de nesimetrie homopolară (antisimetrie)

$$K_{nsh} = K_{ns}^0 = \frac{A_h}{A_d} = \frac{A^0}{A^+} \quad (1.25)$$

unde: A_h (A^0) este componenta de secvență homopolară (zero) a tensiunii sau a curentului.

c) coeficientul total de nesimetrie:

$$K_{ns} = K_{nsi} + K_{nsh} = K_{ns}^- + K_{ns}^0 \quad (1.26)$$

d) raportul de nesimetrie:

$$r_{ns} = A_{\min} / A_{\max} \quad (1.27)$$

unde: $A_{\min} = \min(A_R, A_S, A_T)$ iar $A_{\max} = \max(A_R, A_S, A_T)$

e) raportul diferențial de simetrie:

$$r_{dus} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{(A_{\max} + A_{\min})/2} = 2 \frac{1 - r_{ns}}{1 + r_{ns}} \quad (1.28)$$

Desigur, nu toate mărimile mai sus prezentate sunt normate. Astfel conform CEI 1000-2-2/90 valorile coeficientului de disimetrie al tensiunii este normat la valoarea de 2% pentru nivelul de joasă tensiune și 1% pentru înaltă tensiune [I4], [I1]. În nodul unui sistem în care se racordează și substația de cale ferată, coeficientul de disimetrie a tensiunii nu are voie să depășească valoarea de 2%.

Desigur, comentând coeficienții de nesimetrie definiți mai sus trebuie menționat că o parte din ei pot fi folosiți atunci când analiza regimului nesimetric se efectuează cu mărimi de fază (d, e), iar ceilalți când analiza se efectuează cu mărimi de secvență (a, b).

Dacă se are în vedere că pentru tensiunile de alimentare dezechilibrul nu este mare, uneori chiar neglijabil sub aspectul defazajelor media aritmetică a tensiunilor de fază reprezintă tocmai tensiunea de secvență directă. Ca urmare abaterea sau raportul dintre

valorile maximă și minimă a tensiunilor și valoarea medie este un indicator util al gradului de nesimetrie. Deci s-ar putea defini următoarele rapoarte de nesimetrie:

$$f) r_{\min} = \frac{\min(U_R, U_S, U_T)}{U_{med}}$$

$$g) r_{\max} = \frac{\max(U_R, U_S, U_T)}{U_{med}} \quad (1.29)$$

r_{\min} - raportul minim de nesimetrie

r_{\max} - raportul maxim de nesimetrie

Se poate constata foarte simplu că $r_{\min} / r_{\max} = r_{ns}$

În România, normativul PE 143/90 stabilește valorile limită admise pentru coeficientul de simetrie inversă la 2% pentru rețele de joasă și medie tensiune și 1,5% pentru rețelele de înaltă tensiune, cu precizarea că în nodul de sistem în care se racordează o substație de alimentare a tracțiunii feroviare, coeficientul de disimetrie poate fi de maxim 2%.

1.5. Circulația de puteri în rețelele trifazate cu consumatori dezechilibrați.

Așa cum s-a prezentat anterior, regimul nesimetric provocat de prezența unor consumatori dezechilibrați determină creșterea pierderilor de putere. Majorarea pierderilor în regim nesimetric poate fi pusă și pe seama circulației suplimentare de putere de secvență negativă și zero în rețeaua de alimentare. Teorema conservării puterilor complexe, active și reactive, permite evidențierea acestor circulații suplimentare [T5], [T6]. Astfel dacă se consideră un subsistem electric format dintr-un generator ideal (G) ce debitează printr-o rețea simetrică și liniară (R) asupra a doi consumatori, unul echilibrat (E) și celălalt dezechilibrat (D) (fig. 1.6), puterea debitată de generator și respectiv primită de rețea și absorbită de cei doi consumatori exprimate în componente simetrice, se poate scrie sub forma generală astfel:

$$\underline{S}_k = \underline{S}_k^+ + \underline{S}_k^- + \underline{S}_k^0 \quad \text{unde } k = G, R, E, D \quad (1.30)$$

Teoremele conservării puterilor aparente complexe conduc la următoarele relații de conservare:

$$\underline{S}_G = \underline{S}_R + \underline{S}_E + \underline{S}_D \quad \text{sau} \quad \underline{S}_{G\alpha} = \underline{S}_{R\alpha} + \underline{S}_{E\alpha} + \underline{S}_{D\alpha} \quad (1.31)$$

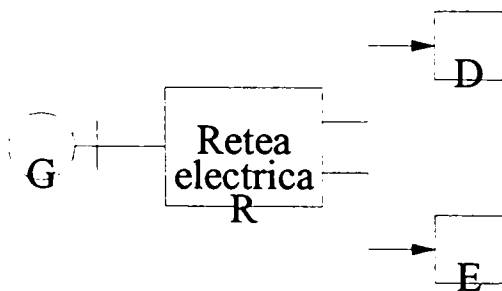


Fig. 1.6 Sistem electric reprezentare schematică

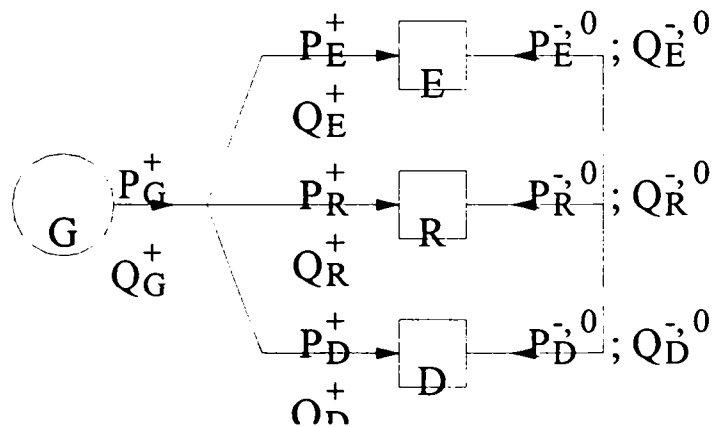


Fig. 1.7 Circulația puterilor de secvență în sistemul din fig. 1.6

Deoarece tensiunile electromotoare ale generatorului alcătuiesc un sistem trifazat simetric, de succesiune pozitivă, rezultă că acesta nu poate debita puteri decât pe secvență pozitivă, adică:

$$P_G = P_G^+; \quad P_G^- = 0; \quad P_G^0 = 0$$

$$Q_G = Q_G^+; \quad Q_G^- = 0; \quad Q_G^0 = 0 \quad (1.32)$$

Ecuațiile de bilanț pentru puterile active și reactive devin:

$$\begin{aligned} P_G^+ &= P_R^+ + P_E^+ + P_D^+; & P_R^- + P_E^- + P_D^- &= 0; & P_R^0 + P_E^0 + P_D^0 &= 0 \\ Q_G^+ &= Q_R^+ + Q_E^+ + Q_D^+; & Q_R^- + Q_D^- + Q_{Dh}^- &= 0; & Q_R^0 + Q_E^0 + Q_D^0 &= 0 \end{aligned} \quad (1.33)$$

Relațiile (1.33) arată că elementul care introduce nesimetria este consumatorul dezechilibrat. Ca urmare generatorul electric debitează puteri celor doi consumatori numai pe secvența pozitivă iar consumatorul dezechilibrat este acela care primește pe secvența pozitivă o putere mai mare decât îi este necesară, din care o parte se convertește în puteri de secvență negativă și zero, pe care le reinjectează în rețea și la consumatorul echilibrat, suplimentând astfel pierderile de putere (fig. 1.7)

În condițiile prezentate mai sus rețelele de secvență inversă și homopolară corespunzătoare unor rețele trifazate ce alimentează consumatori dezechilibrați nu mai sunt pasive, ci prezintă surse de curenți de secvență negativă și zero, acestea fiind tocmai consumatorii dezechilibrați. Dacă sursele ce alimentează rețeaua sunt ideale, cu tensiuni la borne simetrice, tensiunile de secvență negativă și zero la bornele consumatorilor dezechilibrați corespund tocmai căderilor de tensiune pe impedanțele de secvență respectiv a elementelor de rețea (linie, transformatoare, bobine, baterii de condensatoare).

Deci se pot scrie relațiile:

$$\begin{aligned} \underline{U}^- &= [\Delta \underline{U}^-] = [\underline{Z}^-] \cdot \underline{I}^- \\ \underline{U}^0 &= [\Delta \underline{U}^0] = [\underline{Z}^0] \cdot \underline{I}^0 \end{aligned} \quad (1.34)$$

unde $[\underline{U}^-]$, $[\underline{U}^0]$ sunt matricile coloană ale tensiunilor de secvență negativă și zero la bornele consumatorilor dezechilibrați;

$[\underline{Z}^-]$, $[\underline{Z}^0]$ – matricile impedanțelor de secvență inversă, respectiv homopolară ale rețelelor de secvență inversă, respectiv homopolară văzute la bornele consumatorilor dezechilibrați;

$[\underline{I}^-]$, $[\underline{I}^0]$ – matricile coloană ale curenților de secvență negativă, respectiv zero debitați de consumatorii dezechilibrați în rețea.

1.6. Metoda componentelor de secvență. Forma matricei de secvență.

Analiza regimului nesimetric este facilitată așa cum este cunoscut de folosirea metodei componentelor de secvență (componente Fortescue). Pe lângă aceste componente în anumite situații particulare se pot folosi componentele Clark, Kimbark sau Park [C19].

În cadrul aplicării metodei componentelor de secvență, rețeaua reală trifazată se descompune în trei rețele monofilare de secvență necuplate (inductiv sau capacitiv) între ele eventual legate galvanic și aceasta dependent de natura regimului nesimetric. În cazul scurtcircuitelor sau întreruperilor rețelele sunt legate între ele, în cazul unor consumatori dezechilibrați ele sunt nelegate.

Pentru a putea forma aceste rețele este necesar a cunoaște parametrii de secvență ai fiecărui element de rețea sau în general de sistem. Din acest motiv în cele ce urmează se va determina forma impedanțelor de secvență a unui element de rețea în componente simetrice cunoscându-se impedanțele de fază. Elementul de rețea se consideră liniar și de o formă generală cu și fără conductor neutru.

1.6.1. Element trifazat fără conductor neutru

Pentru elementul trifazat de sistem din fig. 1.8, referindu-se la comportarea longitudinală se pot scrie următoarele relații între tensiunile și curenții de fază [M15].

$$\begin{aligned}\underline{U}_R &= \underline{Z}_{RR} \cdot \underline{I}_R + \underline{Z}_{RS} \cdot \underline{I}_S + \underline{Z}_{RT} \cdot \underline{I}_T \\ \underline{U}_S &= \underline{Z}_{SR} \cdot \underline{I}_R + \underline{Z}_{SS} \cdot \underline{I}_S + \underline{Z}_{ST} \cdot \underline{I}_T \\ \underline{U}_T &= \underline{Z}_{TR} \cdot \underline{I}_R + \underline{Z}_{TS} \cdot \underline{I}_S + \underline{Z}_{TT} \cdot \underline{I}_T\end{aligned}\quad (1.35)$$

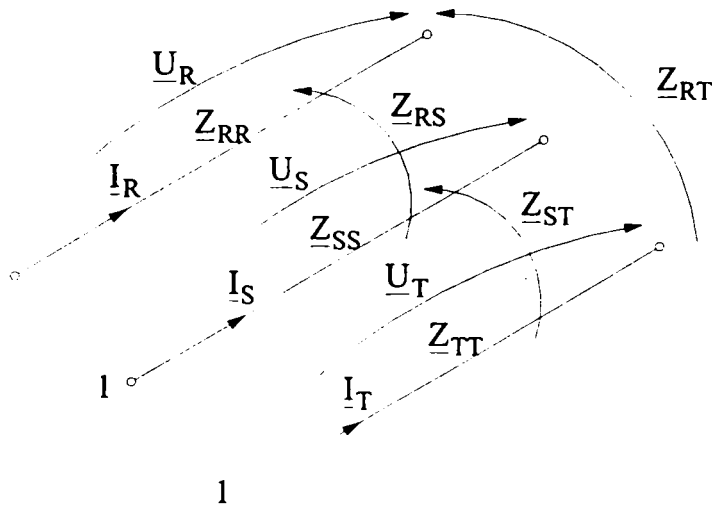


Fig. 1.8. Element de sistem trifazat fără conductor neutru

sau matricial

$$[\underline{U}_f] = [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{I}_f] \quad (1.36)$$

unde:

$$[\underline{U}_f] = \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix}, \quad [\underline{I}_f] = \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix}, \quad [\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RT} \\ \underline{Z}_{SR} & \underline{Z}_{SS} & \underline{Z}_{ST} \\ \underline{Z}_{TR} & \underline{Z}_{TS} & \underline{Z}_{TT} \end{bmatrix}, \quad (1.37)$$

Transformarea mărimilor, curenți sau tensiuni din sistemul mărimilor de fază în sistemul componentelor de secvență se efectuează aplicând relațiile de transformare:

$$[\underline{U}_{Scv}] = [\underline{T}_U] \cdot [\underline{U}_f] \quad \text{și respectiv} \quad [\underline{I}_{Scv}] = [\underline{T}_I] \cdot [\underline{I}_f] \quad (1.38)$$

unde :

$$[\underline{T}_U] = [\underline{T}_I] = [\underline{T}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.39)$$

$$\text{a fiind operatorul complex } a = \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.40)$$

Pentru mărimile de secvență se poate scrie o relație similară cu (1.36) adică

$$[\underline{U}_{Scv}] = [\underline{Z}_{Scv}] \cdot [\underline{I}_{Scv}] \quad (1.41)$$

unde $[\underline{Z}_{Scv}]$ este matricea impedanțelor de secvență. În general aceasta are forma:

$$[\underline{Z}_{Scv}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}^{++} & \underline{Z}^{+-} & \underline{Z}^{+0} \\ \underline{Z}^{-+} & \underline{Z}^{--} & \underline{Z}^{-0} \\ \underline{Z}^{0+} & \underline{Z}^{0-} & \underline{Z}^{00} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

dar așa cum s-a menționat pentru utilitatea aplicării metodei componentelor de secvență se dorește a fi o matrice diagonală. Dacă se au în vedere relațiile (1.36), (1.38), (1.41) pentru matricea impedanțelor de secvență rezultă expresia:

$$[\underline{Z}_{Scv}] = [\underline{T}_U] \cdot [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{T}_I]^{-1} \quad (1.43)$$

sau dacă se au în vedere relațiile (1.38) relația (1.36) devine:

$$[\underline{Z}_{Scv}] = [\underline{T}] \cdot [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{T}]^{-1} \quad (1.44)$$

Matricea $[\underline{Z}_{Scv}]$ primește forme particulare dacă se are în vedere că elementele rețelei (sistemului) dispun de o anumită simetrie. Astfel pentru elementele de rețea se poate accepta cu o anumită eroare că aceasta prezintă o simetrie totală, ce se caracterizează prin egalitatea impedanțelor proprii și a celor mutuale indiferent de sensul de parcurgere a fazelor [B2], [S2].

Cu aceasta matricea impedanțelor de secvență devine:

$$[\underline{Z}_{Scv}] = \frac{1}{3^2} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^{++} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^- & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^{00} \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

Dacă se dispune de o simetrie ciclică caracterizată prin egalitatea impedanțelor proprii $\underline{Z}_{RR} = \underline{Z}_{SS} = \underline{Z}_{TT} = \underline{Z}$, a impedanțelor mutuale luate în sens direct $\underline{Z}_{RS} = \underline{Z}_{ST} = \underline{Z}_{TR} = \underline{Z}'$ și a impedanțelor mutuale luate în sens contrar $\underline{Z}_{SR} = \underline{Z}_{TS} = \underline{Z}_{RT} = \underline{Z}''$ [B2], [S2] matricea impedanțelor de fază are forma:

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}' & \underline{Z} & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

iar a impedanțelor de secvență:

$$[\underline{Z}_{Scv}] = \begin{bmatrix} \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}'' & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}'' & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' \end{bmatrix} \quad (1.47)$$

Deci impedanțele de secvență au expresiile:

$$\underline{Z}^{++} = \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}''; \quad \underline{Z}^- = \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}''; \quad \underline{Z}^{00} = \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' \quad (1.48)$$

1.6.2 Element trifazat cu conductor neutru

Pentru elementul trifazat cu conductor neutru din fig. 1.9. se pot scrie următoarele relații între căderile de tensiune și curenți:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_f \\ \Delta \underline{U}_n \end{bmatrix} = [\underline{Z}_f] \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_f \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

unde:

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RT} & \underline{Z}_{Rn} \\ \underline{Z}_{SR} & \underline{Z}_{SS} & \underline{Z}_{ST} & \underline{Z}_{Sn} \\ \underline{Z}_{TR} & \underline{Z}_{TS} & \underline{Z}_{TT} & \underline{Z}_{Tn} \\ \underline{Z}_{nR} & \underline{Z}_{nS} & \underline{Z}_{nT} & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

unde:

\underline{Z}_{ii} ($i = 1, 2, 3$) sunt impedanțele proprii ale fazei i ,

\underline{Z}_{nn} – impedanța proprie a conductorului neutru,

\underline{Z}_{ij} ($i \neq j$) – impedanța mutuală dintre conductoarele i și j ,

\underline{Z}_{in} – impedanța mutuală dintre conductorul de fază i și conductorul neutru "n"

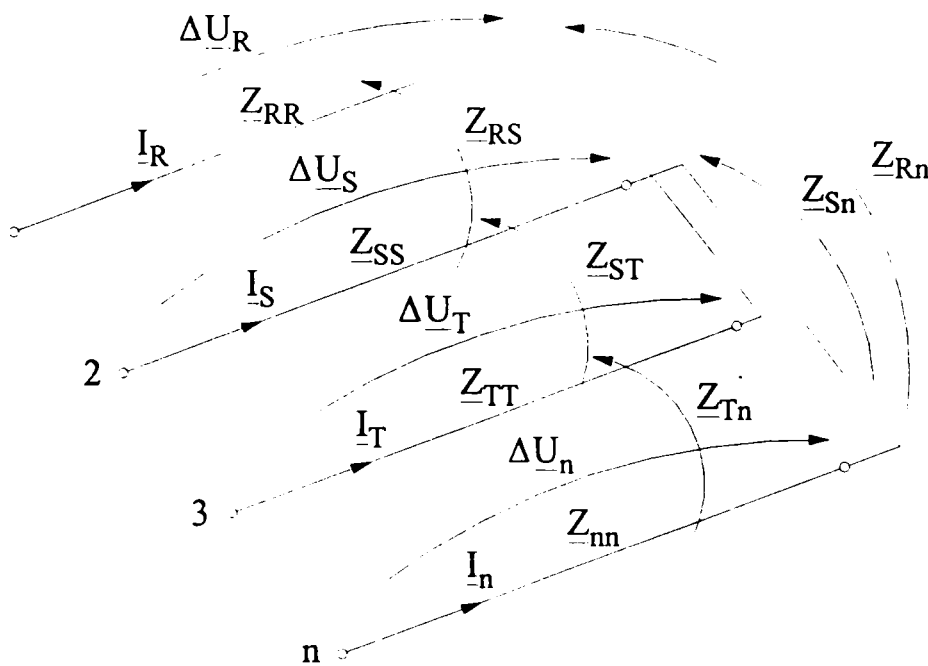


Fig. 1.9. Element trifazat cu conductor neutru

Dacă tensiunile aplicate celor trei faze în raport cu conductorul neutru sunt \underline{U}_R , \underline{U}_S , \underline{U}_T scăzând ultima linie a sistemului (1.36) din primele 3 și ținând cont că:

$$\underline{I}_N = -(\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) \quad (1.51)$$

se obține sistemul (1.51), unde $[\underline{Z}_f]$ se obține din rel.(1.50), renunțând la ultima linie și ultima coloană, adică :

$$[\underline{U}_f] = [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{I}_f] \quad (1.52)$$

în care

$$[\underline{U}_f] = \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_R - \Delta \underline{U}_n \\ \Delta \underline{U}_S - \Delta \underline{U}_n \\ \Delta \underline{U}_T - \Delta \underline{U}_n \end{bmatrix} \quad (1.53)$$

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} - \underline{Z}_{Rn} - (\underline{Z}_{Rn} - \underline{Z}_{nn}) & \underline{Z}_{RS} - \underline{Z}_{Rn} - (\underline{Z}_{Sn} - \underline{Z}_{nn}) & \underline{Z}_{RT} - \underline{Z}_{Rn} - (\underline{Z}_{Tn} - \underline{Z}_{nn}) \\ \underline{Z}_{RS} - \underline{Z}_{Sn} - (\underline{Z}_{Rn} - \underline{Z}_{nn}) & \underline{Z}_{SS} - \underline{Z}_{Sn} - (\underline{Z}_{Sn} - \underline{Z}_{nn}) & \underline{Z}_{ST} - \underline{Z}_{Rn} - (\underline{Z}_{Tn} - \underline{Z}_{nn}) \\ \underline{Z}_{RT} - \underline{Z}_{Tn} - (\underline{Z}_{Rn} - \underline{Z}_{nn}) & \underline{Z}_{ST} - \underline{Z}_{Tn} - (\underline{Z}_{Sn} - \underline{Z}_{nn}) & \underline{Z}_{TT} - \underline{Z}_{Rn} - (\underline{Z}_{Tn} - \underline{Z}_{nn}) \end{bmatrix} \quad (1.54)$$

Aplicând matricei (1.54) o transformată de tipul celei (1.45) se obține matricea impedanțelor de secvență a cărei elemente au semnificația următoare:

$$\begin{aligned} \underline{Z}^{+0} &= \underline{Z}_p^0 - \underline{Z}_m^0 & \underline{Z}^{-0} &= \underline{Z}_p^+ - \underline{Z}_m^0 \\ \underline{Z}^{++} &= \underline{Z}_p^+ + 2\underline{Z}_m^+ & \underline{Z}^{-+} &= \underline{Z}_p^+ - \underline{Z}_m^+ - 3\underline{Z}_{mn}^+ \\ \underline{Z}^{+-} &= \underline{Z}_p^- - \underline{Z}_m^- - 3\underline{Z}_{mm}^- & \underline{Z}^{0+} &= \underline{Z}_p^+ - \underline{Z}_m^+ - 3\underline{Z}_{mn}^+ \\ \underline{Z}^{--} &= \underline{Z}_p^- + 2\underline{Z}_m^- & \underline{Z}^{0-} &= \underline{Z}_p^- - \underline{Z}_m^- - 3\underline{Z}_{mn}^- \\ \underline{Z}^{00} &= \underline{Z}_p^0 + 2(\underline{Z}_m^0 - 3\underline{Z}_{mn}^0) + 3\underline{Z}_{nn} \end{aligned} \quad (1.55)$$

unde \underline{Z}_p^0 , \underline{Z}_p^+ , \underline{Z}_p^- sunt „componentele simetrice” ale impedanțelor proprii;

iar \underline{Z}_m^+ , \underline{Z}_m^- , \underline{Z}_m^0 sunt „componentele simetrice” ale impedanțelor mutuale dintre faze, adică:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_m^+ \\ \underline{Z}_m^- \\ \underline{Z}_m^0 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} - \underline{Z}_{Rn} - (\underline{Z}_{Rn} - \underline{Z}_{nn}) \\ \underline{Z}_{SS} - \underline{Z}_{Sn} - (\underline{Z}_{Sn} - \underline{Z}_{nn}) \\ \underline{Z}_{TT} - \underline{Z}_{Tn} - (\underline{Z}_{Tn} - \underline{Z}_{nn}) \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

și \underline{Z}_{mn}^+ , \underline{Z}_{mn}^- , \underline{Z}_{mn}^0 sunt componentele simetrice ale impedanțelor mutuale dintre faze și neutru, adică:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_{mn}^+ \\ \underline{Z}_{mn}^- \\ \underline{Z}_{mn}^0 \end{bmatrix} = [\underline{T}] \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Rn} \\ \underline{Z}_{Sn} \\ \underline{Z}_{Tn} \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

Analizând relațiile (1.55) se constată că impedanțele care au aceeași indici dar sunt plasate în locuri diferite nu sunt egale, adică:

$$\underline{Z}^{0+} \neq \underline{Z}^{+0}; \quad \underline{Z}^{+-} \neq \underline{Z}^{-+}; \quad \underline{Z}^{0-} \neq \underline{Z}^{-0} \quad (1.58)$$

În schimb se constată următoarele egalități:

$$\underline{Z}^{0-} = \underline{Z}^{+-}; \quad \underline{Z}^{0+} = \underline{Z}^{-+}; \quad \underline{Z}^{+0} = \underline{Z}^{-0} \quad (1.59)$$

Dacă elementele de rețea considerate prezintă o simetrie totală, impedanțele proprii, mutuale dintre faze și conductorul neutru sunt egale iar impedanțele de secvență pozitivă și negativă ale acestora sunt nule. În aceste condiții matricea impedanțelor de secvență primește forma:

$$[\underline{Z}_{scv}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_p^0 - \underline{Z}_m^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_p^0 - \underline{Z}_m^0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_p^0 + 2(\underline{Z}_m^0 - 3\underline{Z}_{mn}^0) + 3\underline{Z}_{mn}^0 \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

Mai mult impedanța de secvență pozitivă și negativă sunt egale între ele și egale cu forma corespunzătoare situației în care nu există conductor neutru, deoarece $\underline{Z}_{ph} = \underline{Z}$ iar $\underline{Z}_{mh} = \underline{Z}'$. Impedanța care se modifică însă este impedanța de secvență 0, ei i se adaugă doi termeni, unul corespunde impedanței proprii conductorului neutru și altul impedanței mutuale dintre faze și conductorul neutru luat cu semn schimbat.

Dacă elementul din fig. 1.9 prezintă simetrie ciclică, ecuațiile (1.49) devin:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_f \\ \Delta \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_f] & [\underline{Z}'_n] \\ [\underline{Z}'_n] & \underline{Z}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_f \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

Renunțând la ultima linie și scăzând din celelalte trei, după ce se are în vedere faptul că $[\underline{U}_f] = [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{I}_f]$ se obține pentru matricea $[\underline{Z}_f]$ expresia:

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z} - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n & \underline{Z}' - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n & \underline{Z}'' - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n \\ \underline{Z}' - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n & \underline{Z} - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n & \underline{Z}' - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n \\ \underline{Z}' - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n & \underline{Z}' - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n & \underline{Z} - 2\underline{Z}'_n + \underline{Z}_n \end{bmatrix} \quad (1.62)$$

În relațiile (1.61) și (1.62) \underline{Z}'_n este impedanța mutuală dintre conductoarele de fază și conductorul neutru și se consideră de aceeași valoare pentru toate fazele iar \underline{Z}_n este impedanța proprie a conductorului neutru.

Aplicând transformata (1.53) pentru matricea impedanțelor de secvență ce obține expresia:

$$[\underline{Z}_{scv}] = \begin{bmatrix} \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}'' & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}'' & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' - 3(\underline{Z}'_n - \underline{Z}_n) \end{bmatrix} \quad (1.63)$$

Se constată că și în această situație impedanțele de secvență pozitivă și negativă nu și-au schimbat forma, doar impedanța de secvență 0 are o expresie modificată față de aceea de la elementul fără conductor neutru.

1.6.3. Elementul trifazat (linie electrică aeriană) cu conductor de gardă legat la pământ.

Pentru elementul trifazat cu conductor de gardă legat la pământ la cele două capete și prezentat în fig. 1.10 se pot scrie următoarele relații:

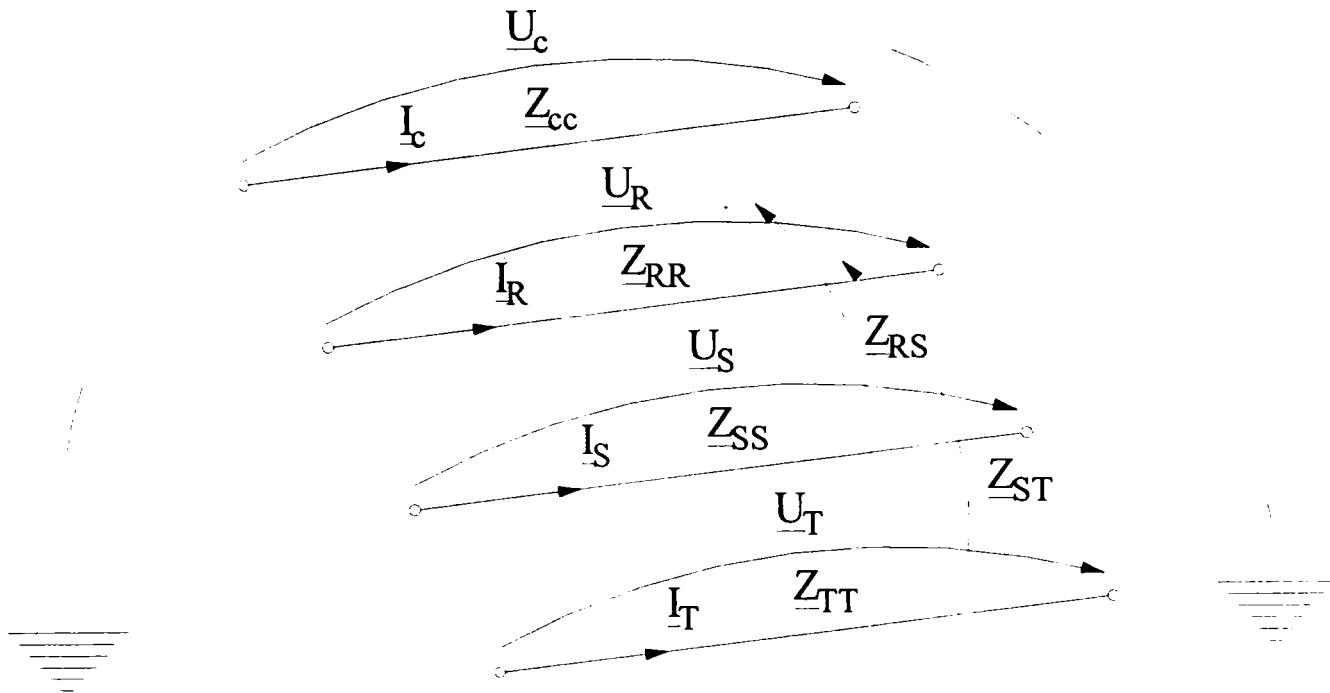


Fig. 1.10. Element de sistem trifazat cu conductor de protecție legat la pământ.

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_f \\ \Delta \underline{U}_c \end{bmatrix} = [\underline{Z}_f] \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_f \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} \quad (1.64)$$

unde matricea impedanțelor de fază $[\underline{Z}_f]$ are forma:

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RT} & \underline{Z}_{Rc} \\ \underline{Z}_{SR} & \underline{Z}_{SS} & \underline{Z}_{ST} & \underline{Z}_{Sc} \\ \underline{Z}_{TR} & \underline{Z}_{TS} & \underline{Z}_{TT} & \underline{Z}_{Tc} \\ \underline{Z}_{cR} & \underline{Z}_{cS} & \underline{Z}_{cT} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (1.65)$$

unde: \underline{Z}_{cc} este impedanța proprie de fază a conductorului de protecție,

$\underline{Z}_{ci} (i = 1, 2, 3)$ – impedanțele mutuale dintre conductoarele de fază și conductorul de protecție.

Dacă admitem o simetrie ciclică pentru conductoarele de fază și totală în raport cu conductorul de protecție [B2], matricea (1.65) primește forma:

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z}'_c \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'_c \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}'_c \\ \underline{Z}'_c & \underline{Z}'_c & \underline{Z}'_c & \underline{Z}'_c \end{bmatrix} \quad (1.66)$$

Dacă se are în vedere că tensiunea conductorului de protecție este nulă, din ultima linie a sistemului (1.64) se deduce expresia curentului prin conductorul de protecție, adică:

$$\underline{I}_c = -\frac{\underline{Z}'_c}{\underline{Z}'_c} \cdot (\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) \quad (1.67)$$

Cu aceasta, renunțând la ultima linie și coloană din expresia matricei $[\underline{Z}_f]$, aceasta devine:

629. 807 / 369 A

$$[\underline{Z}_f] = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix} - \frac{\underline{Z}_c^2}{\underline{Z}_c} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.68)$$

iar în componente de secvență:

$$[\underline{Z}_{scv}] = \begin{bmatrix} \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}'' & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}'' & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' - 3\underline{Z}_c^2 / \underline{Z}_c \end{bmatrix} \quad (1.69)$$

Se constată și de această dată că prezența conductorului suplimentar legat la pământ modifică numai forma impedanței de secvență 0.

1.6.4. Determinarea impedanțelor de secvență.

Din cele prezentate rezultă că expresia impedanțelor de secvență, deci și valorile lor sunt dependente de configurația geometrică a elementului de rețea. Situația este valabilă mai ales în cazul impedanței de secvență 0. Prin urmare, pentru analiza regimului nesimetric o atenție deosebită trebuie acordată estimării acestor impedanțe de secvență.

Impedanțele de secvență pot fi determinate prin calcule sau experimental. În cazul când se apelează la calcule trebuie cunoscute modelele (schemele echivalente) elementelor de rețea față de diferite secvențe. Indiferent de modul de estimare fundamentale rămân relațiile (1.35) care exprimă dependența dintre tensiunile și curenții de fază. Aceste relații pot corespunde atât comportării longitudinale cât și transversale a elementului de rețea.

Pentru determinarea impedanțelor proprii și mutuale se apelează la regimuri incomplete pe o singură fază. Astfel [B2], [M15];

$$\underline{Z}_{RR} = \underline{Z} = \left(\frac{U_R}{I_R} \right) \text{ pentru } \underline{I}_S = \underline{I}_T = 0; \quad \underline{Z}_{TR} = \underline{Z}' = \left(\frac{U_T}{I_R} \right) \text{ pentru } \underline{I}_S = \underline{I}_T = 0$$

$$\underline{Z}_{SR} = \underline{Z}'' = \left(\frac{U_S}{I_R} \right) \text{ pentru } \underline{I}_S = \underline{I}_T = 0 \quad (1.70)$$

$$\text{iar } \underline{Z}^+ = \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}''; \quad \underline{Z}^- = \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}''; \quad \underline{Z}^0 = \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' \quad (1.71)$$

Desigur similar se pot defini și impedanțele transversale, doar că în acest caz pentru a elimina elementul (impedanța) longitudinal se va considera un regim de mers în gol pe o singură fază, celelalte două nefiind alimentate.

În cazul rețelelor mixte curent alternativ-curent continuu, de mare utilitate sunt modelele trifazate pentru elementele de rețea [C19], [M15], în acest caz calculele de circulație a curenților și tensiunilor efectuându-se distinct pe fiecare fază.

O situație particulară comportă schema echivalentă homopolară, aceasta datorită caracterului sinfazic al curenților care parcurg elementul de rețea. Propagarea curenților de secvență 0 este afectată vizibil de conexiunea înfășurărilor [C19], [A10], Astfel conexiunile Y_0/d , Z_0/d , y scurtcircuitează curenții de secvență 0. Conexiunea Y_0/y îi întrerup iar Y_0/y_0 îi transmit în măsura în care în rețeaua secundară mai există un neutru legat la pământ.

O clasificare a metodelor analitice de estimare a impedanțelor de secvență se prezintă în fig. 1.11, considerându-se diferite criterii.

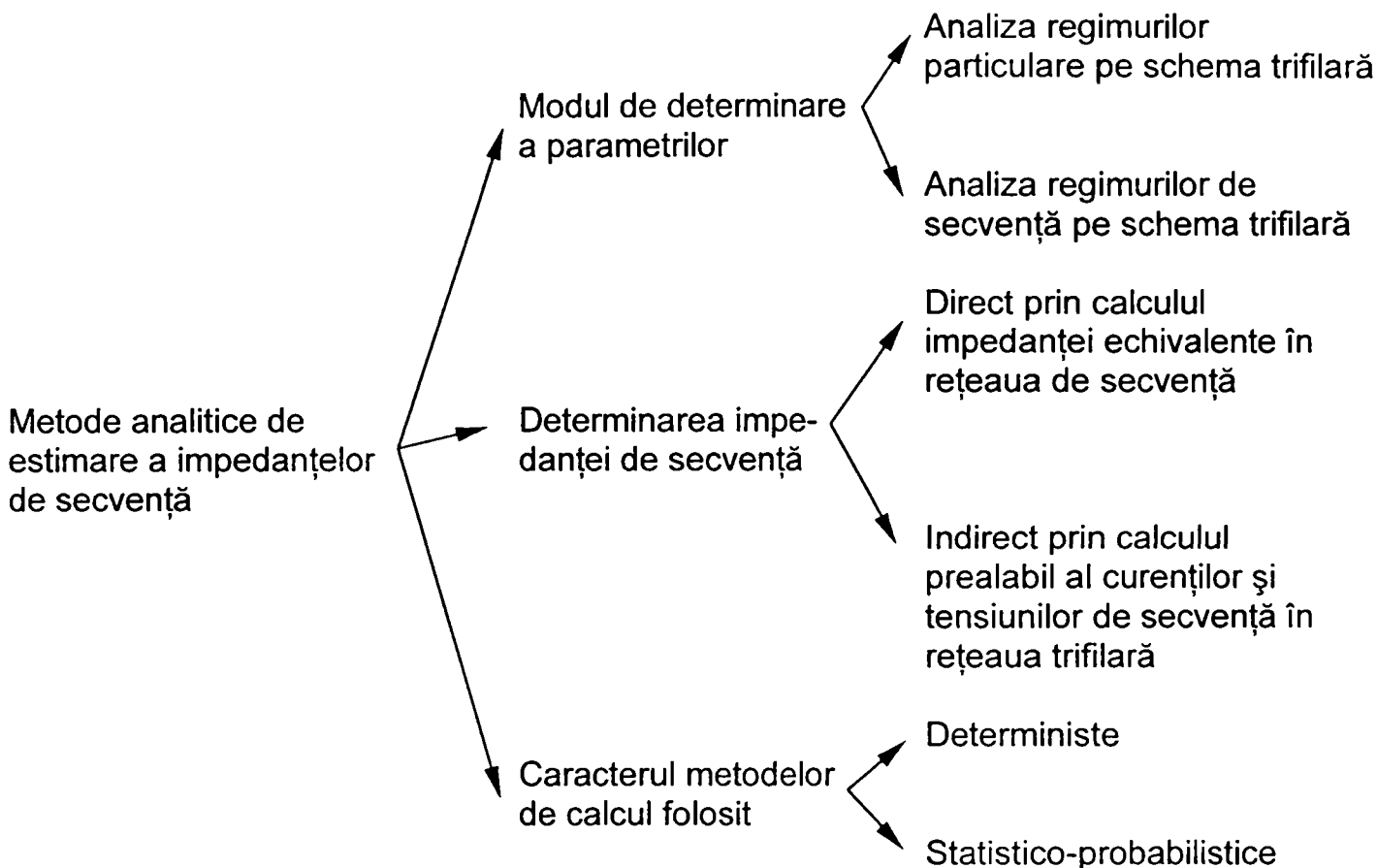


Fig. 1.11 Clasificarea metodelor analitice de estimare a impedanțelor de secvență

Desigur o atenție deosebită trebuie acordată și determinării experimentale a impedanțelor de secvență mai ales atunci când regimul nesimetric se suprapune peste cel nesinusoidal (situația cea mai des întâlnită). Dacă aceasta nu ridică probleme atunci când elementul de rețea are neutrul accesibil și când se dispune de surse de alimentare monofazate și trifazate, nu același lucru se întâmplă când elementul nu are neutrul accesibil și când se dispune numai de surse monofazate. În aceste condiții în literatură [M15] se indică soluții de estimare a impedanței de secvență pozitivă. Acestea pot fi extinse însă ca procedură și la secvența negativă fără dificultăți.

Astfel, dacă se consideră elementul de rețea cu simetrie totală din fig. 1.12 având accesibile bornele R, S, T respectiv R', S', T' și se scurcucuitează bornele de la sfârșit (R', S', T') iar între bornele R și S se conectează o sursă de tensiune sinusoidală, borna T fiind în gol, se poate scrie:

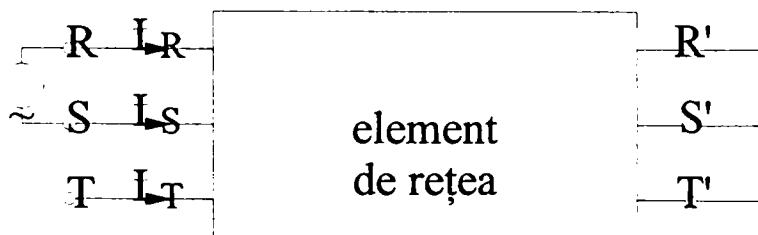


Fig. 1.12 Element de rețea cu simetrie totală fără neutrul accesibil – determinarea impedanței $\underline{Z}^+, \underline{Z}^-$

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= \underline{Z} \cdot \underline{I}_R + \underline{Z}' \cdot \underline{I}_S \\ \underline{U}_S &= \underline{Z}' \cdot \underline{I}_R + \underline{Z} \cdot \underline{I}_S \end{aligned} \quad (1.72)$$

sau dacă se are în vedere că $\underline{I}_S = -\underline{I}_R$

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= \underline{Z} \cdot \underline{I}_R - \underline{Z}' \cdot \underline{I}_R \\ \underline{U}_S &= \underline{Z}' \cdot \underline{I}_R - \underline{Z} \cdot \underline{I}_R \end{aligned} \quad \text{iar} \quad \underline{U}_R - \underline{U}_S = \underline{U}_{RS} = 2\underline{I}_R (\underline{Z} - \underline{Z}')$$

$$\text{deci : } \underline{Z}^+ = \underline{Z}^- = \frac{U_{RS}}{2I_{\underline{R}}} \quad (1.73)$$

Dacă se consideră un element cu simetrie ciclică (fig. 1.13) se imaginează un alt experiment și anume a) sursa se montează între borna 1 și puntea făcută între bornele 2 și 3, bornele de sfârșit fiind în scurtcircuit și b) sursa se montează între borna 2 și puntea comună făcută între bornele 1 și 3.

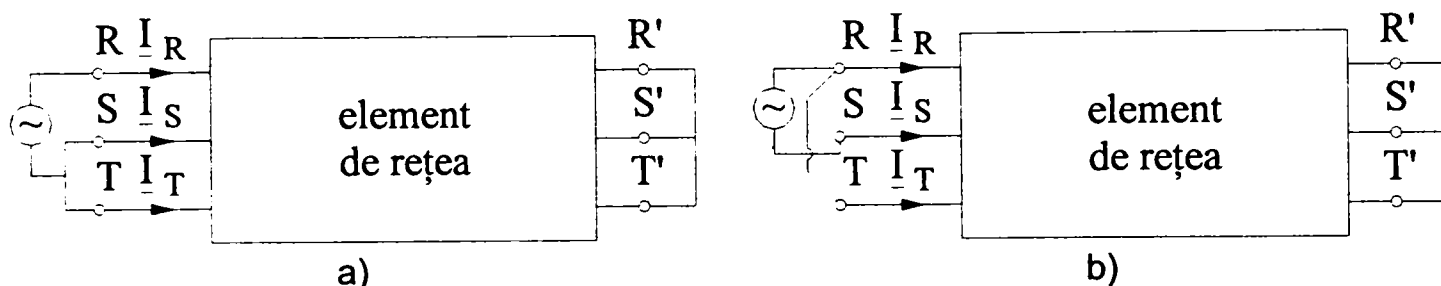


Fig. 1.13 Element de rețea cu simetrie ciclică fără neutru accesibil
– determinarea impedanței Z^+ , Z^- : a) alimentare R–(S, T); b) alimentare S–(R, T)

Pentru situația din fig.1.13.a) considerând că $\underline{I}_S \cong \underline{I}_T = -\frac{\underline{I}_R}{2}$ se poate scrie:

$$\underline{U}_R = \underline{I}_R \cdot \underline{Z} - \frac{\underline{I}_R}{2} \underline{Z}' - \frac{\underline{I}_R}{2} \underline{Z}'' \quad (1.74)$$

$$\underline{U}_S = \underline{I}_R \cdot \underline{Z}'' - \frac{\underline{I}_R}{2} \underline{Z} - \frac{\underline{I}_R}{2} \underline{Z}'$$

de unde :

$$\underline{U}_{RS} = \frac{3}{2} \underline{I}(\underline{Z} - \underline{Z}'') \text{ iar } \underline{Z} - \underline{Z}'' = \frac{2}{3} \frac{\underline{U}_{RS}^a}{\underline{I}_R^a} \quad (1.75)$$

Repetând experimentul pentru situația b) se obține:

$$\underline{Z} - \underline{Z}' = \frac{2}{3} \frac{\underline{U}_{SR}^b}{\underline{I}_S^b} \quad (1.76)$$

Înmulțind relațiile (1.75) cu $-a$, (1.76) cu $-a^2$ și însumându-le se obține tocmai impedanța de secvență directă \underline{Z}^+ și cu $-a^2$ (1.75) și (1.76) cu $-a$ se obține \underline{Z}^- , adică:

$$\underline{Z}^+ = -a(\underline{Z} - \underline{Z}'') - a^2(\underline{Z} - \underline{Z}') = \frac{2}{3} \left[-a \frac{\underline{U}_{RS}^a}{\underline{I}_R^a} - a^2 \frac{\underline{U}_{SR}^b}{\underline{I}_S^b} \right] \quad (1.77)$$

$$\underline{Z}^- = -a^2(\underline{Z} - \underline{Z}') - a(\underline{Z} - \underline{Z}'') = \frac{2}{3} \left[-a^2 \frac{\underline{U}_{RS}^a}{\underline{I}_R^a} - a \frac{\underline{U}_{SR}^b}{\underline{I}_S^b} \right]$$

Desigur determinarea fazorilor \underline{U}_{RS} , \underline{I}_R , \underline{I}_S se realizează cu sisteme digitale de măsură.

1.7. Propagarea regimului nesimetric. Calculul circulației de curenți și puteri de secvență.

1.7.1. Considerații generale

Propagarea regimului nesimetric poate fi efectuată analitic prin calcule sau experimental pe modele sau în rețeaua reală. În cazul când se apelează la calculul analitic se poate folosi schema trifazată, adică parametrii de fază sau schemele monofazate, de secvență. Aceasta asigură multă comoditate atât sub aspectul cunoașterii parametrilor de rețea, cât și a tehnicii de calcul. Prezența unui consumator dezechilibrat se manifestă prin aceea că schemele (rețelele) de secvență negativă și zero nu sunt pasive, ci active,

dispunând de surse de curent invers respectiv homopolar care debitează peste elementele de rețea, surse de curent alternativ și consumatori liniari. Cu alte cuvinte cunoscând tensiunile și curenții de fază la bornele consumatorilor dezechilibrați se pot estima componentele de secvență, tensiuni și curenți, iar curentul de secvență directă (din rețeaua de secvență directă) va fi absorbit de consumatorul dezechilibrat, iar cel de secvență inversă și homopolară debitați. Cu aceste cunoștințe se poate efectua calculul circulației de curenți și puteri de secvență în cele trei rețele determinându-se astfel tensiunile, curenții și puterile în toate nodurile rețelelor de secvență. Schematic cele descrise pot fi prezentate în fig. 1.14.

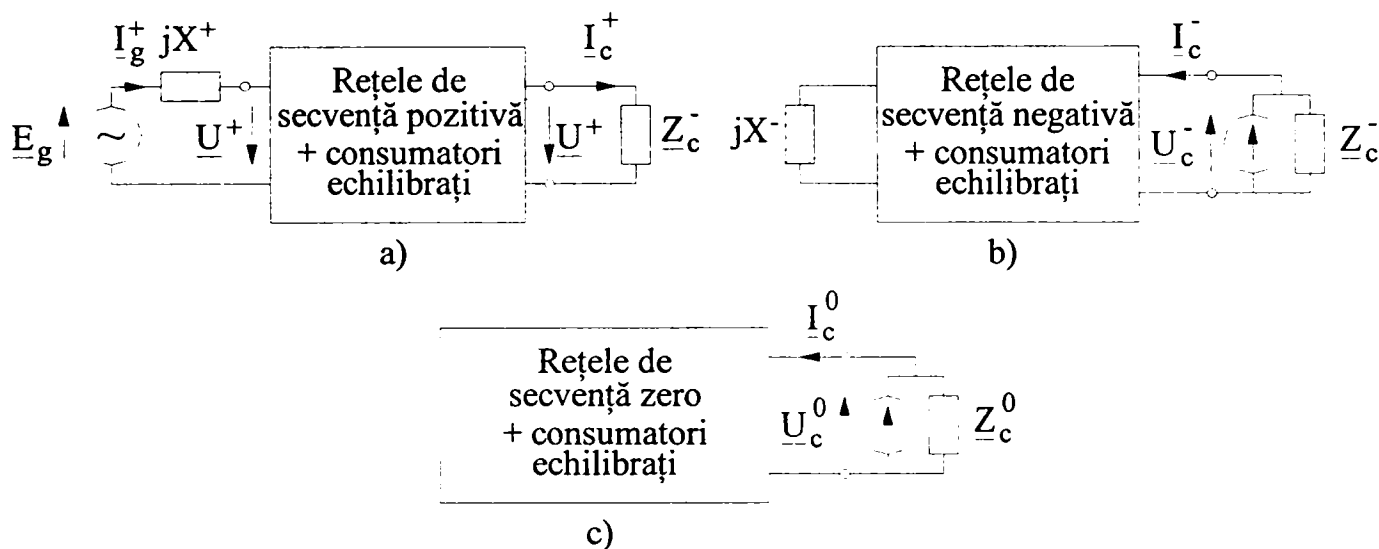


Fig. 1.14 Circulația curenților în rețelele de secvență:
a) pozitivă, b) negativă, c) zero

Cunoscându-se componentele de secvență, mărimile de fază se determină cu relațiile: $[A_f] = [T]^{-1} \cdot [A_s]$, unde A poate fi U sau I .

Desigur pe lângă metoda (generală) prezentată există și alte tehnici care asimilează consumatorii dezechilibrați particulari (alimentați între două faze, sau între o fază și nul) ca și consumatorii simetrici ce prezintă o fază sau două faze întrerupte [A9], [A10]. Astfel unui consumator alimentat între fazele S și T ale unei rețele (fig. 1.15a) i se atribuie transversal două rețele înseriate [A10] una simetrică și alta nesimetrică, cu o fază întreruptă (fig. 1.15b)

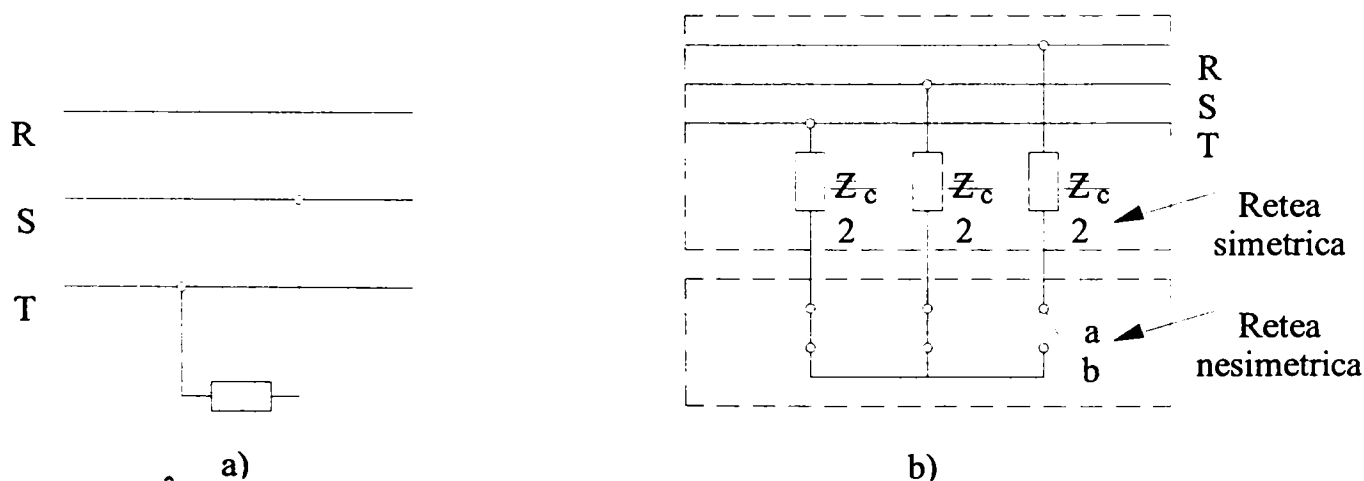


Fig. 1.15 Înlocuirea schemei echivalente a unui consumator dezechilibrat, alimentat între două faze cu două rețele una simetrică și alta nesimetrică:
a) schema electrică inițială, b) schema electrică rezultantă.

Pentru rețeaua nesimetrică se scriu relațiile dintre mărimile de fază:

$$\underline{I}_R = \underline{I}^+ + \underline{I}^- + \underline{I}^0 = 0$$

$$\underline{I}_S = \underline{I}_T \text{ rezultă } \underline{I}^0 + a\underline{I}^+ + a^2\underline{I}^- = \underline{I}^0 + a^2\underline{I}^+ + a\underline{I}^- \quad (1.78)$$

de unde $\underline{I}^+ = -\underline{I}^-$ iar $\underline{I}^0 = 0$. Deci rețelele de secvență pozitivă și negativă sunt înseriate (fig. 1.16), \underline{Z}^0 și \underline{Z}^- sunt impedanțele rețelelor de secvență directă și respectiv inversă văzute la bornele nesimetriei (a - b).

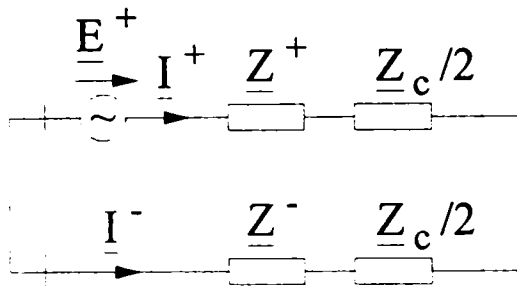


Fig. 1.16 Schema electrică echivalentă de calcul a curentului de secvență pozitivă.

Ca urmare expresia curentului \underline{I}^+ este:

$$\underline{I}^+ = \frac{\underline{E}^+}{\underline{Z}^+ + \underline{Z}^- + \underline{Z}_c} \quad (1.79)$$

În mod similar se poate aborda și problema unui consumator alimentat între o fază și neutru în rețelele cu patru conductoare.

1.7.2. Alimentarea unui consumator dezechilibrat printr-o linie scurtă.

Se consideră rețeaua din fig. 1.17 ce alimentează de la sistemul S consumatorul dezechilibrat CD. Corespunzător în fig. 1.18 sunt prezentate schemele de secvență directă și inversă ale rețelei. Schema de secvență zero nu poate fi luată în considerare, deoarece transformatorul de alimentare prezintă conexiunea Y_0/d , adică d (triunghi) pe partea unde apare regimul homopolar, deci $\underline{Z}^0 = \infty$, iar $\underline{I}^0 = 0$.

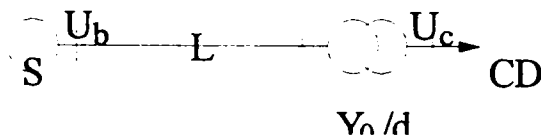


Fig. 1.17 Schema monofilară simplificată a unei rețele ce alimentează un consumator dezechilibrat

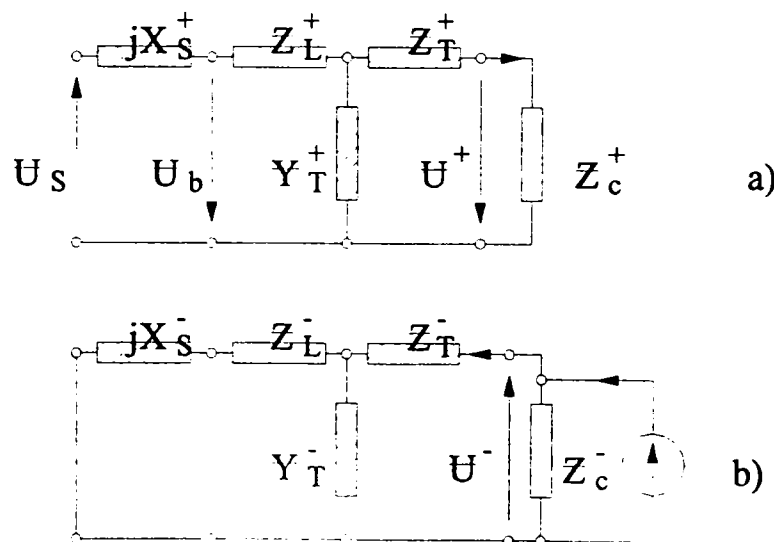


Fig. 1.18. Scheme echivalente ale rețelei din fig. 1.17; a) secvența pozitivă, b) secvență negativă

Dacă ne referim la tensiunea la bornele consumatorului, pentru faza R se poate scrie:

$\underline{U}_C = \underline{U}^+ + \underline{U}^-$ unde:

$$\underline{U}^+ = \underline{I}^+ \cdot \underline{Z}_C^+ = \underline{U}_S + \underline{I}^+ \cdot \left[1 + (\underline{Z}_T^+ + \underline{Z}_C^+) \cdot \underline{Y}_T^+ \right] \cdot [jX_S^+ + \underline{Z}_L^+] - \underline{I}^+ \cdot \underline{Z}_T^+$$

$$\underline{U}^- = \underline{I}^- \cdot \left\{ \underline{Z}_T^+ + 1 / \left[1 + \underline{Y}_T^+ + 1 / (jX_S^- + \underline{Z}_L^-) \right] \right\}$$

Coeficientul de nesimetrie negativă a tensiunii la bornele consumatorului are expresia:

$$\underline{k}_{nSU}^- = \frac{\underline{U}^-}{\underline{U}^+} = \underline{k}_{nSI}^- \cdot \left[\frac{\underline{Z}_T^-}{\underline{Z}_C^+} + \frac{1}{\underline{Z}_C^+ \cdot \underline{Y}_T^- + \underline{Z}_C^+ / (jX_S^- + \underline{Z}_L^-)} \right] \quad (1.80)$$

sau $\underline{k}_{nSU}^- = \underline{k}_{nSI}^- \cdot \underline{k}_{nSZ}^-$ unde \underline{k}_{nSZ}^- poate fi definit prin analogie cu \underline{k}_{nSU}^- , \underline{k}_{nSI}^- ca fiind coeficientul de nesimetrie negativă în nodul de consum.

Expresia acestui coeficient este dată de relația:

$$\underline{k}_{nSZ}^- = \frac{\underline{Z}_T^-}{\underline{Z}_C^+} = \frac{\underline{Z}_T^-}{\underline{Z}_C^+} + \frac{1}{\underline{Y}_T^- \cdot \underline{Z}_C^+ + \underline{Z}_C^+ / (jX_S^- + \underline{Z}_L^-)} \quad (1.81)$$

și acesta ne arată cu cât se modifică (de regulă se reduce) coeficientul de simetrie negativă al tensiunilor față de acela similar al curenților.

Desigur scopul este reducerea pe cât posibil a lui \underline{k}_{nSU}^- , deci și reducerea lui \underline{k}_{nSZ}^- care se poate asigura prin reducerea impedanței \underline{Z}_T^- , \underline{Z}_L^- , jX_S^- și creșterea admitanței \underline{Y}_T^- . Aceasta înseamnă de fapt alegerea unui transformator de alimentare cu tensiune de scurtcircuit mică, curent de magnetizare mare, linie cât mai scurtă iar puterea a sistemului să fie cât mai mare.

Dacă termenul al doilea din expresia lui \underline{k}_{nSZ}^- se neglijează se obține:

$$\underline{k}_{nSZ}^- \cong \frac{\underline{Z}_T^-}{\underline{Z}_C^+} \text{ iar pentru o simetrie totală a fazelor transformatorului}$$

$$\underline{k}_{nSZ}^- \cong \frac{Z_{sc}}{Z_C^+} = \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{S_C}{U_n^2} = \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot k_a \quad (1.82)$$

unde:

Z_{sc} – este impedanța de scurtcircuit a transformatorului, aproximată cu reactanța de scurtcircuit,

$u_{sc} \%$ – tensiunea de scurtcircuit nominală în procente,

S_n – puterea aparentă nominală în procente,

S_C – puterea aparentă a consumatorului, $S_C = k_u \cdot S_n$,

K_S – coeficient de sarcină,

U_n – tensiunea nominală a înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului.

Pentru $u_{sc} \% = 10$ și $k_s = 0,5$ se obține $\underline{k}_{nSZ}^- = 0,05$ adică reducerea componentei inverse a tensiunii în nodul de consum este foarte pronunțată.

Fără îndoială că în exploatare este foarte util a cunoaște comportarea unor noduri consumatoare sub aspectul coeficientului \underline{k}_{nSZ}^- . Dacă de regulă problema nu apare pe fundamentală chiar în cazul unor dezechilibre foarte accentuate [A8], [I13] pe armonici superioare ca urmare a unor fenomene de rezonanță armonică pot apare amplificări. Situația este foarte interesantă, întrucât regimul dezechilibrat este însoțit întotdeauna și de cel nesinusoidal.

1.7.3. Linia scurtă alimentează un consumator echilibrat și altul dezechilibrat.

Se consideră rețeaua din fig. 1.19 a) ce alimentează de la sistemul S consumatorul echilibrat CE și dezechilibrat CD. Corespunzător în figurile 1.19 b) și c) sunt prezentate schemele echivalente de secvență directă și inversă.

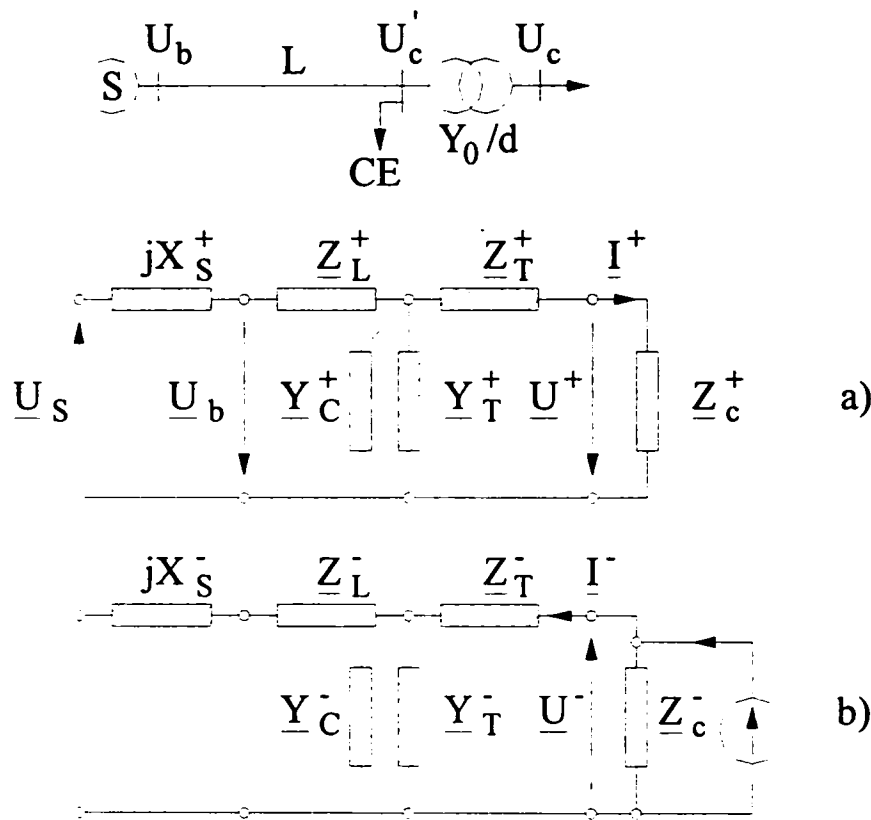


Fig. 1.19 Rețea de alimentare a unui consumator echilibrat și altul dezechilibrat;
 a) schema monofilară simplificată; b) schema de secvență pozitivă;
 c) schema de secvență negativă.

Pentru tensiunile \underline{U}_C și \underline{U}'_C la bornele celor doi consumatori se pot scrie relațiile:

$$\underline{U}_C = \underline{U}^+ + \underline{U}^-, \quad \underline{U}'_C = \underline{U}^+ + \underline{U}^-$$

unde

$$\underline{U}^+ = \underline{I}^+ \cdot \underline{Z}_C^+ = \underline{U}_S - \underline{I}^+ \cdot [1 + (\underline{Z}_T^+ + \underline{Z}_C^+) \cdot (\underline{Y}_T^+ + \underline{Y}_C^+)] \cdot [jX_s^+ + \underline{Z}_L^+] - \underline{I}^+ \cdot \underline{Z}_T^+$$

$$\underline{U}^- = \underline{I}^- \cdot \left\{ \underline{Z}_T^- + 1 / [\underline{Y}_T^- + \underline{Y}_C^- + 1 / (jX_s^- + \underline{Z}_L^-)] \right\}$$

și respectiv

$$\underline{U}^{+*} = \underline{I}^+ \cdot (\underline{Z}_C^+ + \underline{Z}_T^+) = \underline{U}_S - \underline{I}^+ \cdot [1 + (\underline{Z}_T^+ + \underline{Z}_C^+) \cdot (\underline{Y}_T^+ + \underline{Y}_C^+)] \cdot [jX_s^+ + \underline{Z}_L^+]$$

$$\underline{U}^{-*} = \underline{I}^- \cdot 1 / [\underline{Y}_T^- + \underline{Y}_C^- + 1 / (jX_s^- + \underline{Z}_L^-)]$$

de unde:

$$\underline{k}_{nsUc}^- = \frac{\underline{U}^+}{\underline{U}^-} = \underline{k}_{nsI}^- \left[\frac{\underline{Z}_T^+}{\underline{Z}_C^+} \cdot \frac{1}{\underline{Z}_C^+ [\underline{Y}_T^- + \underline{Y}_C^- + \underline{Z}_C^+ / (jX_s^- + \underline{Z}_L^-)]} \right]$$

și respectiv

$$\underline{k}_{nsUc}^+ = \frac{\underline{U}^-}{\underline{U}^+} = \underline{k}_{nsI}^+ \left[\frac{\underline{Z}_T^-}{\underline{Z}_C^- + \underline{Z}_T^-} \cdot \frac{1}{(\underline{Z}_C^- + \underline{Z}_T^-) [\underline{Y}_T^+ + \underline{Y}_C^+ + (\underline{Z}_C^- + \underline{Z}_T^-) / (jX_s^+ + \underline{Z}_L^+)]} \right] \quad (1.83)$$

Din analiza relațiilor (1.70) se constată că prezența consumatorului echilibrat micșorează coeficientul de nesimetrie negativă al impedanței în modul de racord al consumatorului dezechilibrat.

În nodul de alimentare al consumatorului echilibrat coeficientul de nesimetrie inversă al tensiunii are valoarea mai redusă decât în nodul de alimentare al consumatorului dezechilibrat și aceasta în primul rând pe sama impedanței de scurtcircuit a transformatorului de alimentare.

1.8 Concluzii

Scopul acestui capitol a fost acela de a prezenta câteva din problemele pe care le ridică analiza regimului nesimetric produs de consumatorii dezechilibrați și anume: cauze, efecte, mărimi caracteristice, circulația de puteri, utilizarea metodei componentelor de secvență la analiza regimurilor nesimetrice, propagarea regimului nesimetric. Cu aceeași ocazie s-a efectuat și o sinteză a principalelor probleme pe care le comportă analiza regimului nesimetric, evidențiindu-se rolul consumatorilor ca element de dezechilibru în sistemele electrice de putere. Referitor la efectele regimului nesimetric, s-a insistat pe creșterea pierderilor de putere în rețea și înrăutățirea factorului de putere. În acest sens regimul simetric rezultat prin echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei apare ca o soluție firească a unui proces de optimizare în care funcția obiectiv este tocmai pierderea de putere în rețea. Deși modelul folosit consideră unele ipoteze simplificatorii (consumatorii de aceeași natură), procedura de găsimă a optimului este clasică (anularea derivatelor parțiale) iar rezultatul obținut surprinde prin simplitate: repartiția uniformă a sarcinii pe cele trei faze. În aceleași condiții se mai definește un coeficient de majorare a pierderilor de putere în regim dezechilibrat (nesimetric) față de cel simetric, k' , și se fac unele estimări cantitative asupra acestuia în diferite situații.

Referitor la mărimile caracteristice, alături de coeficienții și rapoartele de nesimetrie clasice, menționate în literatură, lucrarea propune două rapoarte de nesimetrie minim și maxim, raportarea valorii efective a tensiunii efectuându-se la valoarea medie; în situațiile practice tocmai componenta de secvență pozitivă. În aceste condiții rapoartele de nesimetrie propuse fac o trecere de la coeficienții de nesimetrie (definiți cu componente de secvență) la rapoartele de nesimetrie definite cu mărimile de fază.

În ceea ce privește circulația de puteri în regim nesimetric, lucrarea prezintă teoria profesorului Țugulea, teorie care dă satisfacție în condițiile sistemelor electrice de putere; sursa de puteri de secvență negativă și zero fiind consumatorul dezechilibrat.

Această constatare permite întocmirea unui model simplu, pentru tensiunile și curenții de fază din nodurile rețelei, care apelează la tensiuni de secvență pozitivă precum și la căderi de tensiune de secvență negativă și zero. Estimarea acestora din urmă presupune cunoașterea impedanțelor de secvență ale elementelor de rețea. Din acest motiv este dezvoltată sistematic și tehnica de estimare a componentelor matricei impedanțelor de secvență. Se consideră elemente de rețea de formă generalizată, fără conductor neutru, cu conductor neutru, cu conductor neutru legat la pământ și se admite o simetrie totală și respectiv ciclică. Scopul este acela de a evidenția sensibilitatea expresiei impedanței de secvență zero la configurația geometrică a elementului de rețea. În continuare se extinde tehnica de determinare a impedanței de secvență pozitivă și în ceea ce privește impedanța de secvență negativă.

În finalul capitolului sunt prezentate câteva aspecte legate de propagarea regimului nesimetric. Se analizează două cazuri particulare: unul în care sistemul alimentează un consumator dezechilibrat, altul în care alimentează un consumator dezechilibrat și unul echilibrat. Este evidențiată interdependența dintre coeficienții de nesimetrie ai tensiunii și curenților și se introduce un coeficient de nesimetrie al impedanțelor util în analiza propagării regimului nesimetric în rețelele electrice. Cu aceeași ocazie se arată atenuarea pronunțată a nesimetriei în tensiunile din nodurile rețelei comparativ cu nesimetria curenților în cazul sarcinilor dezechilibrate.

Contribuțiile originale ale autorului în acest capitol se referă la:

- sistematizarea problemelor legate de studiul regimului nesimetric provocat de sarcini dezechilibrate;
- prezentarea problemei de echilibrare a sarcinii ca soluție de funcționare optimă a rețelei;
- definirea unui coeficient de creștere a pierderilor de putere în regim nesimetric k^* față de regimul simetric, corespunzător aceleași sarcini totale;
- definirea unor coeficienți de nesimetrie a tensiunii care au în vedere valoarea minimă respectiv maximă a tensiunii fazelor raportată la valoarea medie a acestora ;
- definirea coeficienților de nesimetrie a impedanțelor ;
- evidențierea rolului impedanțelor de secvență în estimarea tensiunilor de secvență în nodurile rețelei;
- extinderea tehnicii de determinare experimentală a impedanței de secvență pozitivă prezentată în [M15] și la impedanța de secvență negativă.

REGIMUL PERIODIC NESINUSOIDAL DE FUNCTIONARE AL RETELELOR ELECTRICE

Regimul periodic de funcționare al rețelelor electrice în care cel puțin una dintre mărimi, tensiune sau curent este nesinusoidală (deformată) se numește regim nesinusoidal sau deformant [S2],[P9],[A12] iar cauzele lui derivă din prezența elementelor neliniare în procesele de transport și distribuție a energiei electrice dar mai ales în acelea de transformare a energiei electromagnetice în altă formă de energie. În condițiile acestei lucrări interesează acest ultim aspect. Regimul nesinusoidal este provocat de consumatori neliniari sau neliniari și dezechilibrați iar rețeaua de alimentare se considera liniară. Ca urmare, în cele ce urmează, se vor prezenta câteva probleme generale privind analiza regimului nesinusoidal, insistându-se pe aspectele principale ale acestuia, utile în analiza calității energiei electrice distribuite și consumate.

2.1. Cauzele regimului nesinusoidal

Elementele ce alcătuiesc sisteme electrice de putere, sunt concepute să funcționeze în regim permanent, adică în regim armonic sinusoidal de frecvență fundamentală nominală stabilită prin reglementările tehnice ale țării respective. În realitate, o parte dintre acestea, prin modul în care funcționează sau sunt construite, constituie surse de armonici de tensiune și / sau de curent în domeniul de frecvențe cuprinse între câțiva herți, până la 10kHz [14]. Cel mai frecvent interval este însă cuprins între 100 Hz și 2kHz [14]. Oricum, spectrul de armonici depinde de natura receptorilor racordați la rețea, de nivelul de tensiune al acestora și de particularitățile funcționale ale elementelor de rețea (gradul de încărcare al transformatoarelor, prezența bateriilor de condensatoare etc.).

În general însă, sursele de armonici în cadrul sistemului electroenergetic pot fi [A12],[14]:

- instalații electrice și electronice industriale cu caracteristici neliniare (mutatoare, instalații de electroliză, cuptoare cu arc etc.)
- generatoare și elemente de rețea care prin construcția lor realizează la ieșire mărimi de formă nesinusoidală (mașini sincrone, transformatoare de putere etc.)
- elemente de rețea care funcționează în regimuri perturbate (mașini electrice și transformatoare supraîncărcate, linii electrice supratensionate prin efectul corona etc.)
- aparate de înaltă frecvență și ultrafrecvență (cuptoare cu microunde etc.)

Schematic principalele surse de armonici din sistemul electroenergetic pot fi sistematizate ca în fig. 2.1.

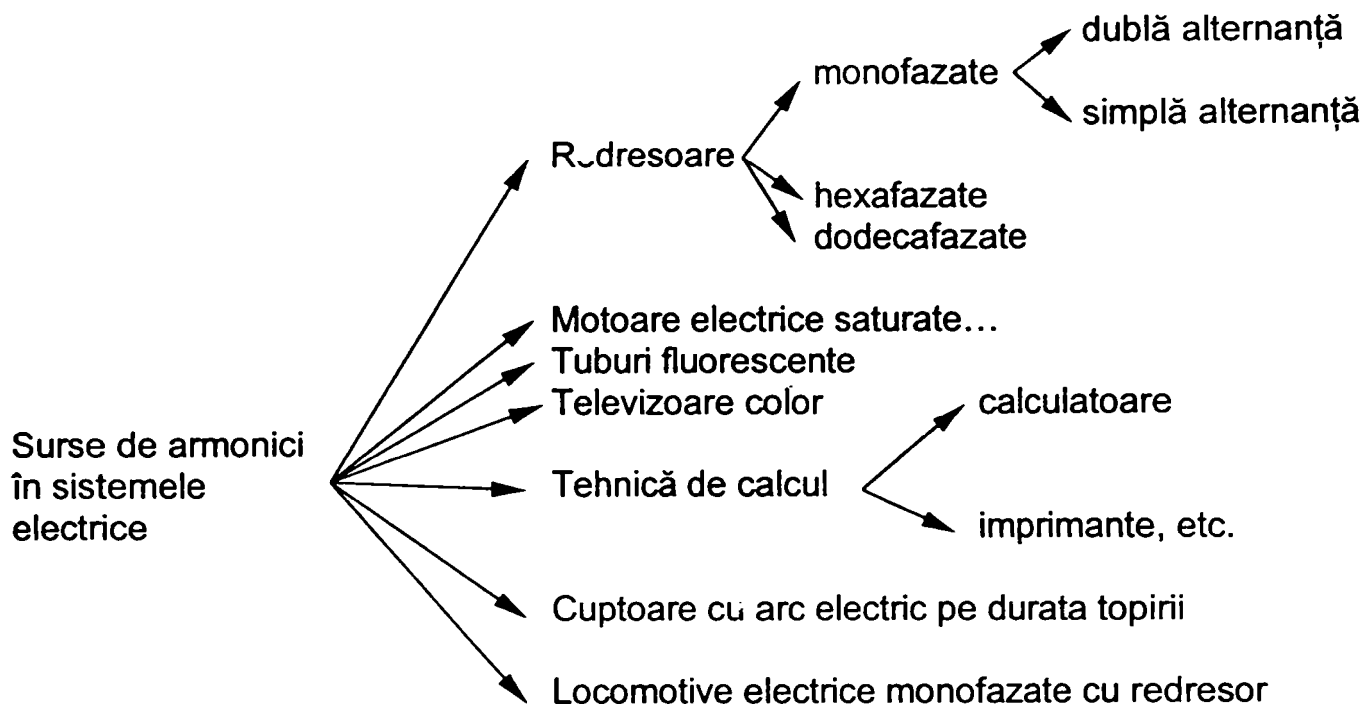


Fig. 2.1. Surse de poluare armonică - prezentare schematică

Creșterea nivelului de poluare cu armonici a sistemului electroenergetic pe de o parte, respectiv creșterea pretențiilor consumatorilor asupra calității energiei electrice consumate, pe de altă parte, reclamă efectuarea de studii și cercetări privind identificarea regimului deformant, a cauzelor lui, propagarea în rețea, efectele acestuia asupra elementelor de rețea și asupra receptoarelor, adoptarea celor mai eficiente măsuri pentru limitarea influențelor negative asupra funcționării sistemului.

2.2. Indicatori de calitate ai tensiunii și curentului în rețele poluate armonic [A12],[I4]

Pentru a estima gradul de poluare cu armonici a sistemului, dar și în scopul limitării acestei poluări au fost elaborate standarde care trebuie să fie cuprinse în normele de fabricare ale aparatelor și echipamentelor, dar care se referă și la modul de exploatare al acestora. Aceste normative se referă la [I4],[V2] : tensiunile armonice admisibile pe barele de alimentare; curenții armonici admisibili; puterea perturbatoare admisibilă; influențele admisibile asupra convorbirilor telefonice.

Pentru analiza acestor regimuri s-au stabilit indicatori caracteristici și aceștia sunt prevăzuți în standarde naționale, europene sau sunt recomandați de CEI .

Astfel :

- nivelul armonicilor de rang k , notat γ_k se definește ca fiind raportul dintre valoarea efectivă a armonicii k , A_k și a fundamentalei A_1 adică:

$$\gamma_k = \frac{A_k}{A_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

- reziduul deformant, $A_d = \left[\sum_{k=2}^{\infty} A_k^2 \right]^{1/2}$ (2.2)

- coeficientul de distorsiune δ_a al curbei mărimii $a(t)$:

$$\delta_a = \frac{A_d}{A_1} \cdot 100 = \frac{\left[\sum_{k=2}^{\infty} A_k^2 \right]^{1/2}}{A_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

- coeficientul ponderat de distorsiune δ_{pa} al curbei mărimii $a(t)$:

$$\delta_{pa} = \frac{\left[\sum_{k=2}^{\infty} k^2 \cdot A_k^2 \right]^{1/2}}{A_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

- coeficientul de deviație k_{dev} :

$$k_{dev} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} A_k}{A_1} \quad (2.5)$$

- coeficientul de formă k_f :

$$k_f = \frac{A}{A_m} = \frac{\left[\sum_{k=1}^{\infty} A_k^2 \right]^{1/2}}{A_m} \quad (2.6)$$

unde A este valoarea medie a mărimii $a(t)$ pe o jumătate de perioadă

- coeficientul de vârf k_v :

$$k_v = \frac{A_{max}}{A_1} \quad (2.7)$$

- coeficientul de influență telefonică, TIF:

$$TIF = \frac{\left[\sum_{k=1}^{\infty} (U_k \cdot k_{pk} \cdot K_{ck})^2 \right]^{1/2}}{\sqrt{2} \cdot U} \quad (2.8)$$

unde:

- k_{pk} este un factor de pondere cu valoarea 1 la 10^3 Hz și ≤ 1 pentru alte frecvențe;
- K_{ck} reprezintă coeficientul de cuplaj de valoare $9k$, k fiind rangul armonicii;
- U_k și I_k sunt valorile efective ale tensiunii și curentului de rang k

De menționat că standardele ce privesc poluarea armonică a sistemului electroenergetic pot fi împărțite în două categorii și anume:

- standardele de sistem, care se referă la probleme ce privesc racordarea la sistemul electroenergetic a surselor de armonici;
- standarde de echipament, care privesc performanțele echipamentelor în legătură cu emisia de armonici.

Dintre standardele de sistem se pot menționa IEE S 19-1992, IEC 1000-2-2, [14] iar dintre cele de echipament IEEE 559-2, IEEE 446 [V2].

Estimarea indicatorilor de calitate se efectuează statistic. În acest sens actualmente se constată o convergență de păreri a specialiștilor din grupurile de lucru ale organismelor internaționale: CEI, CIGRE, CIRED, UNIPED, atât sub aspectul abordării statistice, cât și a nivelurilor de compatibilitate admise. Astfel, grupul de lucru [14] al CIGRE a stabilit

elementele de bază în analizele statistice ale perturbațiilor în rețele electrice datorate armonicilor. Intervalele de timp recomandate pentru a fi utilizate în analizele statistice sunt:

$T_{vs} = 3$ secunde – interval de timp foarte scurt,

$T_{sk} = 10$ secunde – interval de timp scurt,

$T_d = 1$ zi – interval de timp zilnic,

$T_w = 1$ săptămână – interval de timp săptămânal.

De menționat că pentru intervalul de timp cel mai lung de observație se definește probabilitatea cumulativă 95% (CP95%). Aceasta este valoarea 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 corespunzătoare ale CP95% sunt comparate cu niveluri de compatibilitate admise de normele CEI 1000.

2.3. Efectele poluării armonice

2.3.1 Generalități

Referitor la echipamentele electrice existente într-o rețea electrică poluată armonic, acestea pot fi împărțite în două categorii [A12]. Astfel, prima categorie cuprinde echipamentele sensibile la curenți ce parcurg aceste echipamente sau la tensiunile deformate aplicate la bornele echipamentului, a doua cuprinde instalații sincronizate cu tensiunea sinusoidală a rețelei electrice și care sunt afectate de perturbații funcționale în prezența armonicilor de tensiune. Un alt aspect deloc de neglijat este acela că pierderile de energie care apar datorită regimurilor nesinusoidale conduc la creșterea cheltuielilor de producție a energiei electrice, supradimensionarea instalațiilor și în general majorarea cheltuielilor de investiții. Nu trebuie neglijată nici suprasolicitarea bateriilor de condensatoare, care duc la pierderi suplimentare, accentuarea fenomenului de îmbătrânire a izolației și la reducerea duratei de viață a bateriei.

În sensul celor mai sus prezentate în fig. 2.2 se prezintă o sinteză a efectelor negative a poluării armonice asupra elementelor de rețea și consumatorilor.

2.3.2 Efectele energetice

Fără îndoială că prezența regimului (poluării) nesinusoidal afectează defavorabil parametrii energetici ai regimului real de funcționare ai echipamentului înrăutățind factorul de putere și majorând pierderile de putere și energie. Dacă se are în vedere faptul că astăzi sursele de energie, sistemele puternice asigură practic tensiuni sinusoidale **sursele reale de poluare armonică sunt consumatorii neliniari**. În aceste condiții încercând a defini un factor de putere plecând de la gradul de utilizare al puterii maxime [14] se poate scrie [T6], [T7]:

$$k_p = \frac{P}{P_{\max}}$$

În regim sinusoidal simetric P corespunde tocmai puterii active pe fundamentală, adică:

$$P = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad \text{iar} \quad P_{\max} = 3U_1 I_1,$$

deci

$$k_{p_{\text{max}}} = \frac{3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1}{3U_1 \cdot I_1} = \cos\varphi_1 \quad (2.9)$$

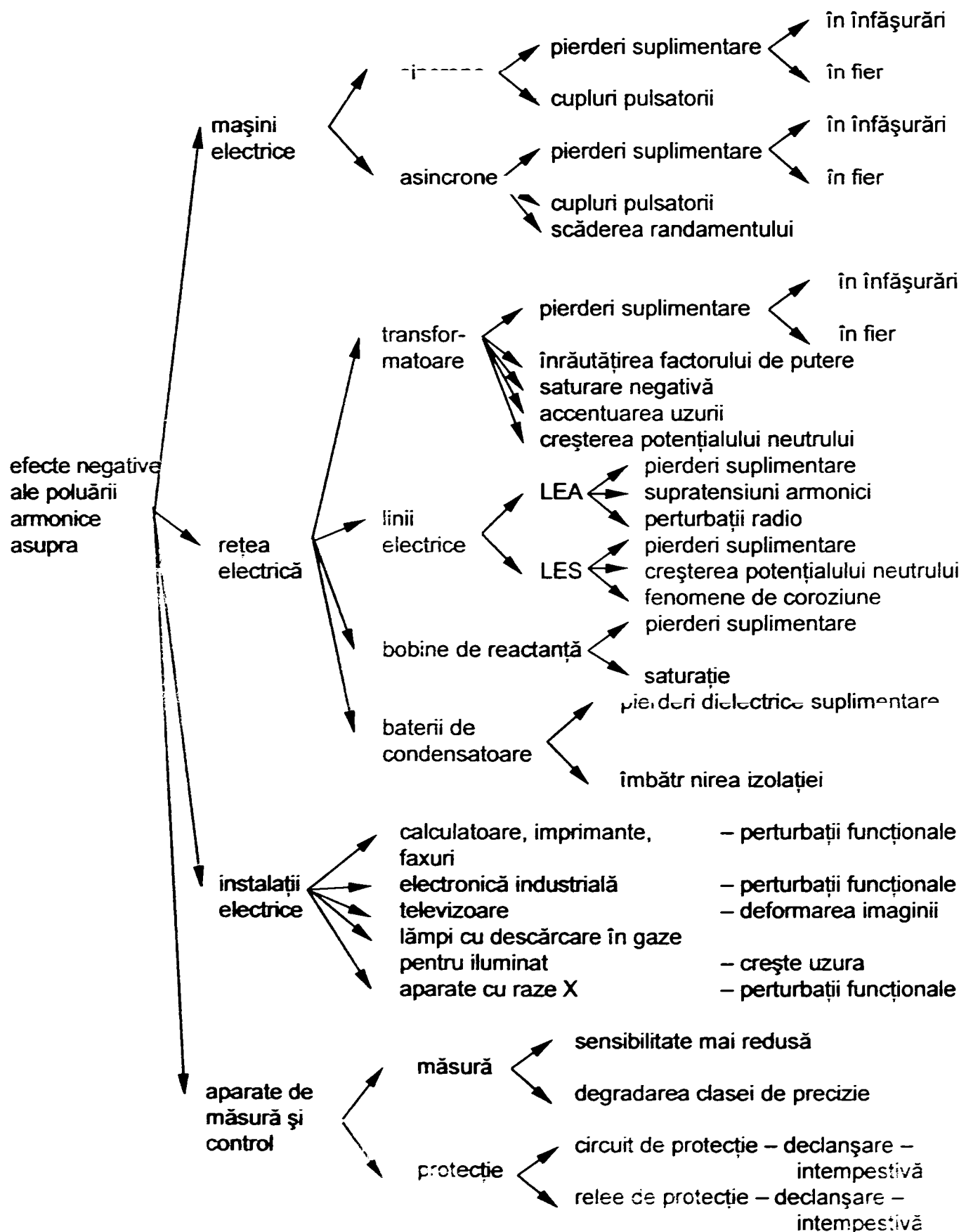


Fig. 2.2 Efectele negative ale poluării armonice asupra elementelor S.E.E.

În regim nesinusoidal simetric P corespunde puterii active efectiv absorbite de consumatorul neliniar, adică:

$$P = P_1 + \sum_{k=2}^{\infty} P_k \text{ și evident } P < P_1 \text{ iar } P_{\max} = P_{1\max},$$

adică

$$k_{\text{pnes}} = \frac{P_1 + \sum_{k=2}^{\infty} P_k}{P_{1\max}} = \cos \varphi_1 + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} P_k}{P_{1\max}} \quad (2.10)$$

Dar cum $\sum_{k=2}^{\infty} P_k < 0$ rezultă că $k_{\text{pnes}} < \cos \varphi_1$, adică factorul de putere al unui consumator neliniar este mai scăzut decât al unuia liniar de aceeași putere maximă.

În ceea ce privește creșterea pierderilor de putere activă, aceasta se datorează atât majorării pierderilor în materiale conductoare cât și în materialele magnetice P_{Fe} și dielectrice P_D . În primul caz majorarea este pusă pe seama creșterii valorii efective a curentului, dar și a creșterii rezistenței conductorului în principal datorită efectului pelicular, adică [T8]:

$$P_{C_{\text{unes}}} = 3 \sum_{k=1}^{\infty} R_k \cdot I_k^2 \cong 3R_1 \cdot I_1^2 \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{I_k}^2 \cdot \sqrt{k} \right) \quad (2.11)$$

unde γ_{I_k} este nivelul armonicii de curent I_k .

$$\text{Evident } P_{C_{\text{unes}}} > P_{Cu}, \text{ deoarece } 1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{I_k}^2 \cdot \sqrt{k} > 1$$

Desigur, dependența rezistenței armonice R_k de \sqrt{k} [R3] este cu totul aproximativă, o analiză mai amănunțită a rezistenței conductoarelor de Al - Ol este prezentată în [A10]. Aici profesorul Antoniu arată că raportul dintre rezistența în curent alternativ și aceea în curent continuu este dependentă de constanta $\lambda_a = a\sqrt{\mu\omega\tau}$ unde mărimile care intervin au semnificație cunoscută și anume:

μ – permeabilitatea magnetică a conductorului

ω – pulsația

τ – conductivitatea.

Pe baza datelor furnizate în [A10], în lucrarea [P13] se prezintă tabelat valorile raportului R_k/R_1 în funcție de k și de λ_a .

Data fiind dificultatea utilizării unor tabele, s-a considerat că determinarea unei dependențe analitice a lui R_k/R_1 de k ar fi binevenită și firește utilă, dependența rezistenței armonice de \sqrt{k} fiind prea grosolană. Astfel, apelându-se la interpolarea numerică folosind metoda celor mai mici pătrate și drept criterii de apreciere a corelației găsite raportul de corelație r și abaterea medie pătratică σ , au rezultat următoarele variante:

$$a) \quad R_k/R_1 = \exp\left[1/(a + b/k^2)\right] \quad \text{cu } a = 1,1101179 \quad \text{și } b = 279,11 \quad \text{iar } r^2 = 0,9915 \text{ și } \sigma = 0,02024$$

$$b) \quad R_k/R_1 = \exp\left[1/(a + b/k)\right] \quad \text{cu } a = 0,11239 \quad \text{și } b = -14,556 \quad \text{iar } r^2 = 0,99066 \text{ și } \sigma = 0,02127$$

Cele două curbe de aproximare a raportului R_k/R_1 sunt prezentate în fig 2.3 ,curbele 1. Pe același grafic s-a trasat și dependența acceptată $R_k/R_1 = \sqrt{k}$, curbele 2. Se constată că abaterile sunt sensibile mai ales la armonicile inferioare.

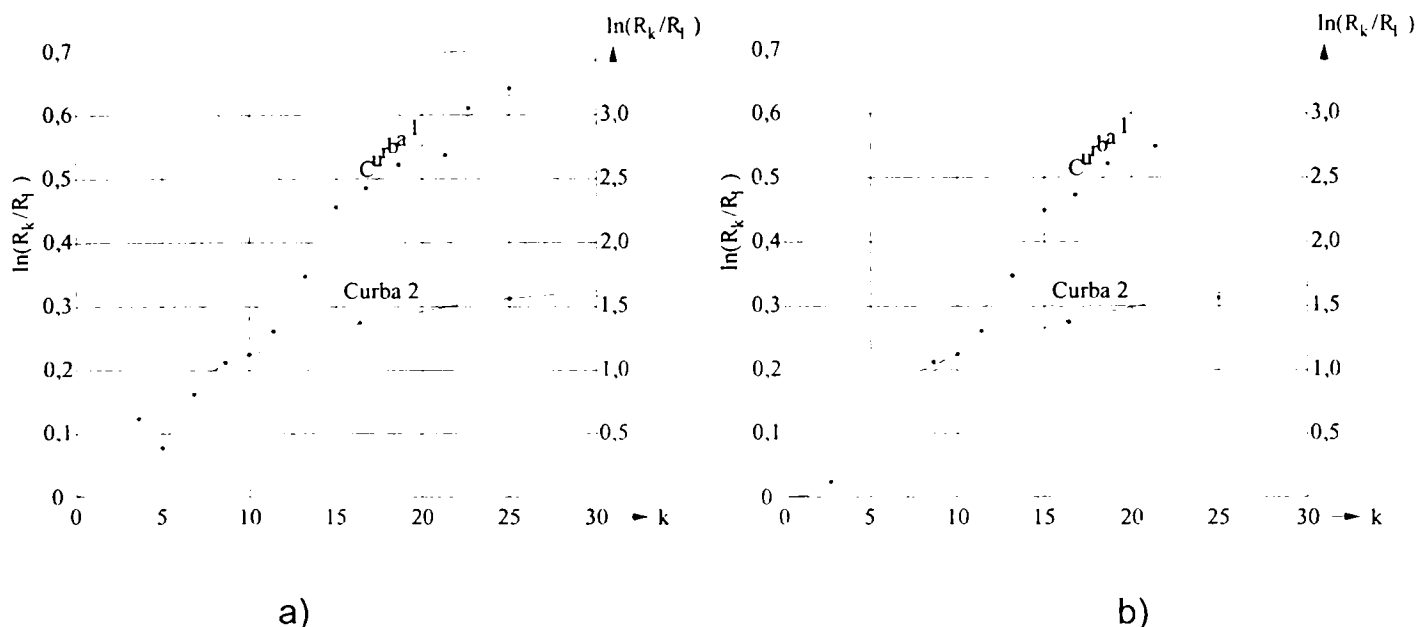


Fig. 2.3 Curbe de aproximare a dependenței $R_k/R_1 = \varphi_k$ pentru conductoare Al-Ol

În ceea ce privește creșterea pierderilor în materialele dielectrice și magnetice, aceasta se datorează în principal majorării valorii efective a tensiunii aplicate echipamentului.

2.3.3. Creșterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor sau receptoarelor.

Un alt efect defavorabil al poluării armonice a rețelelor electrice mai puțin comentat în literatura de specialitate, dar foarte prezent în rețelele electrice de distribuție de joasă tensiune este creșterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor sau receptoarelor.

Dacă rețeaua electrică prezintă un regim nesinusoidal la bornele înfășurării transformatorului sau receptorului în cauză (fig. 2.4) se aplică tensiuni armonice de rang multiplu de trei ($3p$) care sunt sinfazice, de regulă , considerand aceiași fază inițială. Pentru aceste armonici punctul neutru apare cu un potențial față de pământ a cărui valoare depinde de raportul dintre impedanțele armonice ale conexiunii Y_0 și circuitul de nul.

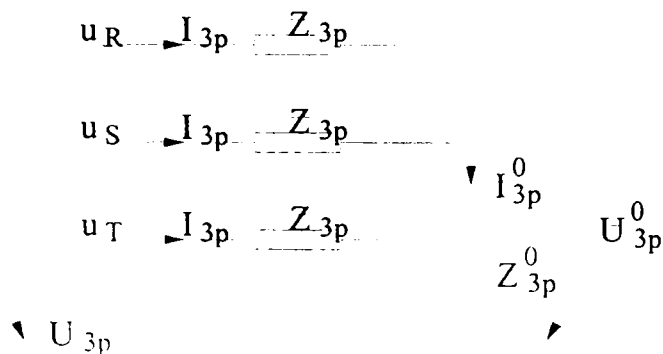


Fig. 2.4. Montaj în stea cu conductor neutru legat la pământ.

Astfel, dacă se consideră ca fază de referință faza R, se poate scrie:

$$\underline{U}_{3p} = I_{3p} (\underline{Z}_{3p} + 3\underline{Z}_{3p}^0) \text{ și } \underline{U}_{3p}^0 = 3I_{3p} \cdot \underline{Z}_{3p}^0, \text{ de unde rezultă:}$$

$$I_{3p} = \frac{\underline{U}_{3p}}{\underline{Z}_{3p} + 3\underline{Z}_{3p}^0} \text{ și } \underline{U}_{3p}^0 = \frac{\underline{U}_{3p}}{1 + \underline{Z}_{3p}/3\underline{Z}_{3p}^0} \quad (2.12)$$

Este posibil ca potențialul neutrului (\underline{U}_{3p}^0) să devină egal cu acela al fazei și aceasta evident când raportul $\underline{Z}_{3p}/3\underline{Z}_{3p}^0$ tinde către zero.

Pentru o analiză mai atentă a raportului $\underline{Z}_{3p}/3\underline{Z}_{3p}^0$ trebuie avut în vedere faptul că \underline{Z}_{3p} este un multiplu al impedanței de secvență 0 a înfășurării primare a transformatorului (regimul de secvență 0 apărând în înfășurarea primară și se caracterizează prin curenți și tensiuni de secvență 0).

Dacă se are în vedere comportarea longitudinală a transformatorului care este aceeași indiferent de conexiunea înfășurării secundare și de construcția circuitului magnetic, se poate scrie că: $\underline{Z}_{3p} \cong j\underline{X}_{3p} = j \cdot 3p \cdot \frac{u_{sc} \%}{2 \cdot 100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$ și că $\underline{Z}_{3p}^0 \cong R$ de unde rezultă că:

$$\frac{\underline{Z}_{3p}}{3\underline{Z}_{3p}^0} = \frac{3p}{2 \cdot 3} \cdot \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{1}{R} = \frac{p}{2} \cdot \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{1}{t} \quad (2.13)$$

În relația (2.13) cu t s-a notat raportul dintre rezistența instalației de legare la pământ a înfășurării transformatorului și impedanța nominală a transformatorului. Se poate constata din analiza relației că cu cât impedanța de legare la pământ este mai mare, puterea aparentă nominală a transformatorului mai mare și rangul armonic mai mic, cu atât și raportul celor două impedanțe scade.

În valoare absolută, potențialul neutrului depinde de mărimea curenților armonici homopolari și de impedanța armonică a instalației de legare la pământ. De fapt, problema este mai complexă întrucât componentele impedanțelor armonice \underline{Z}_{3p} și \underline{Z}_{3p}^0 depind diferit de frecvență (rangul armonicii). Astfel dacă instalația de legare la pământ este realizată sub forma unui conductor de secțiune circulară corespunzătoare, iar rezistența de trecere conductor - sol este neglijabilă, se poate scrie că $\underline{Z}_{3p}^0 \cong R_{3p}^0 \cong R_1^0 \cdot \sqrt{3p}$ [R3]. Ca urmare pentru raportul $\underline{Z}_{3p}/\underline{Z}_{3p}^0$ se poate scrie:

$$\frac{\underline{Z}_{3p}}{\underline{Z}_{3p}^0} = \frac{3p}{2 \cdot 3} \cdot \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{3p} \cdot R_1} = \frac{\sqrt{3p}}{3} \cdot \frac{u_{sc} \%}{200} \cdot \frac{Z_n}{R_1} = \sqrt{\frac{p}{3}} \cdot \frac{u_{sc} \%}{200} \cdot \frac{Z_n}{R_1} = \sqrt{\frac{p}{3}} \cdot \frac{u_{sc} \%}{200} \cdot \frac{1}{t} \quad (2.14)$$

Dacă impedanța \underline{Z}_{3p}^0 corespunde unei bobine de tratare în conexiunea Y_0 a unui BPN (bobină pentru formarea neutrului artificial), deoarece $\underline{Z}_{3p} \ll \underline{Z}_{3p}^0$, practic tensiunile homopolare aplicate se vor regăsi pe neutrul BPN, adică $\underline{U}_{3p}^0 \approx \underline{U}_{3p}$. Aceasta firește la punerea la pământ a unei faze.

2.3.4. Supracurenții de rezonanță armonică

Supracurenții de rezonanță armonică pot apare în circuitele consumatorilor sau pe laturile rețelelor electrice. Prima situație apare atunci când pe barele de alimentare ale unui consumator industrial (fig.2.5) sunt racordați consumatori neliniari (surse de armonici), consumatori liniari și baterii de condensatoare. Pentru armonica de rang k schema echivalentă armonică a rețelei se prezintă ca în fig. 2.6.

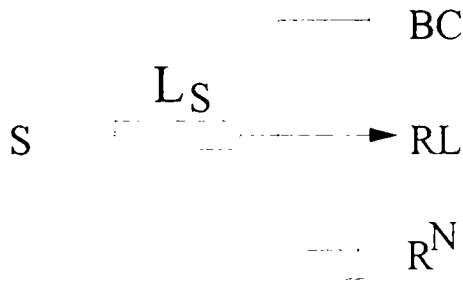


Fig. 2.5. Rețea electrică

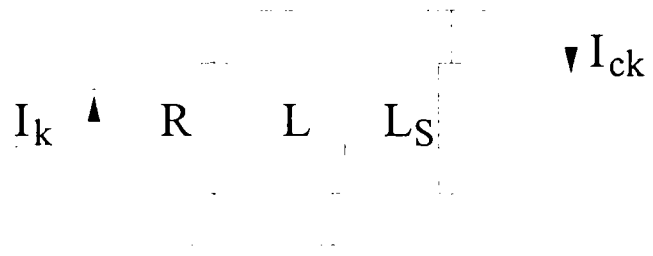


Fig. 2.6. Schema electrică echivalentă a rețelei din fig. 2.5.

Curentul armonic I_{ck} ce străbate circuitul bateriei de condensatoare are expresia [A10]:

$$I_{ck} = I_k \sqrt{\left[\frac{k^2 \cdot \omega^2 \cdot C \cdot \lambda - 1}{k^2 \cdot \omega^2 \cdot C \cdot \lambda} - \frac{j}{R \cdot k \cdot \omega \cdot C} \right]}, \text{ unde } \lambda = \frac{L \cdot L_s}{L + L_s}$$

Dacă armonica k satisface condiția $k^2 \cdot \omega^2 \cdot C \cdot \lambda = 1$, adică aceea de rezonanță armonică, intensitatea curentului electric prin bateria de condensatoare are expresia:

$$I_{ck} = j \cdot I_k \cdot R \cdot C \cdot k \cdot \omega = j \cdot I_k \cdot R \cdot C \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q} \cdot \frac{L + L_s}{L}} \quad (2.15)$$

Se poate constata din analiza relației (2.15) că situații dezavantajoase apar în condiții de sarcină activă mică, compensări mari, puteri de scurtcircuit mari.

Este evident că $I_{ck} > I_k$, putând distruge bateria de condensatoare.

2.4. Circulația de puteri în rețele cu consumatori neliniari. [T7], [T8]

Dacă se consideră un sistem alcătuit dintr-un generator ce alimentează printr-o rețea liniară un consumator liniar CL și altul neliniar CN (fig. 2.7) se va arăta că numai consumatorul neliniar este sursa de armonici.

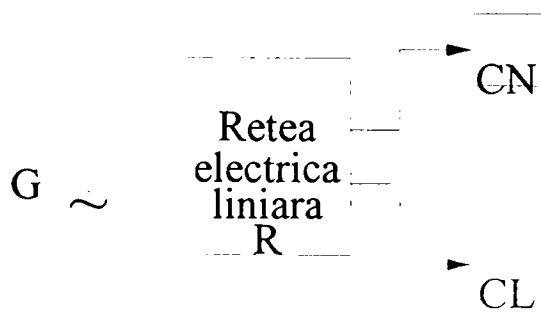


Fig. 2.7. Sistem electric – reprezentare schematică

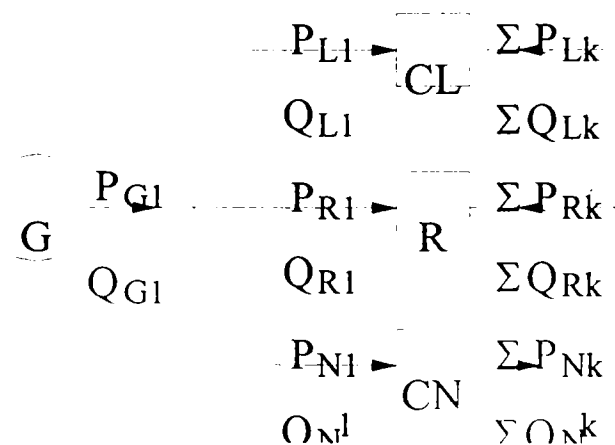


Fig. 2.8. Circulația puterilor în sistemul din fig.2.7

Deoarece rețeaua este liniară, după descompunerea în serii Fourier a tensiunii și curentului debitat de generator, aplicând teorema superpoziției, se poate efectua calculul puterilor pe fiecare armonică în parte, iar apoi prin însumare se obțin puterile totale astfel:

$$\sum_1^{\infty} P_{gk} = \sum_1^{\infty} P_{Rk} + \sum_1^{\infty} P_{Nk} + \sum_1^{\infty} P_{Lk}, \quad \sum_1^{\infty} Q_{gk} = \sum_1^{\infty} Q_{Rk} + \sum_1^{\infty} Q_{Nk} + \sum_1^{\infty} Q_{Lk} \quad (2.16)$$

Relațiile (2.16) corespund puterilor active și reactive. Dar tensiunea generatorului este o mărime sinusoidală, ca urmare P_k și Q_k furnizate de acesta nu au componente decât pe fundamentală. Ca urmare relația (2.16) devine:

$$\begin{aligned} P_{g1} &= P_{R1} + P_{N1} + P_{L1} = P_g, & Q_{g1} &= Q_{R1} + Q_{N1} + Q_{L1} & (\text{pentru } k=1) \\ 0 &= P_{Rk} + P_{Nk} + P_{Lk} & 0 &= Q_{Rk} + Q_{Nk} + Q_{Lk} & (k \neq 1) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Consumatorul liniar CL și rețeaua R sunt liniare, ele absorb putere deci $P_{Lk}, P_{Rk} > 0$, la fel și $Q_{Lk}, Q_{Rk} > 0$ rezultă că pentru armonicile superioare $P_{Nk}, Q_{Nk} < 0$.

Comparând relațiile (2.16), (2.17) rezultă:

$$\begin{aligned} P_R &= P_{R1} + \sum_{k=2}^{\infty} P_{Rk} > 0; & \sum_{k=2}^{\infty} P_{Rk} < 0; & \sum_{k=2}^{\infty} P_{Lk} > 0 \\ P_N &= P_{N1} + \sum_{k=2}^{\infty} P_{Nk} < P_{N1}; & P_L &= P_{L1} + \sum_{k=2}^{\infty} P_{Lk} > P_{L1}; \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$P_R = P_{R1} + \sum_{k=2}^{\infty} P_{Rk} > P_{R1}$$

Relațiile (2.18) exprimă următorul fapt : consumatorul neliniar primește de la generator putere activă corespunzătoare fundamentalei P_{N1} , din care consumă numai o parte, restul $\sum_2^{\infty} P_{Nk}$ o debitează pe armonicile superioare în rețea și consumatorului liniar (fig. 2.8).

Consumatorul liniar absoarbe numai o parte din putere de la generatorul ideal, restul o ia de la consumatorul neliniar. Rețeaua deși liniară absoarbe puterea $P_R > P_{R1}$, deci prezintă pierderi suplimentare datorită prezenței consumatorului neliniar.

În condițiile prezentate mai sus, regimul nesinusoidal periodic trebuie analizat în planul fiecărei armonici. Dacă în planul fundamentalei sursa de putere este reprezentată de generatoarele din sistemul electroenergetic, în planul fiecărei armonici avem surse de curenți armonici I_k debitați în rețea de consumatorii neliniari (fig. 2.9).

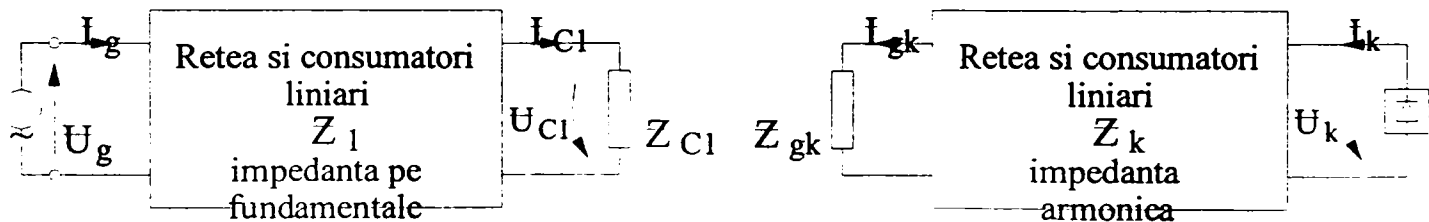


Fig. 2.9. Reprezentarea circulației de curenți armonici în rețea.
a) pe fundamentală, b) pe armonici $k > 1$

De menționat că pe fundamentală consumatorul neliniar apare ca o impedanță \underline{Z}_{cl} , determinată de puterile activă și reactivă absorbită și de tensiunea \underline{U}_{cl} . Dacă consumatorul neliniar este simetric $\underline{U}_{cl} = \underline{Z}_{cl} \cdot \underline{I}_{cl}$ iar $\underline{U}_k = \underline{I}_k (\underline{Z}_k + \underline{Z}_{gk})$ (2.19)

Dacă impedanța armonică a generatorului $\underline{Z}_{gk} \ll \underline{Z}_k$, atunci

$$\underline{U}_k = \underline{I}_k \cdot \underline{Z}_k \quad (2.20)$$

iar

$$U_C^2 = U_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} U_k^2 \text{ sau } U_C^2 = U_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \cdot Z_k^2 \quad (2.21)$$

Dacă în plus consumatorul neliniar este și dezechilibrat, rețeaua corespunzătoare se descompune la rândul ei în trei rețele de secvență pe fundamentală și anume: pozitivă, negativă, și zero fig. 2.10.

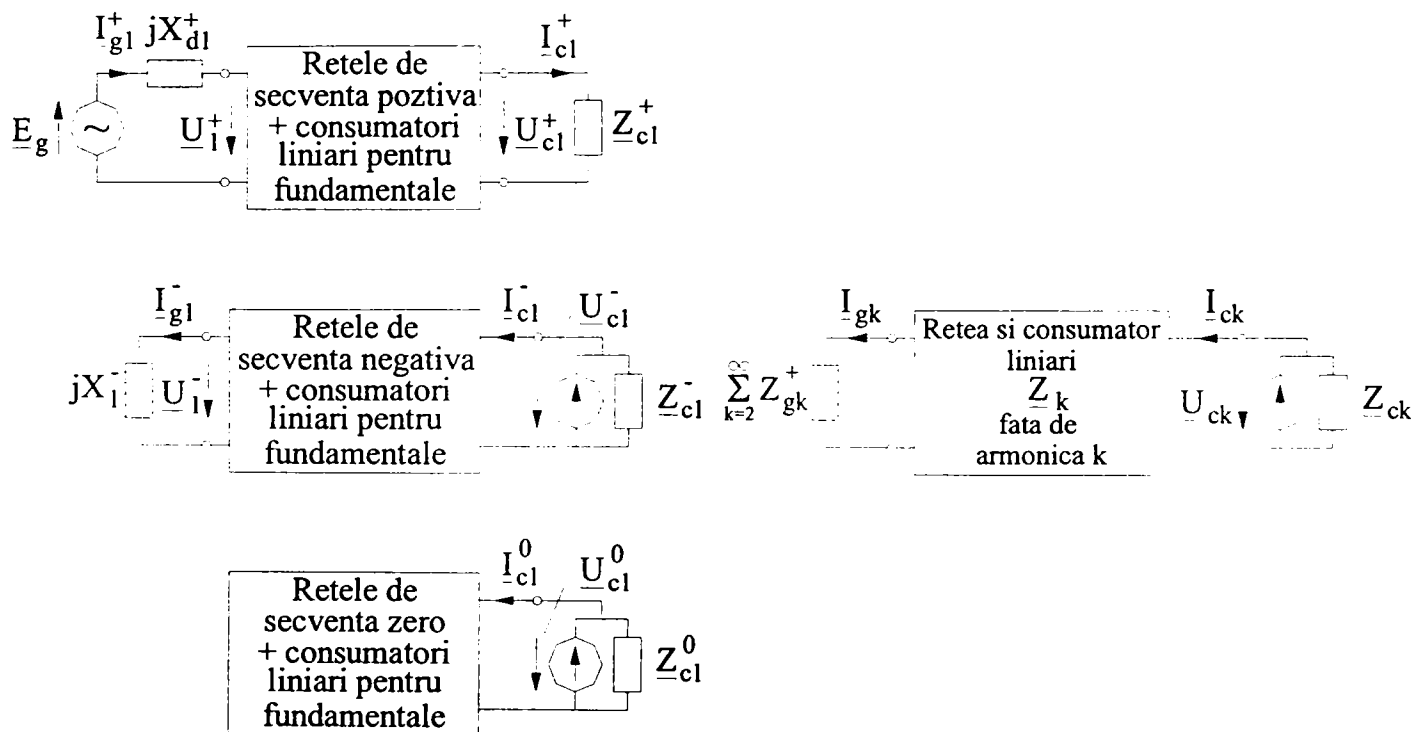


Fig. 2.10. Descompunerea rețelei reale în planul fundamentalei a) în trei rețele de secvență ; și în planul armonicilor în rețele armonice b).

În condițiile prezentate în fig. 2.10 pentru faza R, tensiunea la bornele consumatorului neliniar și dezechilibrat poate fi scrisă astfel:

$$U_C^2 = \left[\underline{U}_{cl}^+ + \underline{U}_{cl}^- + \underline{U}_{cl}^0 \right]^2 + \sum_{k=2}^{\infty} U_k^2 \quad (2.22)$$

sau explicitând componentele tensiunii \underline{U}_{cl} și \underline{U}_k

$$U_C^2 = \left[\left(\underline{E}_g - \underline{I}_{gl}^+ \cdot (jX_{dl}^+ + \underline{Z}_l^+) \right) + \underline{I}_{cl}^- \cdot (jX_{l1}^- + \underline{Z}_l^-) + \underline{I}_{cl}^0 \cdot \underline{Z}_l^0 \right]^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \cdot (\underline{Z}_{gk} + \underline{Z}_k)^2 \quad (2.23)$$

Incluzând impedanța armonică a generatorului ideal \underline{Z}_{gk} în aceea armonică a rețelei și consumatorilor liniari, impedanța rezultată (echivalentă) devine tocmai *impedanța armonică a rețelei văzută la bornele consumatorului neliniar*.

De fapt relația (2.23) corespunde unui model de calcul a tensiunii la bornele consumatorului neliniar și dezechilibrat, care permite analiza interacțiunii dintre regimul neliniar și nesimetric.

2.5. Impedanța armonică a rețelelor electrice

Modelul prezentat în fig. 2.10, precum și relațiile (2.21) și (2.23) conțin un element foarte util în analiza regimului nesinusoidal și anume – impedanța armonică Z_k .

2.5.1. Generalități

Grupul de lucru al CIGRE, GTCC02 definește impedanța armonică a unei rețele într-un nod ca fiind impedanța complexă de secvență pozitivă a rețelei văzută în acel nod în funcție de frecvență (sau de rangul armonicii), [R3], [M15]. Introduserea acestei mărimi caracteristice este legată fără îndoială de dorința cercetătorilor de a stăpâni problemele pe care le ridică producerea regimului nesinusoidal, propagarea sau transferul acestuia prin rețeaua electrică, dar mai ales adaptarea celor mai eficiente măsuri pentru limitarea propagării și atenuarea lui. [A12], [M15]. Desigur definiția are în vedere particularitățile pe care le prezintă rețeaua de înaltă și foarte înaltă tensiune, adică simetrie totală (egalitatea impedanțelor armonice de secvență pozitivă și negativă). În condițiile rețelelor de medie și joasă tensiune care conțin și consumatori liniari (mulți dintre ei rotativi) problema devine mai complexă, determinările experimentale evidențiind faptul că impedanța armonică medie, rezultată prin medierea valorilor obținute pe cele trei faze corespunde impedanței de secvență pozitivă sau negativă, dependent de faptul că armonica luată în considerare este de forma $6p+1$ sau $6p-1$ [A2]. Deși prezentată în literatură, observația nu a fost suficient argumentată cu determinări experimentale. Oricum în acest sens elocvente par a fi datele referitoare la un consumator complex (ce include receptori și rețele de alimentare) de 6 kV [M15], pentru care analiza armonică a evidențiat cele prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1 Valori ale impedanțelor armonice [M15]

k	Z_{Rk}	Z_{Sk}	Z_{Tk}	Z_{mk}	Z_{dk}	Z_{ik}
1	463,108	488,257	471,888	474,417	474,658	116,947
5	93,597	122,307	207,026	107,643	328,977	106,209
7	91,985	119,407	96,256	102,549	104,125	12,340
11	176,483	183,106	165,575	175,054	509,330	170,308
13	171,528	77,093	114,397	121,000	97,638	586,194
17	112,578	147,957	343,191	204,575	89,317	176,436
19	370,487	106,143	235,944	237,524	185,130	990,857

Din analiza celor prezentate în tabelul 2.1 se constată că într-adevăr impedanțele armonice de secvență pozitivă z_k^+ sau negativă z_k^- se apropie de valorile medii de fază Z_{mk} corespunzătoare rangului armonicii. Concluzia care se desprinde din această observație este aceea că în rețelele de distribuție impedanța armonică trebuie pusă în concordanță neapărat cu rangul armonicii iar determinările acestei impedanțe pe una dintre faze (R sau S) așa cum de multe ori se practică [M15] conduce la erori semnificative.

2.5.2 Metode de estimare

O clasificare a metodelor de estimare a impedanțelor armonice se poate prezenta ca în fig. 2.11. Clasificarea are în vedere cele prezentate în [R3], [M15], [B5]

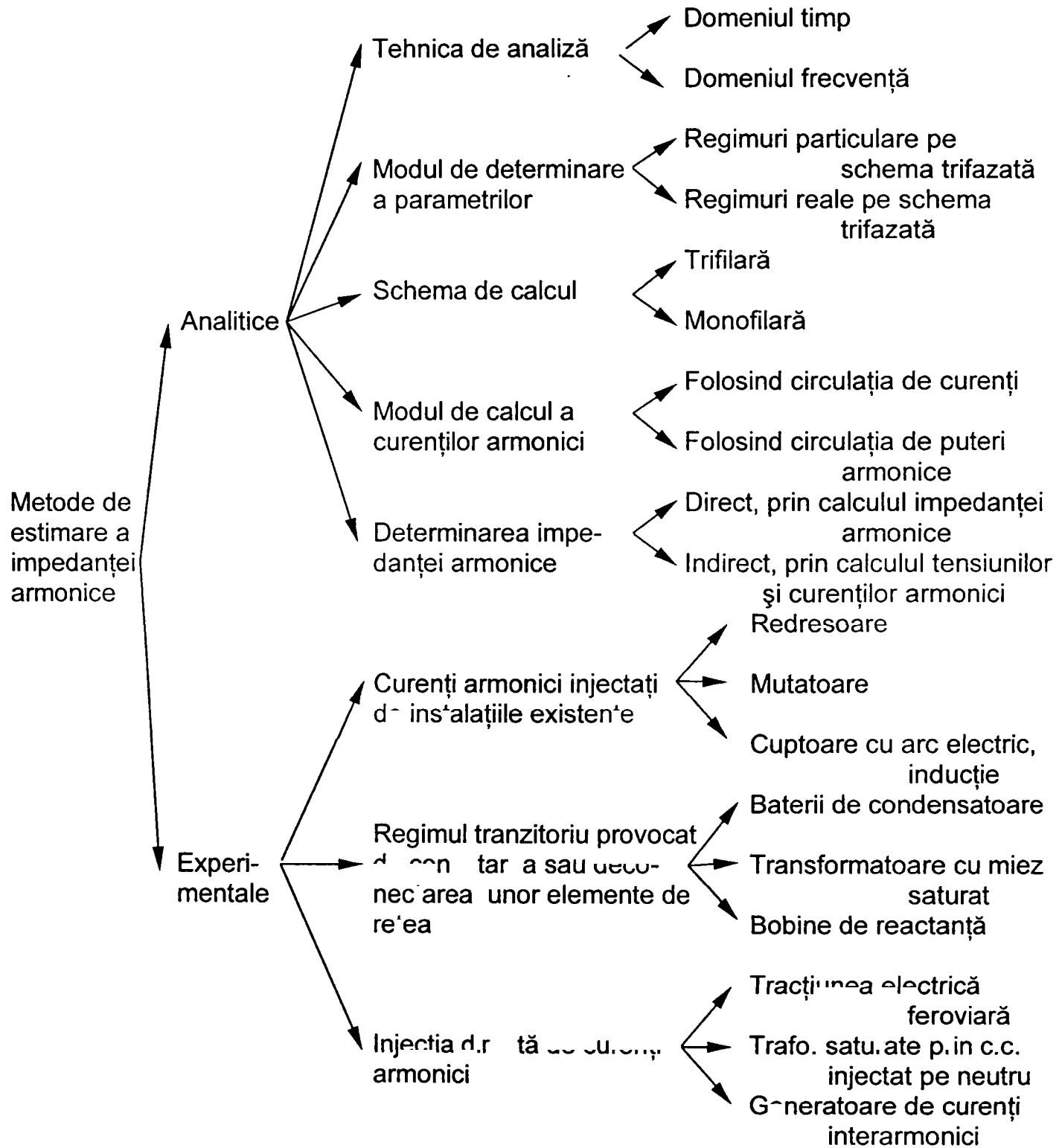
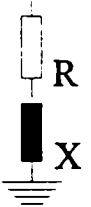
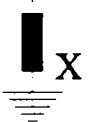
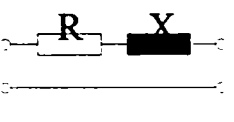
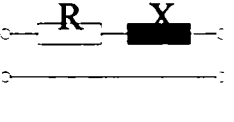
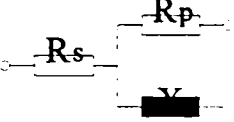
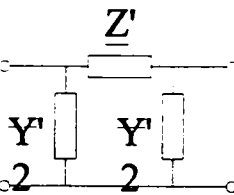
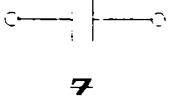


Fig. 2.11. Clasificarea metodelor de estimare a impedanțelor armonice

Tabelul 2.2 Modelarea elementelor de rețea pentru regim periodic nesinusoidal

Nr. crt.	Element de sistem	Schema echivalentă	Expresia parametrilor	Observații
1.	Generator de sincron		$X = k \cdot X_d''$ $R = \sqrt{k} \cdot 0,1 \cdot X_d''$	Corespunde unei constante de timp de 32 ms. Mai corect: $X = k \frac{X_d'' + X_q''}{2}$
2.	Sistemul electro-energetic		$X = k \cdot U_n^2 / S_{sc}$	S_{sc} – puterea de scurtcircuit pe barele sistemului
3.	Transformator cu două înfășurări		$R = \sqrt{k} \cdot R_1$ $X = k \cdot X_1$	R_1, X_1 corespund fundamentalei
			$R = R_1 \cdot (a_0 + a_1 k^b + a_2 k^b)$ $X = k \cdot X_1$	Transformatoare mici mari $a_0=0,85-0,90$ $0,79-0,97$ $a_1=0,05-0,08$ $0,10-0,13$ $a_2=0,06-0,08$ $0,10-0,15$ $b=0,90-1,4$ $0,90-0,21$
			$X = k \cdot X_1$ $R_s = X_1 / \tan \psi_1$ $R_p = 10 X_1 \cdot \tan \psi_1$	$\tan \psi_1 = \exp[0,693 + 0,796 \ln S_n - 0,042 \ln S_n^2]$ S_n - puterea nominală
4.	Linii și cabluri		$\underline{Z}' = \underline{k}_Z \cdot \underline{Z}; \underline{Y}' = \underline{k}_Y \cdot \underline{Y}$ $\underline{Z} = R_k + j \cdot X_k$ $\underline{Y} = j \cdot \omega \cdot k \cdot C$ $R_k = R_C (0,035x^2 + 0,938)$ pentru $x \leq 2,4$ $R_k = R_C (0,35x + 0,3)$ $X_k = kX_1$	$\underline{k}_Z, \underline{k}_Y$ – coeficienții lui Kennelly calculați în funcție de $k \cdot \omega_1$ $X = 0,3545 \sqrt{\frac{k}{R_C/L}}$ R_C – rezistența în curent continuu [Ω/km] L – lungimea liniei [km]
	Cabluri		$\underline{Z} = R_k^* + j \cdot X_k^*$ $R_k^* = R_k + pR_s$ $X_k^* = X_k - pX_{s1} \cdot k$ $p = 1 / [1 + (R_s / kX_{s1})^2]$	Pentru cabluri ecranate R_s, X_s – sunt parametrii ecranului $X_{s1} = \omega_1 L \cdot 210^{-4} \ln(Dm/r_s)$ $Dm = DMG$ r_s – rază ecran
5.	Condensator serie		$\underline{Z} = -j / \omega \cdot k \cdot C$	

6. Condensator şunt		$\underline{Y} = j \cdot \omega \cdot k \cdot C$	
		$R = U_n^2 / P_1$ $X_s = 0,073 \cdot k \cdot R$ $X_p = \frac{k \cdot R}{6,7 \cdot \tan \varphi_1 - 0,74}$	Model CIGRE valabil pentru $k \in [5,20]$ $\tan \varphi_1 = Q_1 / P_1$
		$R = U_n^2 / P_1$ $X = k \cdot U_n^2 / Q_1$	Model R/L
7. Consumator		$X = k \cdot U_1 = k \cdot U_n^2 / S_p$ $R = \sqrt{k} \cdot R_1 = \sqrt{k} \cdot X_1 / 3$	Model Motor S_p – puterea aparentă la pornire, corespunde la $\cos \varphi_p = 0,32$
		$R_s = U_1^2 / P_1 (1 - r)$ $X_s = \alpha \cdot k \cdot R_s$ $R_a = R_m [1 + \gamma (k f_1)^{0,5}]$ $X_a = \frac{U_1^2}{P_{1r}} \cdot X_r \cdot k \cdot [2(k f_1)^\beta]$	r - ponderea motoarelor asincrone $\alpha = Q_1 / P_1$ R_m - rezistența echivalentă serie a motoarelor pe fundamentală, se ia $(0,15 \div 0,2) X_r = 0,03 \div 0,04 u$ X_r - reactanța medie echivalentă a rotorului pe fundamentală $X_r = 0,15 \div 0,2 u \cdot r$ $\gamma = 0,15 \div 0,25$ pentru mt $0,29 \div 0,75$ pentru jt $\beta = -0,2 \div -0,1$

2.5.3 Modelarea elementelor de rețea și a consumatorilor liniari în regim periodic nesinusoidal

Legat de estimarea analitică a impedanțelor armonice trebuie fără îndoială menționat rolul modelării elementelor de rețea și a consumatorilor liniari. În acest sens o sinteză bibliografică a celor prezentate în literatură [A10], [B5], [A13], [R3] este prezentată în tabelul 2.2. Trebuie menționat însă că aici au fost prezentate aici câteva modelele existente în literatură pentru consumatori liniari, problemele de modelare dovedindu-se în general suficient de complexe [L4].

2.5.4 Propagarea regimului nesinusoidal (poluării armonice) în rețelele sistemului electroenergetic.

Odată produse de consumatorii neliniari armonicile de curent și tensiune se propagă în întreaga rețea. Estimarea acestora în diferite noduri ale rețelei se realizează efectuând calculul circulației de curenți armonici și a tensiunilor armonice.

Pentru a se putea efectua calculul circulației de curenți armonici, literatura de specialitate consemnează unele ipoteze simplificatorii asupra modului de reprezentare a consumatorului neliniar – sursa curenților armonici. Astfel [A12], [B5].

- se consideră consumatorul deformant ca o sursă ideală de curent constant pe armonica k , adică $I_k = \text{const.}$ atât în raport cu tensiunea aplicată la borne, cât și în raport cu celelalte armonici produse. Ipoteza este acoperitoare din punct de vedere al determinării amplificărilor de armonici, curenți sau tensiuni, dar nu și din punct de vedere al dimensionării filtrelor pasive. Prin introducerea unui filtru în rețea se modifică reactanța echivalentă a rețelei, ceea ce duce și la o modificare a curentului din circuitul respectiv;
- se consideră consumatorul deformant funcționând după o caracteristică de impedanță constantă pe armonica fundamentală. Cunoscând forma curbei curentului absorbit de consumator se determină mărimea armonicilor de curent în raport cu cel absorbit pe fundamentală, valorile obținute fiind considerate corespunzătoare unor injecții de curenți pe armonici;
- consumatorul deformant este considerat printr-o caracteristică neliniară. Aceasta stabilește legătura analitică între tensiunea momentană $u(t)$ aplicată la bornele consumatorului și intensitatea $i(t)$ a curentului absorbit. Caracteristica se poate liniariza pe porțiuni și se introduce apoi această caracteristică în rețeaua dată pentru care sunt scrise ecuațiile diferențiale ale regimurilor instantanee. Determinarea armonicilor de curent sau de tensiune se realizează aplicându-se o transformată de tip Fourier.

Celelalte elemente de sistem, transformatoare, linii, bobine de reactanță, consumatori liniari se reprezintă prin scheme echivalente cuadripolare pasive, valoarea parametrilor acestora depinzând de rangul armonicii. O atenție deosebită trebuie acordată pentru armonicile multiplu de trei, impedanța armonică fiind în acest caz multiplu al impedanțelor de secvență zero pe fundamentală, dacă însă consumatorul nu are neutrul legat la pământ impedanța sa armonică este infinită.

Cunoscându-se schemele echivalente armonice ale rețelelor, se poate calcula circulația curenților și tensiunilor armonice folosind procedeele de la analiza și calculul rețelelor liniare. În acest scop se fac următoarele ipoteze simplificatorii [A12], [B5]:

- se admite liniarizarea pe porțiuni sau în jurul unui punct de funcționare a caracteristicii de sarcină a consumatorului, determinată pentru un regim sinusoidal pe frecvența fundamentală;
- se utilizează o transformare liniară a funcțiilor din domeniul real al timpului, dependent de variabila k (pe baza unei transformări de tip Fourier).
- se efectuează calculele pentru un număr limitat de armonici și se asigură ordonarea ecuațiilor cu ajutorul relațiilor matriciale.

Spre exemplu, în cazul aplicării metodei tensiunilor în noduri, pentru armonica de rang k se poate scrie relația:

$$[\underline{I}_{Pk}] = [\underline{Y}_{Pk}] \cdot [\underline{U}_{Pk}] \quad (2.24)$$

unde $[\underline{I}_{Pk}]$ matricea vector a curenților electrici în nodul P al rețelei;

$[\underline{U}_{Pk}]$ matricea vector a tensiunilor nodale în nodurile P , față de nodul de referință;

$[\underline{Y}_{Pk}]$ matricea admitanță nodală, are dimensiunea de $2k$ mai mare decât matricea corespunzătoare pentru fundamentală.

Dacă se are în vedere că numai în nodurile d sunt racordați consumatori neliniari, în rest, cele notate cu l , fiind liniari, relația (2.24) devine:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{dd} & \underline{Y}_{dl} \\ \underline{Y}_{ld} & \underline{Y}_{ll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_l \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

La calculul circulației de curenți armonici o atenție deosebită trebuie acordată modelării liniilor de transport sau chiar și acelor de repartiție. Acestea trebuie considerate cu parametri uniform distribuiți chiar și în cazul unor lungimi reduse, de ordinul a zeci de km, deoarece lungimea “liniei scurte” depinde de frecvența superioară (maximă) luată în considerare.

2.5.5 Aplicații. Consumator neliniar alimentat din sistemul electroenergetic printr-o stație la care sunt racordati și consumatori liniari [B5], [M15].

Există cazuri în exploatare, când o stație de transformare (sau de distribuție) alimentează din sistem consumatori neliniari (deformanți) și liniari (fig. 2.12). În aceste cazuri se pune întrebarea cum afectează consumatorul deformant funcționarea celor liniari, a bateriei de condensatoare și firește cum se transmit armonicile de tensiune și curent sistemului.

Schema monofilară a unei astfel de stații se prezintă în fig. 2.12 și ei îi corespunde schema electrică echivalentă de calcul din fig. 2.13.

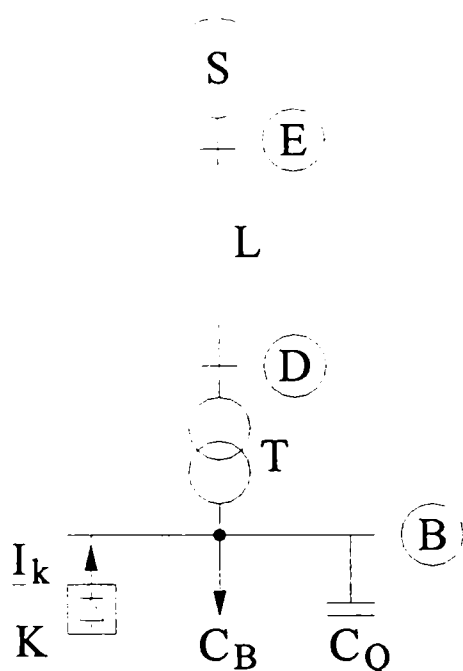


Fig. 2.12. Schema monofilară a rețelei de alimentare

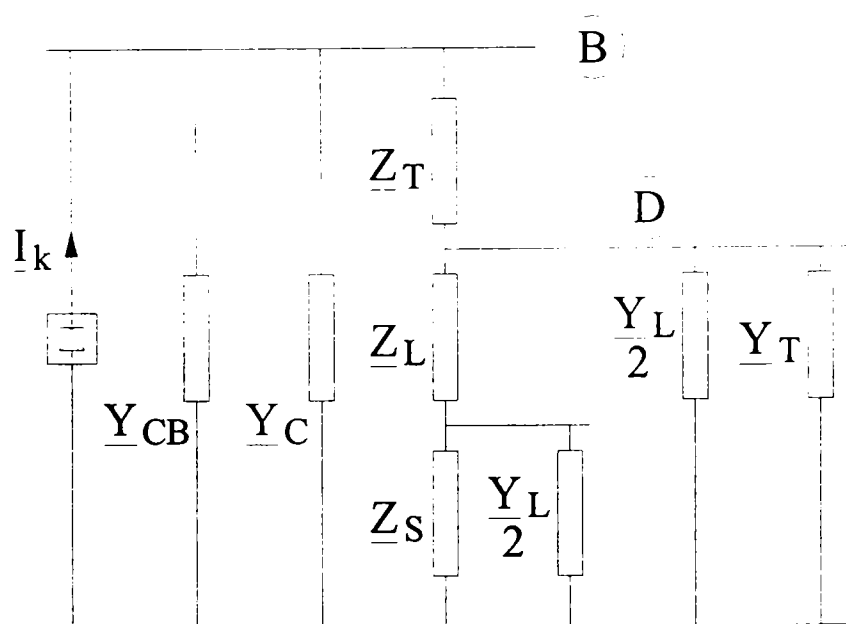


Fig. 2.13. Schema electrică de calcul a rețelei din fig. 2.12.

Notățiile consemnate pe fig. 2.13 au următoarea semnificație:

- \underline{Z}_S este impedanța armonică a sistemului S, \underline{Z}_L – impedanța armonică a liniei,
- \underline{Z}_T – impedanța armonică longitudinală a transformatorului,
- \underline{Y}_L – admitanța armonică a liniei, \underline{Y}_{CB} – admitanța armonică a consumatorului liniar,
- \underline{Y}_C – admitanța armonică a bateriei de condensatoare.

Fără îndoială că prezența consumatorului deformant afectează defavorabil atât funcționarea consumatorului liniar cât și pe aceea a bateriei de condensatoare, care poate fi suprasolicitată. În aceste condiții este util a calcula curenții armonici cu care se încarcă suplimentar bateria de condensatoare, atunci când pe barele B se aplică o tensiune

nesinusoidală. De asemenea prezintă interes modul în care consumatorul deformant și mai ales fenomenul de rezonanță armonică din rețeaua de alimentare se fac simțite în sistemul electroenergetic.

În acest scop s-au calculat coeficienții de transfer a curentului armonic la barele bateriei de condensatoare α_{IC} , la barele sistemului α_{IS} și coeficienții de propagare a tensiunii armonice la bornele sistemului α_{US} . Pentru aceste elemente s-a putut scrie:

$$\begin{aligned}\alpha_{IC} &= \frac{I_C}{I_k} = \underline{Y}_C \cdot \underline{Z}_B \\ \alpha_{US} &= \frac{U_S}{U_k} = 1 - \frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_B} - \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_B} \cdot \frac{1}{1 + (\underline{Z}_L + \underline{Z}_E)(\underline{Y}_T + \underline{Y}_L/2)} \\ \alpha_{IS} &= \frac{I_S}{I_k} = \frac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_S} \left[1 - \frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_{BI}} - \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_{BI}} \cdot \frac{1}{1 + (\underline{Z}_L + \underline{Z}_E)(\underline{Y}_T + \underline{Y}_L/2)} \right] = \alpha_{US} \cdot \frac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_S} \quad (2.26)\end{aligned}$$

unde:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_E &= \frac{\underline{Y}_L}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_S}, & \underline{Z}_E &= \frac{1}{\underline{Y}_E} \\ \underline{Y}_D &= \underline{Y}_T + \frac{\underline{Y}_L}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_E + \underline{Z}_L} \\ \underline{Z}_{BI} &= \frac{1}{\underline{Y}_D} + \underline{Z}_T,\end{aligned}$$

iar \underline{Z}_B este impedanța armonică a rețelei văzută în nodul B.

Această impedanță are expresia:

$$\underline{Z}_B = 1/[\underline{Y}_{BI} + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{CB}] = 1/[1/\underline{Z}_{BI} + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{CB}] \quad (2.27)$$

Din analiza rețelei (2.27) se constată că valoarea impedanței \underline{Z}_B este dependentă de parametrii rețelei de alimentare, ai sistemului, ai consumatorului liniar și ai bateriei de condensatoare folosite pentru compensarea puterii reactive.

Pentru elementele de rețea s-au adoptat schemele echivalente armonice prezentate în tabelul 2.2, obținându-se valorile consemnate în tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Datele de catalog și parametrii armonici ai elementelor sistemului electric.

Nr. crt.	Element Date de catalog	Mărimea variabilă, valori	Expresia parametrilor armonici
0)	1)	2)	3)
1)	Sistem Ssc = 3000 MVA Us = 115 kV	Ssc 4000 MVA 6000 MVA	$\underline{Y}_S = \frac{1}{j \cdot X_S \cdot k}$ $X_S = 4,408 \Omega$ $3,306 \Omega$ $2,204 \Omega$
2)	Line electrică aeriană Un = 110 kV L = 20 km 3x185/32 mm ² Al - OI	—	$\underline{Z}_L = R_L + j \cdot 8,164 k$ $[\Omega *]$ $R_L = 3,84 + 2,52 k$; $[\Omega], k < 9$ $R_L = 16,24 + 0,802 k$ $[\Omega *] \quad k \in [9,15]$ $R_L = 24,26 + 0,236 k$ $[\Omega *] \quad k \in [16,35]$

0)	1)	2)	3)
3)	<u>Transformator</u> Un = 110/22 kV Sn = 16 MVA Usc = 11 % ΔPsc = 97 kW ΔPg = 28 kW Ig = 1,2 %	—	$\underline{Y}_L = j \cdot 2 \cdot 0,4145 \cdot 10^{-3} k \quad [S],$ $\underline{Z}_T = 4,85\sqrt{k} + jk \cdot 83,188 \quad [\Omega]$ $\underline{Y}_T = 1,157 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{k} \right) k + \frac{1,5867 \cdot 10^{-5}}{k} \quad [S]$
4)	<u>Bateria de condensatoare</u> Un = 20 kV Qk = 0,6 Mvar	<u>Qk</u> 0,6 Mvar 1,2 Mvar 1,8 Mvar 2,4 Mvar	$\underline{Y}_{CQ} = j \cdot B_{CQ}$ $B_{CQ} = 4,959 \cdot 10^{-5} \quad [S]$ $9,917 \cdot 10^{-5} \quad [S]$ $1,488 \cdot 10^{-4} \quad [S]$ $1,983 \cdot 10^{-4} \quad [S]$
5)	<u>Consumator liniar</u> Un = 20 kV P = 2 MW Q = 1,6 Mvar	<u>Schema echivalentă</u> $\underline{Y}_{Cb} = G_C - jB_C$ $\underline{Y}_{Cb1} = G_{C1} - jB_{C1}$ $\underline{Y}_{Cb2} = G_{C2} - jB_{C2}$ $\underline{Y}_{Cb3} = G_{C3} - jB_{C3}$	$G_{C1} = 1,653 \cdot 10^{-4} \quad [S]$ $B_{C1} = 1,322 \cdot 10^{-4} \quad [S]$ $G_{C2} = 1,653 \cdot 10^{-4} \quad [S]$ $B_{C2} = \frac{1,322 \cdot 10^{-4}}{k} \quad [S]$ $G_{C3} = \frac{1,653 \cdot 10^{-4}}{Pk} \quad [S]$ $B_{C3} = \frac{1,322 \cdot 10^{-4}}{Pk} \quad [S]$ $Pk = 1,0k + 0,9$
6)	<u>Consumator deformant</u>	—	$\underline{I}_k = 1A$

Determinările au avut drept scop analiza următoarelor dependențe:

- variația cu rangul armonicii k a impedanței armonice \underline{Z}_B la bornele consumatorului, pentru cele trei de modele adoptate pentru consumatorul liniar (fig. 2.14);
- variația, cu rangul armonicii k a impedanței armonice \underline{Z}_B văzute la bornele consumatorului neliniar, pentru fiecare din cele trei modele adoptate pentru consumatorul liniar (fig. 2.15);
- variația, cu rangul armonicii a impedanței armonice \underline{Z}_B în funcție de gradul de compensare ($Q_k = 0,6; 1,2; 1,8; 2,4$ Mvar) și pentru fiecare din modelele considerate pentru consumatorul liniar (fig. 2.16);
- variația, cu rangul armonicii a impedanței armonice \underline{Z}_B în funcție de puterea de scurtcircuit a sistemului, pentru un anumit model al consumatorului liniar (spre exemplu acela în care G_k este independent de k iar B_k dependent de k și un anumit grad de compensare (spre exemplu $Q_k = 0,6$ Mvar), (fig. 2.17);

- variația cu rangul armonicii a coeficientului de transfer a curentului armonic la bornele bateriei de condensatoare, α_{IC} , pentru fiecare model adaptat pentru consumatorul liniar și un anumit grad de compensare ($Q_k = 0,6$ Mvar), (fig. 2.18);
- variația cu rangul armonicii a coeficientului de propagare a tensiunii armonice la barele sistemului, α_{US} , în funcție de modelul adoptat pentru consumatorul liniar și pentru un anumit grad de compensare ($Q_k = 0,6$ Mvar), (fig. 2.19);
- variația cu rangul armonicii a coeficientului de transfer al curentului armonic pe barele sistemului, α_{IS} , în funcție de modelul adoptat pentru consumatorul liniar și pentru un anumit grad de compensare ($Q_k = 0,6$ Mvar), (fig. 2.20).

Din analiza celor prezentate în fig. 2.15 – 2.20 rezultă următoarele:

- impedanța armonică Z_B prezintă aceeași formă de variație indiferent de modelul adoptat pentru consumatorul liniar. Cantitativ însă valorile cele mai mici corespund modelului mai simplu ($G_c = ct., B_c = ct.$) iar cele mai mari modelului mai complicat ($G_c, B_c = \varphi(k)$)

În jurul armonicii a 12-a apare o amplificare locală a valorii impedanței armonice, iar apoi după o scădere bruscă impedanța armonică crește aproape liniar, valorile maxime fiind înregistrate pentru modelul cel mai complex al consumatorului liniar. Dacă la armonică a 12-a diferența dintre valorile extreme ale lui Z_B este de cca. 20%, la armonică 35 ea ajunge la cca. 33%. Prin urmare valorile impedanței armonice pentru o treaptă de compensare dată depinde semnificativ de modelul armonic adoptat pentru consumatorul liniar. Cu cât modelul este mai simplu, adică parametrii lui sunt independenți de rangul armonicii, cu atât valorile impedanței armonice sunt mai reduse.

- pentru aceeași putere activă consumată forma de variație a impedanței armonice Z_B nu este sensibil influențată de puterea (gradul) de compensare. Cantitativ însă apar modificări sensibile și anume, cu cât gradul de compensare este mai mare cu atât și amplitudinea impedanței este mai mare, aceasta pentru același model al consumatorului liniar. Dar, pentru același grad de compensare evident considerarea unui model mai simplu pentru consumatorul liniar conduce la valori mai reduse pentru impedanța armonică. Astfel pentru treapta minimă de compensare (0,6 Mvar) se înregistrează la $k=12$, valorile de 1350Ω ; 1500Ω ; 1670Ω , iar pentru treapta maximă de compensare (2,4 Mvar) valorile 1600Ω ; 1850Ω ; 2100Ω . Deci în condiții de supra-compensare valorile impedanței armonice cresc rapid. La compensare minimă diferența dintre modele conduce la o abatere între valorile lui Z_B de 15,63% iar la compensare maximă de 21,0% (raportarea efectuându-se la valoarea maximă a impedanței);
- odată cu creșterea puterii de scurtcircuit a sistemului ce alimentează stația electrică (3000; 4000; 6000 MVA), frecvența de rezonanță armonică se deplasează spre valori mai mari ($k=12$ pentru 3000 MVA; $k=13$ pentru 4000 MVA și $k=14$ pentru 6000 MVA); amplitudinea impedanței armonice (valoarea impedanței la rezonanță armonică) nu se modifică practic (fig. 2.18);
- în ceea ce privește variația coeficienților de transfer a curenților armonici α_{IC} și respectiv α_{IS} se constată că aceasta este influențată de tipul modelului adoptat pentru consumatorul liniar. Desigur, variația mai accentuată o prezintă α_{IC} înregistrând pentru rangul $k>20$ variații sensibil mai mari pentru modelul mai complex (G_c și B_c dependente de rangul armonicii). Cu toate acestea valorile lui α_{IC} sunt relativ mici,

nedeapășind pentru $k=40$ valorile de 0,2 (fig. 2,20). O sensibilitate mult mai scăzută cu tipul modelului adoptat pentru consumatorul liniar prezintă și variația lui α_{IS} , aproape constantă în intervalul $k \in [2,40]$, dar valorile atinse sunt mult mai mari. Pentru un grad relativ mic de compensare ($Q_C = 0,6$ Mvar) la rezonanță, α_{IS} atinge valori de cca. 8 – 9 pentru $k = 13$ și 2,5 – 3,5 pentru $k = 31$ (fig. 2.21). Observații asemănătoare se pot face și asupra lui α_{US} . Valorile acestuia nu sunt influențate de forma (tipul) modelului adoptat pentru consumatorul liniar. Apar la cele două frecvențe însă ($k = 13$ $k = 31$) rezonanțe armonice care conduc la valori amplificate sensibil față de valorile obișnuite ($\alpha_{US}=0,56$ pentru $k = 13$ și $\alpha_{US}=0,175$ pentru $k = 31$) (fig. 2.22);

- variația coeficienților de propagare este sensibilă și cu gradul de compensare. Astfel dacă la o compensare a puterii reactive de 37,5% (treapta de 0,6 Mvar) α_{IC} nu depășește valoarea de 0,1; pentru o compensare de 150% (treapta de 2,4 Mvar) acesta atinge la rezonanță, valoarea de 0,32 pentru primul model al consumatorului liniar, 0,36 pentru cel de al doilea (fig. 2.24) și 0,44 pentru cel de al treilea model al consumatorului liniar. Nu întru totul sunt cele constatate în cazul lui α_{IS} . Amplitudinea acestuia la prima rezonanță armonică ($k = 13$) nu este practic influențată de treapta de compensare (fig. 2.25, fig. 2.26, fig. 2.27); și nici de modelul adoptat pentru consumatorul liniar. În schimb la a doua rezonanță armonică ($k = 31$) se constată o sensibilitate mai pronunțată a valorii lui α_{IS} atât cu gradul de compensare, cât și cu modelul adoptat pentru consumatorul liniar. Valorile maxime ($\alpha_{IS} \cong 6$) sunt atinse la compensarea maximă ($Q_k = 2,4$ Mvar) și modelul al treilea al consumatorului liniar. O sinteză a valorilor celor doi coeficienți de transfer a curenților armonici α_{IC} și respectiv α_{IS} în funcție de modelul adoptat pentru consumatorul liniar și gradul de compensare, se prezintă în tabelul 2.4.

Tabelul 2.4 Valorile coeficienților de transfer a curenților armonici α_{IC} , α_{IS} la rezonanță armonică (paralel)

Grad de compensare	α_{IC}						α_{IS}					
	Model consumator liniar						Model consumator liniar					
Q_k [Mvar]	1		2		3		1		2		3	
<u>37,5%</u> 0,6	0,36	0,08	0,081	0,12	0,107	0,165	7,9	2,5	8,3	2,9	9,5	3,5
<u>78%</u> 1,2	0,135	0,21	0,16	0,272	0,198	0,34	7,95	2,55	8,43	3,58	9,61	4,1
<u>89%</u> 1,8	0,22	0,352	0,26	0,47	0,31	0,593	8,1	2,97	8,50	4,12	9,72	7,95
<u>150%</u> 2,4	0,32	0,52	0,36	0,725	0,44	0,936	8,14	3,4	8,62	4,4	9,8	6,0

Din analiza celor înscrise în tabelul 2.4 rezultă necesitatea de a studia foarte atent modul de calcul a coeficienților de transfer ai curentului armonic atât pentru curentul absorbit de bateria de compensare, cât și pentru acela injectat în sistem.

- valorile coeficienților de transfer depind și de puterea de scurtcircuit a sistemului, în condițiile unei trepte de compensare date și a unui anumit model armonic impus pentru consumatorul liniar. Astfel coeficientul α_{IC} depinde foarte puțin de valoarea

puterii de scurtcircuit, doar așa cum era și de așteptat, valoarea sa maximă apare la frecvențe diferite ($k = 12; 13$ respectiv 14) pentru S_{sc} diferite ($12; 13; 14$), fig. 2.28. Coeficientul α_{IS} prezintă valori diferite dependent de mărimea puterii de scurtcircuit a sistemului (fig. 2.29), în plus frecvențele de rezonanță armonică apar la frecvențe diferite, odată cu creșterea puterii de scurtcircuit, rezonanța armonică deplasându-se spre valori mai mari ($k = 13; 31$ pentru $S_{sc} = 3000$ MVA; $k = 14; 33$ pentru $S_{sc} = 4000$ MVA; $k = 15; 39$ pentru $S_{sc} = 6000$ MVA). Interesant însă că valorile maxime ale lui α_{IS} scad cu creșterea puterii de scurtcircuit la prima rezonanță armonică și cresc la a doua (cu cca. $30 \div 40 \%$), situându-se între valorile $3 \div 8$ deloc de neglijat. Coeficientul de propagare a tensiunii armonice α_{US} prezintă variații sensibil diferite ale lui S_{sc} mai ales în domeniul frecvențelor reduse ($k < 17$). Valorile maxime apar la prima rezonanță armonică și ele sunt $0,56$ pentru $S_{sc} = 3000$ MVA; $0,33$ pentru $S_{sc} = 4000$ MVA; și $0,19$ pentru $S_{sc} = 6000$ MVA. La a doua rezonanță armonică valorile sunt mai apropiate și ele nu depășesc valoarea de $0,18$ (fig. 2.30).

Toate cele prezentate mai sus au evidențiat rolul pe care-l joacă modelarea armonică în estimarea valorilor curenților și tensiunilor armonice în diverse noduri ale unei rețele poluate armonic. De asemenea trebuie remarcat contribuția unor elemente: bateria de compensare, sistemul de alimentare, care prin puterea lor pot atenua sau amplifica poluarea armonică produsă de consumatorul neliniar.

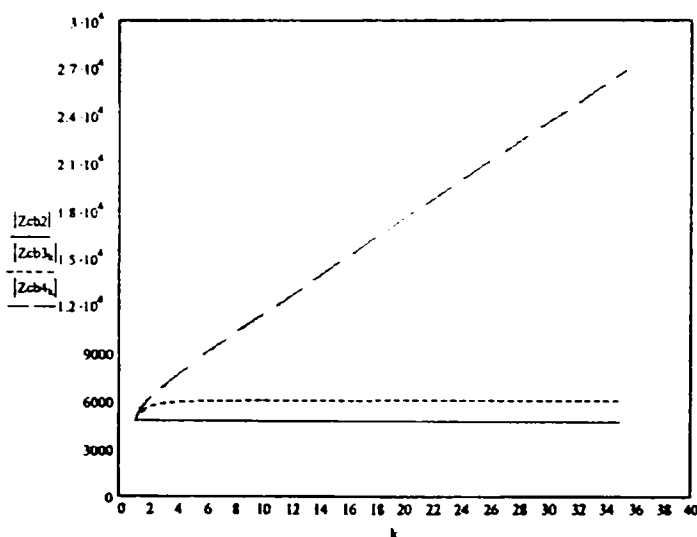


Fig. 2.14 Variația impedanței armonice echivalente consumatorului liniar (Modelul 1; 2; 3)

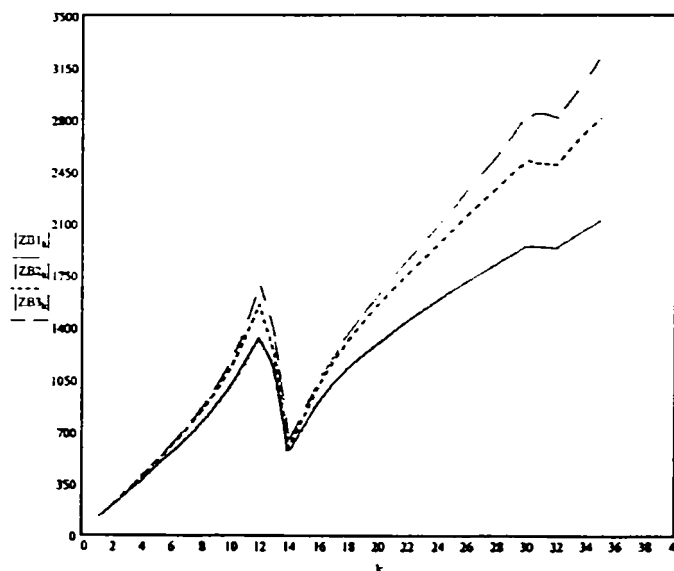


Fig. 2.15 Variația valorii impedanței armonice pe barele consumatorului neliniar (Z_B) pentru fiecare tip de model al consumatorului liniar.

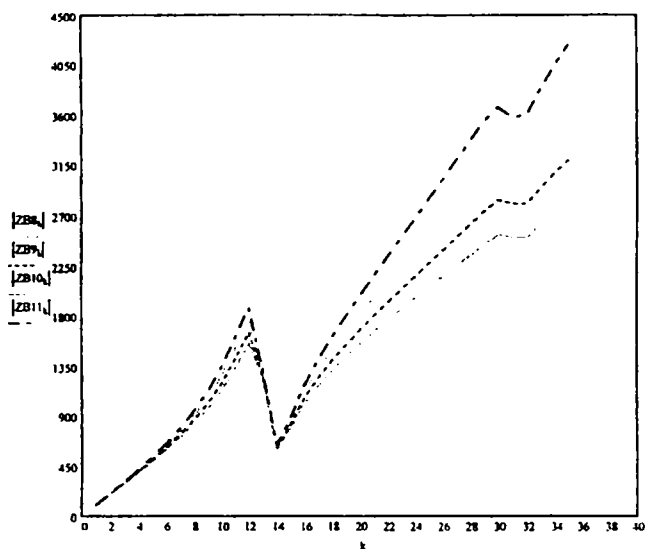


Fig. 2.16 Variația valorii impedanței armonice (Z_B) cu puterea de compensare ($Q_k = 0,6; 1,2; 1,8; 2,4$) în condițiile modelului 1 al consumatorului liniar.

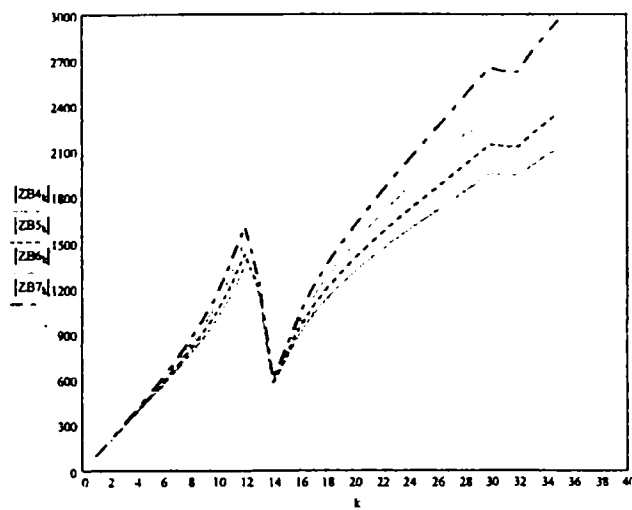


Fig. 2.17 Variația valorii impedanței armonice (Z_B) cu puterea de compensare ($Q_k = 0,6; 1,2; 1,8; 2,4$) în condițiile modelului 2 al consumatorului liniar.

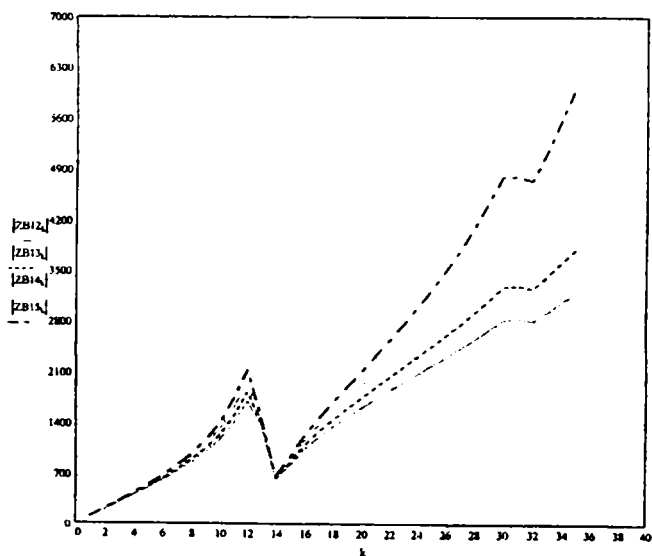


Fig. 2.18. Variația valorii impedanței armonice (Z_B) cu puterea de compensare ($Q_k = 0,6; 1,2; 1,8; 2,4$) în condițiile modelului 3 al consumatorului liniar.

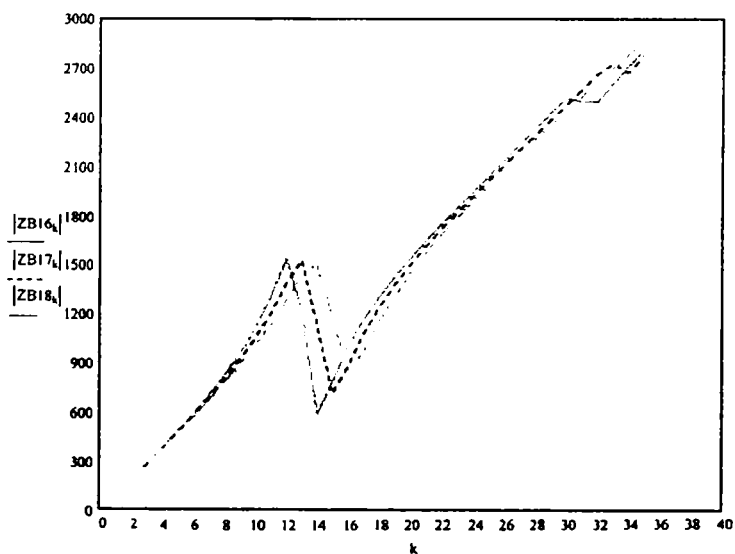


Fig. 2.19. Variația valorii impedanței armonice (Z_B) cu puterea de scurtcircuit a sistemului ($S_{sc} = 3000; 4000; 6000$ MVA) și în condițiile modelului 3 al consumatorului liniar.

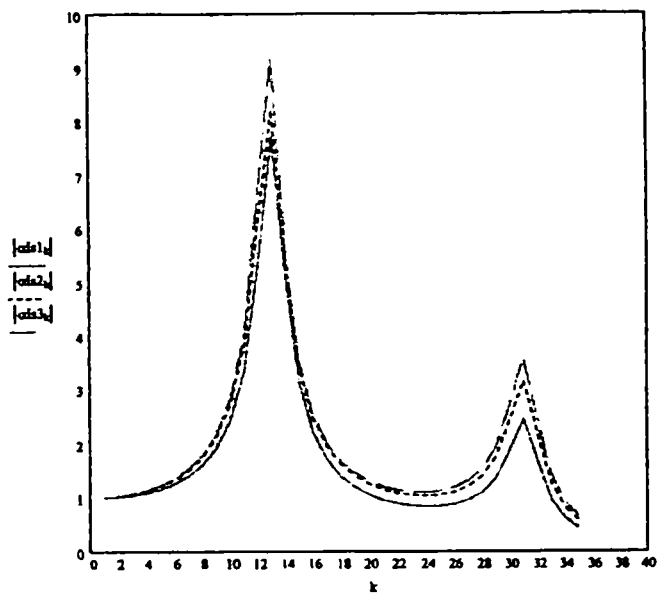


Fig. 2.20 Variația coeficientului α_{IC} cu k și tipul modelului armonic al consumatorului liniar ($1 < 2 < 3$)

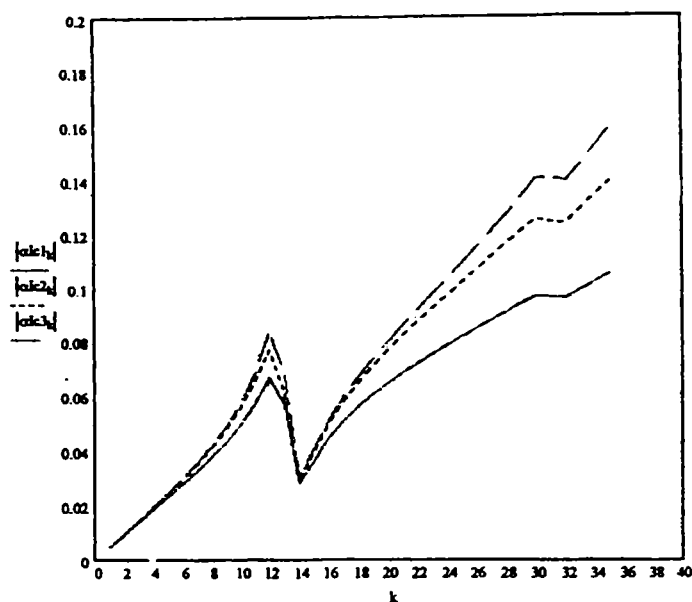


Fig. 2.21 Variația coeficientului armonic α_{IS} cu k și tipul modelului al consumatorului liniar ($1 < 2 < 3$)

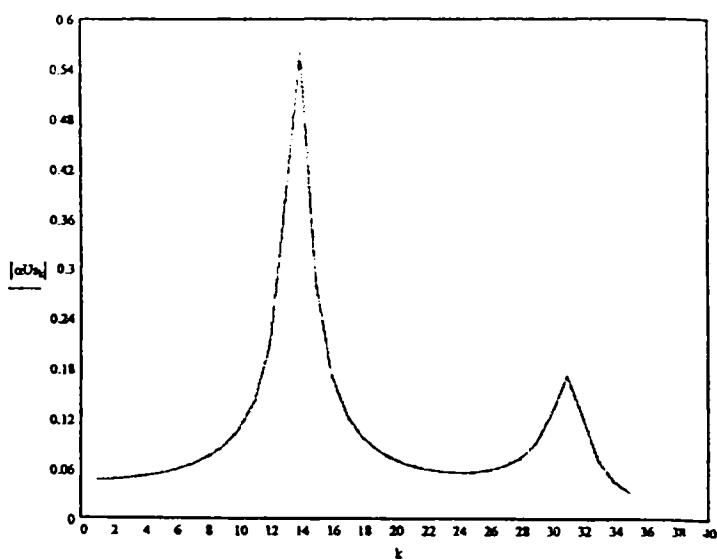
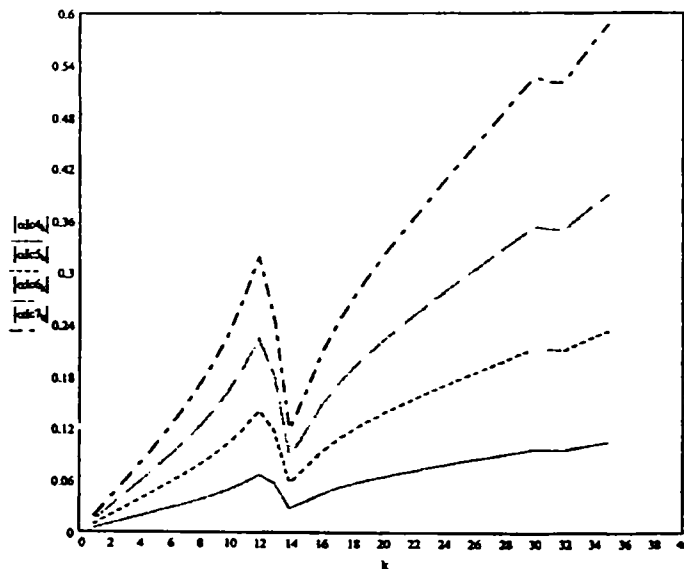


Fig.2.22. Variația coeficientului armonic α_{US} cu rangul armoniciei (k) și tipul modelului al consumatorului liniar



2.23. Variația coeficientului armonic α_{IC} cu rangul armoniciei (k) puterea de compensare $Q_k = 0.6; 1.2; 1.8; 2; 4$ MVar

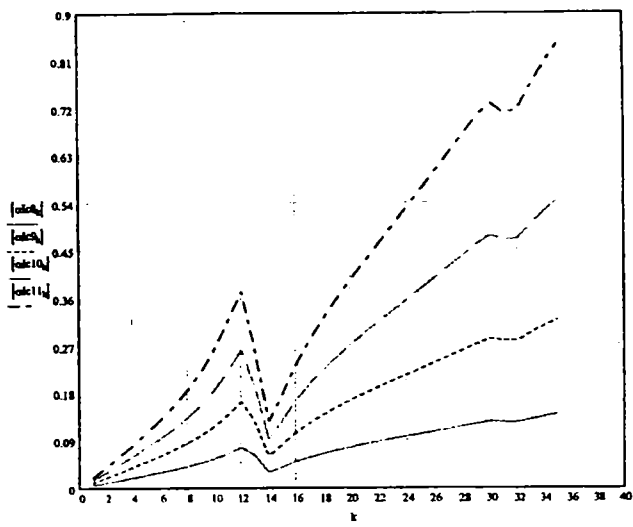


Fig.2.24. Variația coeficientului α_{1c} cu rangul armonicii (k) și puterea de compensare $Q_k = 0.6; 1.2; 1.8; 2; 4$ MVar pentru modelul 2 al consumatorului liniar.

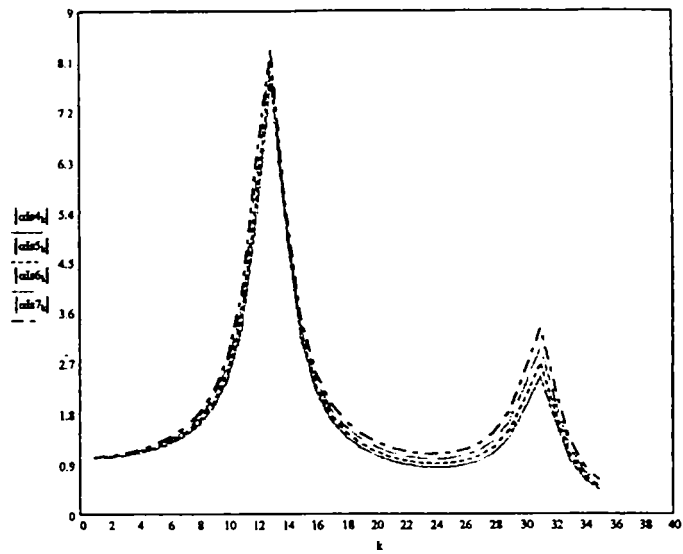


Fig.2.25. Variația coeficientului α_{1s} cu rangul armonicii (k) și puterea de compensare $Q_k = 0.6; 1.2; 1.8; 2; 4$ MVar pentru modelul 1 al consumatorului liniar.

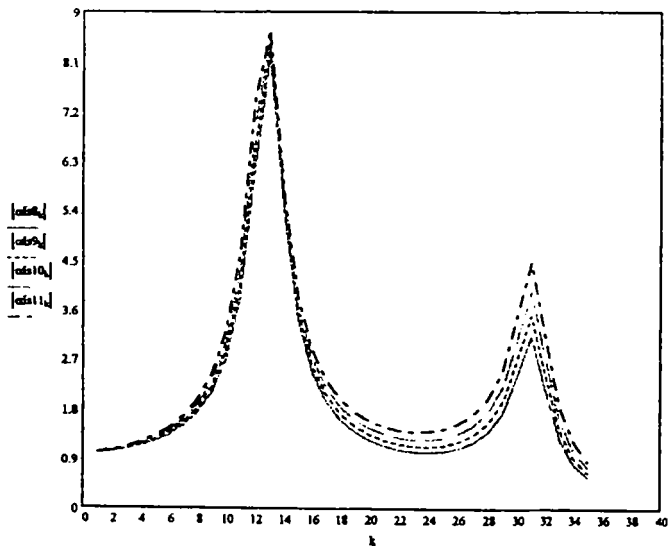


Fig.2.26. Idem cu 2.25 pentru modelul 2 al consumatorului liniar

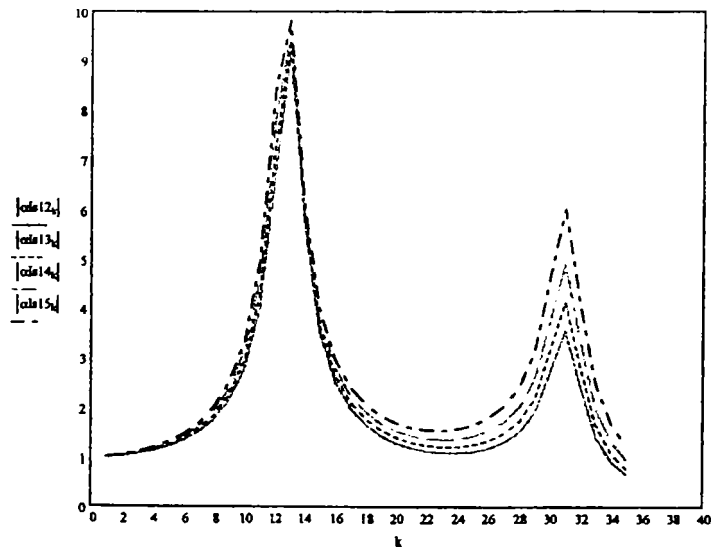


Fig.2.27. Idem cu 2.26 pentru modelul 3 al consumatorului liniar

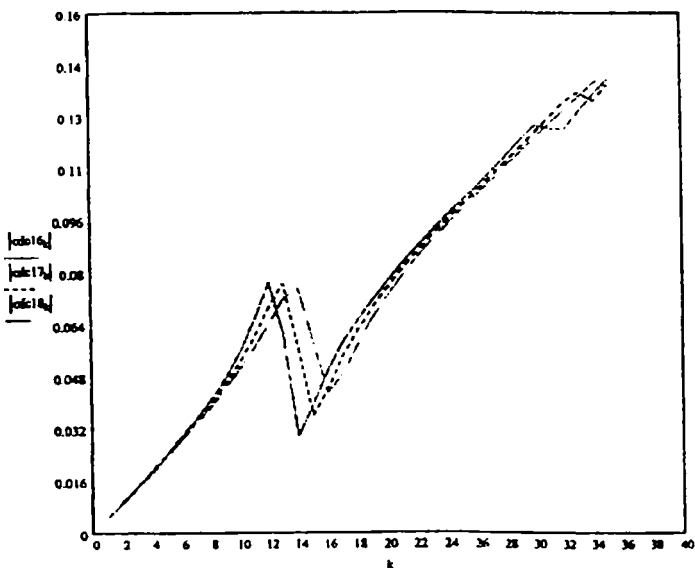


Fig. 2.28. Variația coeficientului α_k cu rangul armonicii (k) și puterea de scurt circuit a sistemului $S_{Sc} = 3000,4000,6000\text{MVA}$, pentru $Q_k = 0,6\text{MVar}$ și modelul 3 al consumatorului liniar

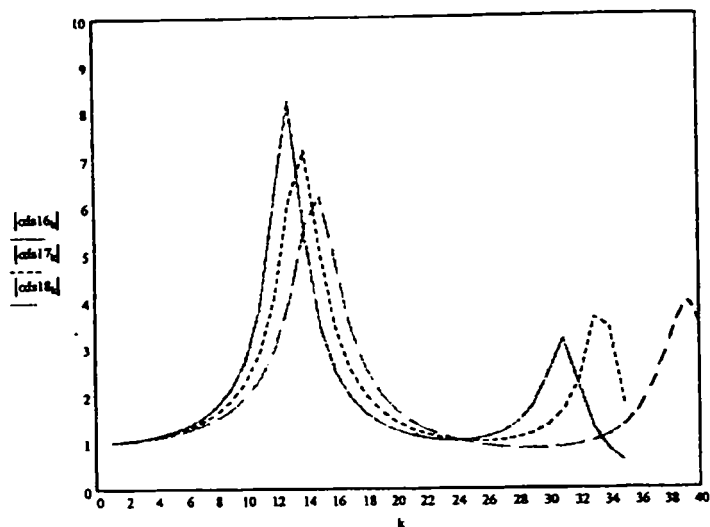


Fig.2.29. Variația coeficientului α_{Is} cu rangul armonicii (k) și puterea de scurt circuit a sistemului $S_{Sc} = 3000,4000,6000\text{MVA}$, pentru $Q_k = 0,6\text{MVar}$ și modelul 3.

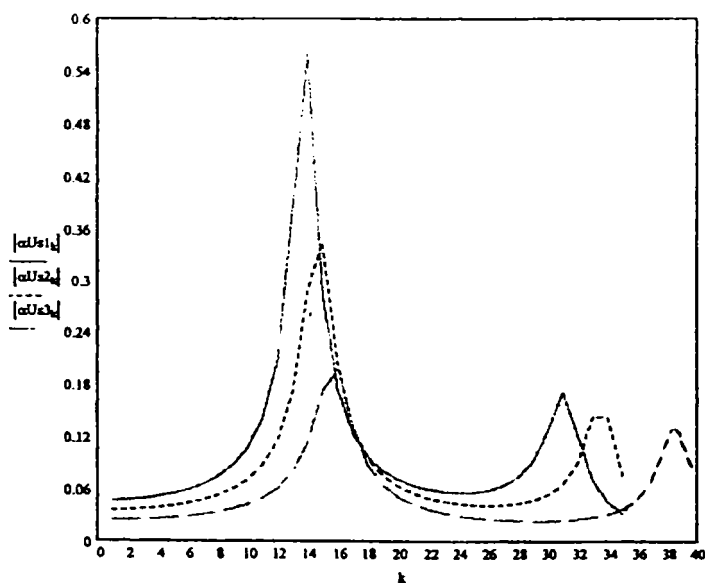


Fig.2.30. Variația coeficientului α_{Is} cu rangul armonicii (k) și puterea de scurtcircuit $S_{Sc} = 3000,4000,6000\text{MVA}$ pentru $Q_k = 0.6\text{MVar}$ și modelul 3.

2.6. Preocupări și tendințele în domeniul analizei regimului nesinusoidal al rețelelor electrice

În condițiile celor prezentate în paragrafele anterioare ale acestui capitol trebuie subliniat faptul că literatura de specialitate cunoaște în ultima vreme o intensificare a preocupărilor orientate spre analiza regimului nesinusoidal și aceasta legat de faptul că regimul nesinusoidal este perceput într-un cadru mai larg și anume acela al compatibilității electromagnetice (directiva nr.89/336/CEE-1989 [M15]). În comunitatea europeană această directivă consideră oficial perturbațiile electromagnetice drept poluare, obligând țările membre ale CEE să limiteze emisia perturbațiilor și să asigure materiale și echipamente cu o imunitate corespunzătoare față de aceste perturbații.

Dovada elocventă a acestei preocupări o reprezintă numărul mare de lucrări publicate în legătură cu acest subiect în principalele reviste de specialitate: IEEE Transaction on Power Delivery, IEEE Transaction on Industry Applications, ETEP, ELECTRA, Energetica etc. Din doi în doi ani, în luna octombrie are loc Conferința internațională în domeniul calității energiei electrice (International Conference of Harmonics and Quality of Power). Cea de-a opta conferință a avut loc la Atena, 1998 și a prezentat secțiuni de Power Theories, Power Conditioning, Network Modeling / Analysis, Statistical Analysis Methods, Device and Load Modeling, measurement și altele. Toate acestea dovedesc interesul sporit al specialiștilor pentru aprofundarea problemelor legate de analiza regimului nesinusoidal periodic al rețelelor electrice. În acest sens în fig.2.31 sunt prezentate sintetic direcțiile în domeniul regimului nesinusoidal. Fără îndoială unele sunt legate nemijlocit de problemele de identificare în sensul larg al teoriei sistemelor și aplicarea tehnicilor generale de identificare / estimare la particularitățile sistemului electroenergetic. Altele dezvoltă probleme teoretice specifice electrotehnicii și care au menirea să adâncească pe de o parte modelele matematice, pe de altă parte să surprindă și momente de timp cât mai reduse. Din prima categorie se pot menționa [A12], [B5], [M15], [R3]:

- metode de identificare / estimare a semnalelor armonice;
- utilizarea rețelelor neuronale artificiale (RNA) pentru detecția și monitorizarea armonicilor SEE;
- cercetări privind modelarea și evaluarea probabilistică a armonicilor din SEE;
- metodologii de amplasare optimală a senzorilor pentru estimarea localizării surselor de armonici.

Din a doua categorie se menționează cercetări legate de definirea puterilor, estimarea pierderilor de putere și energie, definirea factorului de putere.

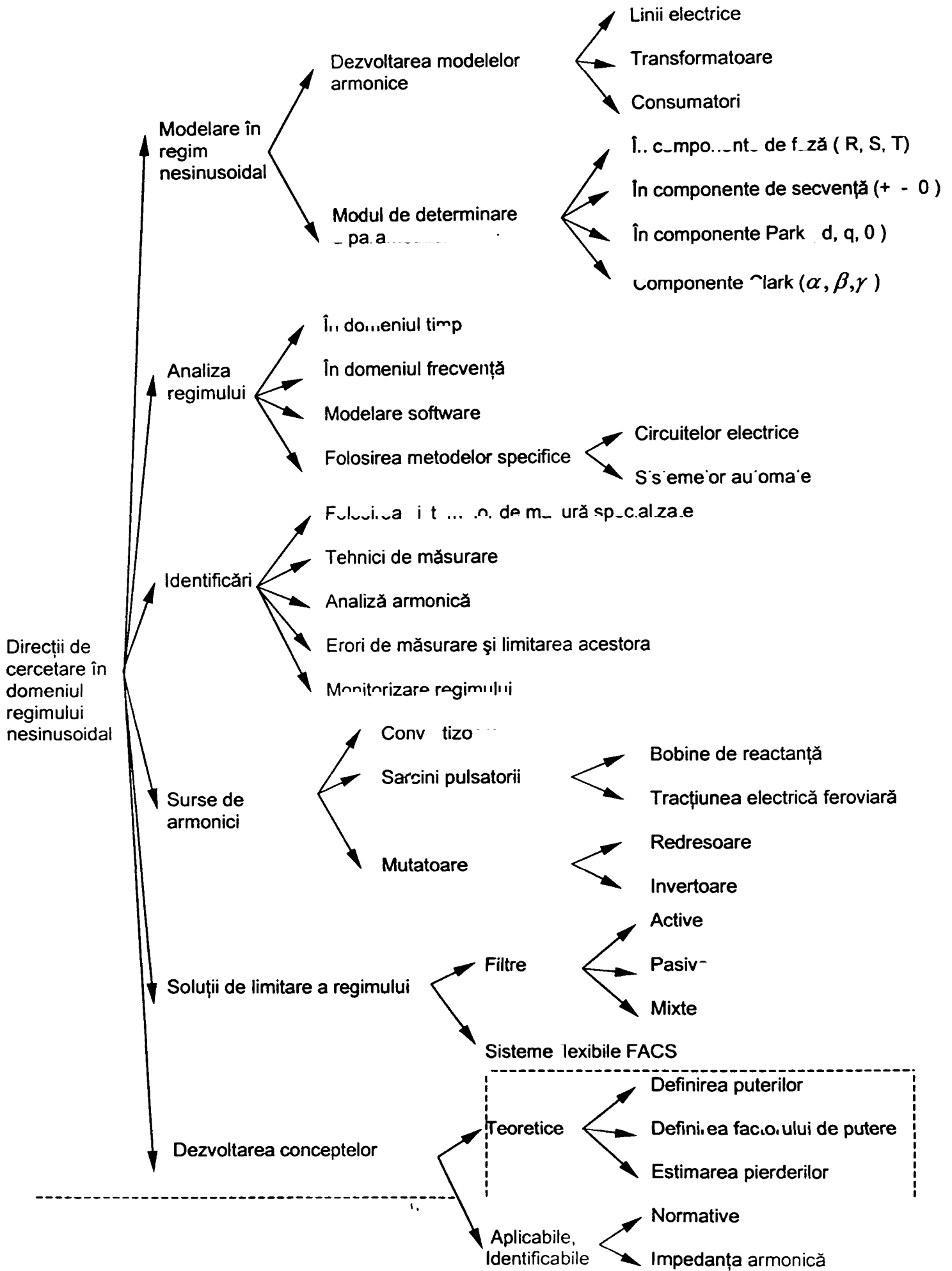


Fig.2.31. Direcții de cercetare în domeniul regimului nesinusoidal

2.7. Concluzii și contribuții originale

Scopul acestui capitol a fost acela de a prezenta problemele principale pe care le comportă studiul regimului nesinusoidal periodic provocat de consumatorii neliniari ai sistemelor electroenergetice. În acest scop au fost enumerate cauzele regimului nesinusoidal, principalii indicatori de calitate a tensiunii și curentului în rețele poluate armonice, circulația de puteri ce alimentează consumatori neliniari, problematica impedanței armonice, preocupări și tendințe în domeniul analizei regimului nesinusoidal al rețelelor electrice.

Desigur s-a insistat mai mult asupra efectelor poluării armonice, în cadrul acestora pe efectele energetice: creșterea pierderilor de putere și energie în rețele electrice, înrăutățirea factorului de putere, creșterea potențialului neutrului pentru conexiunile Y_0 ale transformatoarelor sau consumatorilor, impedanța armonică.

Referitor la creșterea pierderilor de putere și energie în conductoarele liniilor electrice aeriene s-a arătat că rezistența în curent alternativ este dependentă de frecvența (rangul armonicii) și că aproximarea variației rezistenței conductoarelor cu \sqrt{k} nu este prea pesimistă, mult mai exact fiind aproximații de forma $R_1 / R_k = \exp[1/(a + b/k^2)]$ sau $R_1 / R_k = \exp[1/(a + b/k)]$.

Probleme delicate comportă și analiza creșterii potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor sau receptoarelor. Tensiunea (potențialul) punctului neutru depinde de raportul impedanțelor fază neutru, iar aceasta din urmă poate avea diferite valori și caractere, dependent de regimul neutrului și de condițiile normale sau de avarie în care aceasta poate funcționa. Este evidențiată și situația particulară a rețelelor tratate cu bobină de stingere prin BPN (bobină pentru formarea neutrului artificial) în condițiile apariției punerii la pământ.

O atenție sporită s-a acordat prezentării circulației de puteri în rețele ce alimentează consumatori neliniari, subliniindu-se faptul că sursa de curenți armonici este consumatorul neliniar. Prin analogie cu regimul nesimetric și în acest regim nesinusoidal periodic se poate construi un model matematic pentru determinarea tensiunii în nodul în care este racordat consumatorul neliniar, ca de fapt și pentru tensiunile din oricare din nodurile rețelei.

Impedanța armonică este un mijloc important și util de analiză a regimului nesinusoidal dar definiția acesteia dată de CIGRE (ca impedanță de secvență directă) nu poate fi generalizată pentru toate categoriile de rețele. În rețelele de alimentare ale consumatorilor apar diferențe sensibile între impedanțele armonice de secvență pozitivă și cele de secvență negativă, media impedanțelor de fază fiind practic egală cu impedanța pozitivă sau negativă, după cum rangul armonicii este $6k+1$ sau $6k-1$. În cadrul aceluiași paragraf un spațiu adecvat este alocat și aplicației care evidențiază utilitatea cunoașterii impedanței armonice în problemele de propagare a poluării armonice în rețele electrice. Rezultatele obținute atestă încă o dată necesitatea modelării armonice cât mai îngrijite pentru studiile de propagare a regimului nesinusoidal. Modelul adoptat pentru consumatorul liniar, gradul de compensare al puterii reactive și puterea de scurt circuit a sistemului sunt factori importanți în rezultatele calitative ale procesului de propagare a poluării armonice. Capitolul se încheie cu o sinteză a direcțiilor de cercetare în domeniul regimului nesinusoidal.

Contribuțiile aduse de autor în acest capitol se referă la:

- *prezentarea sintetică a efectelor negative a poluării armonice asupra elementelor sistemului electroenergetic;*
- *stabilirea a două expresii analitice pentru rezistența armonică a conductoarelor AI - OI folosite la linii electrice aeriene;*
- *evidențierea unor aspecte particulare în problemele legate de cunoașterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor și consumatorilor, este vorba de rețele de medie tensiune tratate cu bobină de stingere ce folosesc pentru formarea neutrului BPN - uri;*
- *extinderea definiției impedanței armonice dată de CIGRE în condițiile rețelelor de medie și mai ales de joasă tensiune;*
- *prezentarea sintetică a metodelor de estimare a impedanțelor armonice a rețelelor electrice;*
- *concluziile desprinse din analiza rezultatelor obținute din efectuarea aplicației referitoare la propagarea regimului nesinusoidal, este vorba în primul rând de influența pe care o prezintă asupra coeficienților de propagare a curentului și tensiunii armonice, modul de reprezentare a consumatorului liniar, puterea de scurt circuit a sistemului și gradul de compensare a puterii reactive. După cele deduse în legătură cu prima rezonanță armonică, aspecte noi sunt relevate în ceea ce privește a doua rezonanță armonică.*

**PROBLEMA PUTERILOR LA SISTEMELE TRIFAZATE IN REGIMURI
SINUSOIDALE NESIMETRICE SI REGIMURI PERIODICE
NESINUSOIDALE**

3.1 Problema puterilor la sistemele trifazate în regimuri nesimetrice

3.1.1. Puteri instantanee în regimuri nesimetrice. Putere fluctuantă.

În analiza sistemelor trifazate nesimetrice prezintă interes și cunoașterea puterilor instantanee, deoarece acestea pot furniza informații utile privind gradul de nesimetrie al acestora. Pentru început, se face referire însă la componentele puterii instantanee în cazul circuitelor monofazate. Se știe că, dacă unui circuit monofazat i se aplica tensiunea la borne $u=U\sqrt{2} \sin \omega t$ și se stabilește curentul $i=I\sqrt{2} \sin (\omega t-\varphi)$, expresia puterii instantanee $p(t) = u(t) i(t)$, este :

$$p(t) = 2 \cdot UI \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (3.1)$$

evident, fiind posibile și alte descompunerii ale puterii instantanee [A8, S2]

Variația puterii instantanee (rel. 3.1) se poate urmări calitativ în fig.3.1. Se vede că, puterea instantanee variază cu dublul frecvenței de alimentare în jurul componentei constante, care este tocmai puterea activă $P = UI \cos \varphi$.

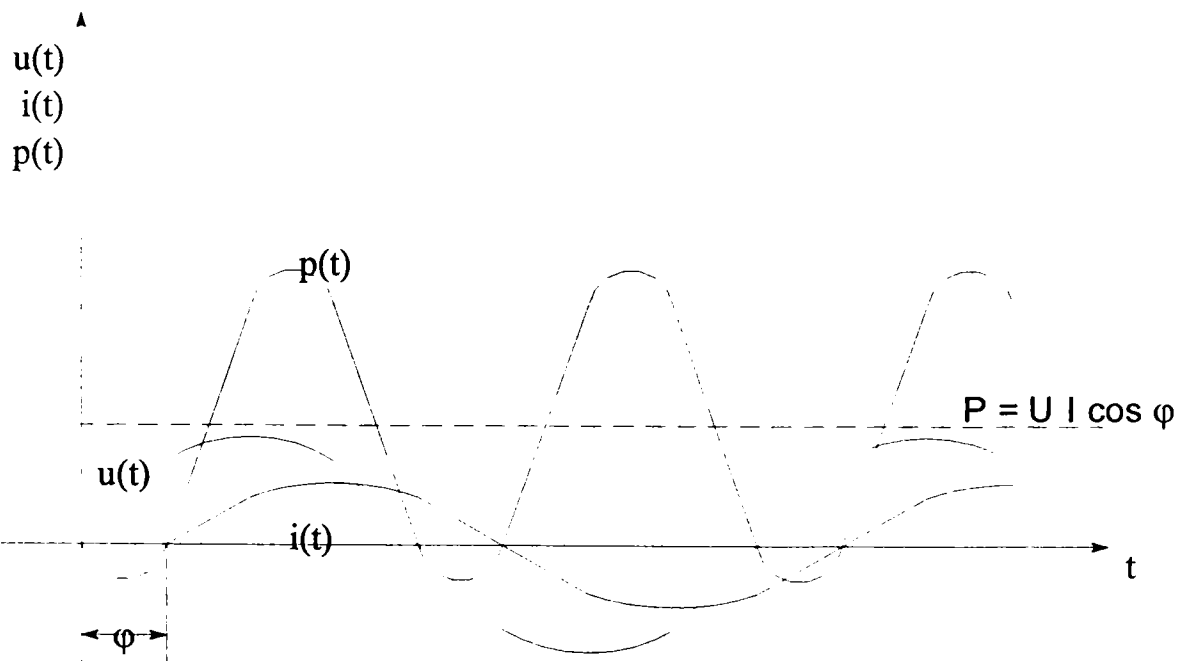


Fig.3.1. Reprezentare grafică a variației curent , tensiune și putere electrică

Cealaltă componentă a puterii instantanee (rel. 3.1) și anume $UI \cos(2 \omega t-\varphi)$, reprezintă o variație armonică de amplitudine egală cu puterea aparentă $S = UI$ și se numește putere fluctuantă [A9], valoarea sa medie pe o perioadă sau pe un multiplu de perioadă fiind nula.

Pentru o anumită valoare a defazajului φ dintre tensiune și curent, puterea instantanee variază deci între limitele (P-S) și (P+S), banda de variație fiind prin urmare 2UI. Într-o lucrare recent apărută [P16], se sugerează ideea, ca ar fi posibil să se aprecieze puterea aparentă pe această cale și într-un regim nesinusoidal. În lucrarea menționată, se propun și unele soluții practice de determinare a unui factor de putere mediu. De asemenea, se mai propune determinarea unei variații sinusoidale echivalente variației nesinusoidale reale, pe baza unui anumit criteriu energetic.

Expresiei (3.1) i se poate da și o interpretare geometrică interesantă ce se poate urmări în fig.3.2. Într-un sistem de reprezentare grafică cu două axe de coordonate se reprezintă puterea aparentă S prin vectorul fix OO_1 , care formează cu axa origine de fază (abscisa) unghiul φ . Proiecția OA pe axa origine de fază este puterea activă $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$, iar proiecția OB a segmentului fix OO_1 pe axa coordonatelor este puterea reactivă $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$ [A9].

Din punctul fix O_1 , ca centru se descrie un cerc cu raza $O_1M = u(t) \cdot i(t)$. Punctul M se presupune că se rotește pe acest cerc cu viteza unghiulară 2ω , pornind de la timpul inițial din punctul M_0 . Proiecția OM' a segmentelor OO_1 și O_1M pe axa originii de fază reprezintă puterea instantanee $p(t)$, iar proiecția AM' pe aceeași axă numai a fazorului \vec{OM} este tocmai puterea numită fluctuantă [A9].

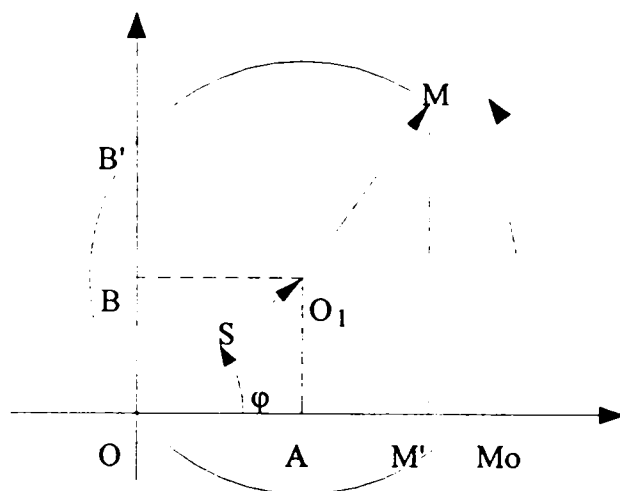


Fig.3.2. – Interpretarea geometrică a puterii instantanee

Referitor la o exprimare în complex, dacă unui circuit electric i se aplică la borne o tensiune $\underline{U} = Ue^{j\omega t}$ și circuitul este străbătut de curentul $\underline{i} = I \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}$, puterea aparentă complexă \underline{S} are expresia cunoscută $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{i}^* = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = U \cdot I \cdot \cos\varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$, iar puterea fluctuantă exprimată în complex este: $\underline{P}_f = \underline{U} \cdot \underline{i}$.

Termenul $UI \cos(2\omega t - \varphi)$ care apare în relația (3.1) și care a fost denumit putere fluctuantă este $\text{Re}\{\underline{U} \cdot \underline{i}\}$.

Se pot realiza diverse descompuneri ale expresiei puterii aparente, cea anterior analizată, (rel.3.1.), prin care se pune în evidență componenta denumită putere fluctuantă, aceeași expresie se poate exprima și în funcție de trei termeni, astfel:

$$\begin{aligned} p(t) &= P - UI \cos(2\omega t - \varphi) = P - [UI \cos\varphi \cdot \cos 2\omega t + UI \sin\varphi \cdot \sin 2\omega t] = \\ &= P - P \cos 2\omega t - Q \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (3.2)$$

sau :

$$\begin{aligned} p(t) &= 2UI \sin\omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = 2UI \cos\varphi \sin^2\omega t - 2UI \sin\varphi \cdot \sin\omega t \cdot \cos\omega t = \\ &= P(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t = P - P \cos 2\omega t - Q \sin 2\omega t \end{aligned}$$

prin care se evidențiază două componente de exprimare a termenului anterior analizat, putere fluctuantă, și anume componenta activă și cea reactivă.

În cazul unui sistem trifazat simetric, puterea fluctuantă totală, pe cele trei faze, este nulă. Întrădevăr, dacă tensiunile și curenții sistemului trifazat simetric sunt :

$$\begin{aligned} u_R &= U \cdot \sqrt{2} \sin \omega t & i_R &= I \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \\ u_S &= U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & i_S &= I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ u_T &= U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) & i_T &= I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \end{aligned}$$

puterea instantanee a sistemului trifazat este $p(t) = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T$ unde :

$$\begin{aligned} u_R \cdot i_R &= U \cdot I \cdot \cos \varphi + U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi) \\ u_S \cdot i_S &= U \cdot I \cdot \cos \varphi + U \cdot I \cdot \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ u_T \cdot i_T &= U \cdot I \cdot \cos \varphi + U \cdot I \cdot \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Este ușor de văzut că suma acestor expresii este constantă, adică tocmai suma puterilor active ale celor trei faze.

Dacă sistemul trifazat este însă nesimetric și se ține seama de rel.(3.2) expresia puterii fluctuante rezultante a sistemului este :

$$\underline{P}_f = \underline{U}_R \cdot \underline{I}_R + \underline{U}_S \cdot \underline{I}_S + \underline{U}_T \cdot \underline{I}_T \quad (3.4)$$

Folosind la analiza sistemelor trifazate nesimetrice metoda componentelor simetrice, putem scrie expresiile termenilor din rel.(3.4):

pentru faza R :

$$\begin{aligned} \underline{U}_R \underline{I}_R &= (\underline{U}^0 + \underline{U}^+ + \underline{U}^-) (\underline{I}^0 + \underline{I}^+ + \underline{I}^-) = \underline{U}^0 \cdot \underline{I}^0 + \\ &+ \underline{U}^+ \cdot \underline{I}^+ + \underline{U}^- \cdot \underline{I}^- + \underline{U}^0 (\underline{I}^+ + \underline{I}^-) + \underline{U}^+ (\underline{I}^0 + \underline{I}^-) + \underline{U}^- (\underline{I}^0 + \underline{I}^+) \end{aligned}$$

pentru faza S :

$$\begin{aligned} \underline{U}_S \underline{I}_S &= (\underline{U}^0 + a^2 \cdot \underline{U}^+ + a \cdot \underline{U}^-) \cdot (\underline{I}^0 + a^2 \cdot \underline{I}^+ + a \cdot \underline{I}^-) = \\ &= \underline{U}^0 \cdot \underline{I}^0 + a \cdot \underline{U}^+ \cdot \underline{I}^+ + a^2 \cdot \underline{U}^- \cdot \underline{I}^- + \underline{U}^0 \cdot (a^2 \cdot \underline{I}^+ + a \cdot \underline{I}^-) + \\ &+ a^2 \cdot \underline{U}^+ \cdot (\underline{I}^0 + a \underline{I}^-) + a \cdot \underline{U}^- \cdot (\underline{I}^0 + a^2 \cdot \underline{I}^+) \end{aligned} \quad (3.5)$$

pentru faza T :

$$\begin{aligned} \underline{U}_T \underline{I}_T &= (\underline{U}^0 + a \cdot \underline{U}^+ + a^2 \cdot \underline{U}^-) \cdot (\underline{I}^0 + a \cdot \underline{I}^+ + a^2 \cdot \underline{I}^-) = \\ &= \underline{U}^0 \cdot \underline{I}^0 + a^2 \cdot \underline{U}^+ \cdot \underline{I}^+ + a \cdot \underline{U}^- \cdot \underline{I}^- + \underline{U}^0 \cdot (a \cdot \underline{I}^+ + a^2 \cdot \underline{I}^-) + \\ &+ a \cdot \underline{U}^+ \cdot (\underline{I}^0 + a^2 \underline{I}^-) + a^2 \cdot \underline{U}^- \cdot (\underline{I}^0 + a \cdot \underline{I}^+) \end{aligned}$$

adunând expresiile (rel.3.5) se obține în complex, expresia puterii fluctuante totale, la un sistem trifazat nesimetric:

$$\underline{P}_f = 3 \cdot \underline{U}^0 \cdot \underline{I}^0 + 3 \cdot \underline{U}^+ \cdot \underline{I}^- + 3 \cdot \underline{U}^- \cdot \underline{I}^+ \quad (3.6)$$

Deci, puterea fluctuantă totală a unui sistem trifazat nesimetric nu mai este nulă. Faptul că la un sistem trifazat simetric această putere este zero, sugerează ideea de a utiliza cunoașterea valorii puterii fluctuante de la un sistem trifazat nesimetric pentru a caracteriza nesimetria sistemului, din punct de vedere energetic. Această idee poate fi

realizată și practic, cu ajutorul a trei traductoare Hall identice, în montaj de wattmetre Hall pe cele trei faze, având grijă ca circuitele de comanda ale celor trei traductoare Hall din schema să fie separate galvanic. În mod natural, tensiunea Hall de la ieșirea fiecărui traductor variază în timp ca și puterea fluctuantă de pe faza respectivă, astfel ca legând în serie cele trei ieșiri se obține puterea fluctuantă rezultantă pe cele trei faze.

3.1.2 Analiza puterilor instantanee ale unui sistem trifazat nesimetric prin metoda componentelor simetrice

Unul dintre principalii promotori ai aplicării acestei metode este A. E. Emanuel [E2]. Pentru simplitate, la început se va analiza metoda pentru cazul unui circuit trifazat liniar cu sarcini dezechilibrate, alimentat cu tensiuni electrice simetrice și sinusoidale. Valorile instantanee ale tensiunilor de alimentare sunt :

$$\begin{aligned} u_R &= U \cdot \sqrt{2} \sin \omega t \\ u_S &= U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_T &= U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Curenții instantanei de alimentare se exprimă în funcție de valorile instantanee ale componentelor simetrice [14]:

$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_R^+ & i_R^- & i_R^0 \\ i_S^+ & i_S^- & i_S^0 \\ i_T^+ & i_T^- & i_T^0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Pentru puterea instantanee pe cele trei faze rezultă expresia :

$$\begin{aligned} p(t) &= \begin{bmatrix} u_R & u_S & u_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} u_R \cdot i_R^+ + u_S \cdot i_S^+ + u_T \cdot i_T^+ \\ u_R \cdot i_R^- + u_S \cdot i_S^- + u_T \cdot i_T^- \\ u_R \cdot i_R^0 + u_S \cdot i_S^0 + u_T \cdot i_T^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_R^+ + p_S^+ + p_T^+ \\ p_R^- + p_S^- + p_T^- \\ p_R^0 + p_S^0 + p_T^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^+ \\ p^- \\ p^0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.9)$$

în care p^+ este puterea instantanee totală, (pe cele trei faze), de secvență pozitivă , p^- este puterea instantanee totală de secvență negativă , iar p^0 este puterea instantanee totală de secvență zero.

Expresiile puterilor instantanee de secvență pozitivă, pe cele trei faze, sunt:

$$\begin{aligned} p_R^+ &= 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \beta_+) \\ p_S^+ &= 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \beta_+ - 120^\circ) \\ p_T^+ &= 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \beta_+ + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3.10)$$

în care I^+ este valoarea efectivă a componentei de secvență pozitivă a curentului nesimetric , β_+ este defazajul dintre curentul de secvență pozitivă și tensiune. Aceste puteri instantanee rel.(3.10) se pot descompune fiecare în câte două componente astfel:

$$\begin{aligned}
 p_R^+ &= \frac{P^+}{3} \cdot [1 - \cos 2\omega t] + \frac{Q^+}{3} \cdot \sin 2\omega t = p_{RP}^+ + p_{RQ}^+ \\
 p_S^+ &= \frac{P^+}{3} \cdot [1 - \cos(2\omega t + 120^\circ)] + \frac{Q^+}{3} \cdot \sin(2\omega t + 120^\circ) = p_{SP}^+ + p_{SQ}^+ \\
 p_T^+ &= \frac{P^+}{3} \cdot [1 - \cos(2\omega t - 120^\circ)] + \frac{Q^+}{3} \cdot \sin(2\omega t - 120^\circ) = p_{TP}^+ + p_{TQ}^+
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

În aceste expresii rel.(3.10) puterea activă totală de secvență pozitivă pe cele trei faze, este $P^+ = p_{RP}^+ + p_{SP}^+ + p_{TP}^+ = 3U \cdot I^+ \cdot \cos\beta^+$, iar puterea reactivă totală de secvență pozitivă este $Q^+ = 3U \cdot I^+ \cdot \sin\beta^+$.

Variația calitativă a componentelor puterii instantanee de secvență pozitivă relația (3.11) se poate urmări în explicativa din fig.3.4.

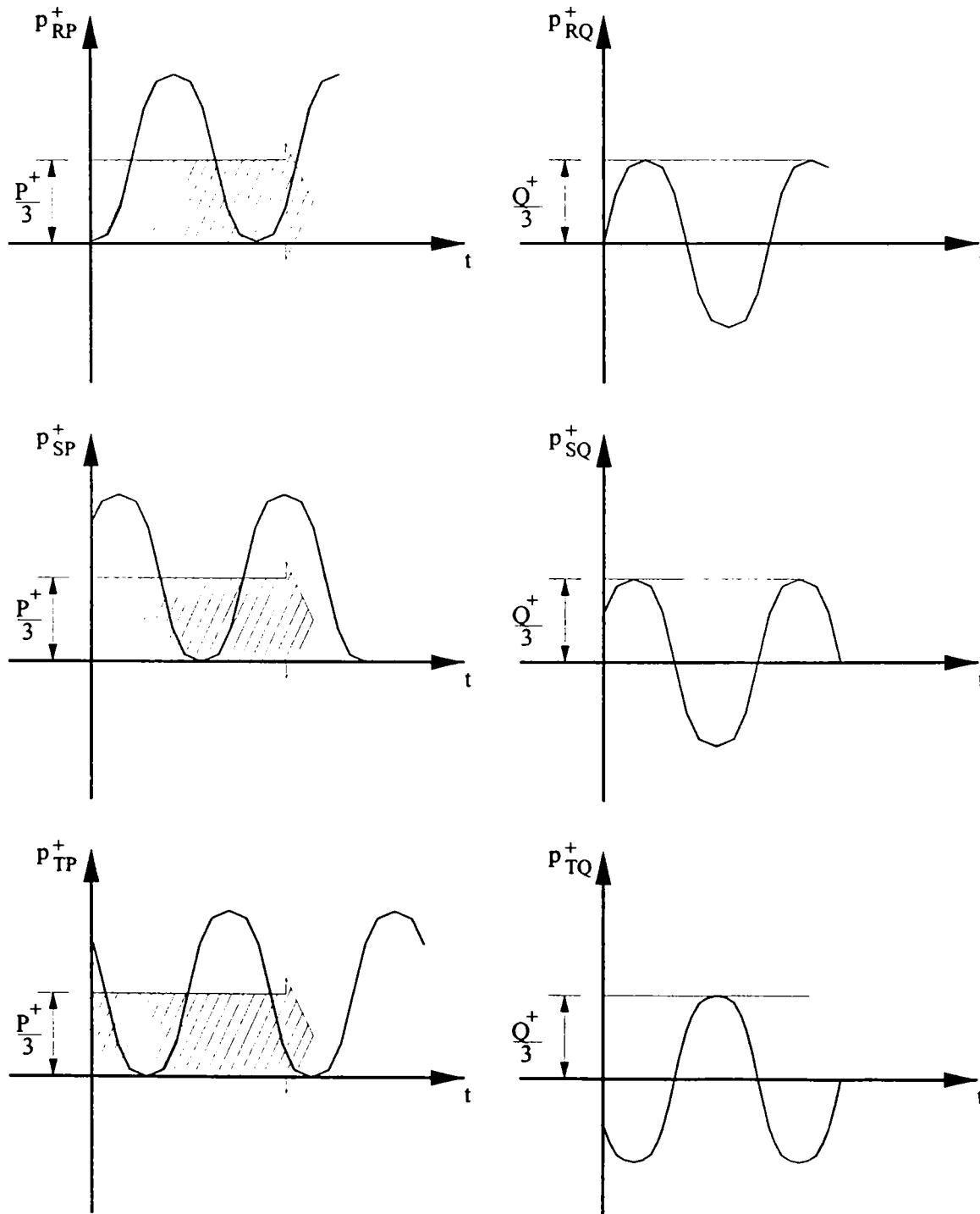


Fig.3.4. Oscilograma puterilor instantanee de secvență pozitivă

Rezultă că : $p_{RQ}^+ + p_{SQ}^+ + p_{TQ}^+ = 0$.

De exemplu se verifică expresia lui p_S^+ :

$$\begin{aligned}
 p_S^+ &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sqrt{2} \cdot I^+ \cdot \sin(\omega t - 120^\circ + \beta^+) = \\
 &= 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \sin^2(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos \beta^+ + 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin \beta^+ = \\
 &= 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \cos \beta^+ \cdot 1/2 \cdot [1 - \cos(2\omega t - 240^\circ)] + 2 \cdot U \cdot I^+ \cdot \sin \beta^+ \cdot 1/2 \cdot \sin(2\omega t - 240^\circ) = \quad (3.13) \\
 &= \frac{P^+}{3} [1 - \cos(2\omega t + 120^\circ)] + \frac{Q^+}{3} \cdot \sin(2\omega t + 120^\circ) = p_{SP}^+ + p_{SQ}^+
 \end{aligned}$$

Expresiile puterilor instantanee de secvență negativă , pe cele trei faze, sunt:

$$\begin{aligned}
 p_R^- &= 2 \cdot U \cdot I^- \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \beta^-) \\
 p_S^- &= 2 \cdot U \cdot I^- \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \beta^- + 120^\circ) \\
 p_T^- &= 2 \cdot U \cdot I^- \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \beta^- - 120^\circ)
 \end{aligned} \quad (3.14)$$

În care I^- este valoarea efectivă a componentei de secvență negativă a curentului nesimetric, β^- defazajul dintre curentul de secvență negativă și tensiune.

Aceste puteri instantanee rel.(3.14) se pot descompune fiecare în câte două componente astfel:

$$\begin{aligned}
 p_R^- &= \frac{P^-}{3} \cdot (1 - \cos 2\omega t) + \frac{Q^-}{3} \cdot \sin 2\omega t = p_{RP}^- + p_{RQ}^- \\
 p_S^- &= \frac{P^-}{3} \cdot [-1/2 - \cos 2\omega t] + \frac{Q^-}{3} \cdot \left[+\frac{\sqrt{3}}{2} + \sin 2\omega t \right] = p_{SP}^- + p_{SQ}^- \\
 p_T^- &= \frac{P^-}{3} \cdot [-1/2 - \cos 2\omega t] + \frac{Q^-}{3} \cdot \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} + \sin 2\omega t \right] = p_{TP}^- + p_{TQ}^-
 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Spre exemplu , se calculează componenta p_S^- :

$$\begin{aligned}
 p_S^- &= 2 \cdot U \cdot I^- \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + 120^\circ + \beta^-) = \\
 &= 2 \cdot U \cdot I^- \cdot 1/2 \cdot [\cos(-240^\circ - \beta^-) - \cos(2\omega t + \beta^-)] = \\
 &= U \cdot I^- \cdot 1/2 \cdot [\cos(+240^\circ + \beta^-) - \cos(2\omega t + \beta^-)] = \\
 &= U \cdot I^- \cdot [\cos(\beta^- - 120^\circ) - \cos(2\omega t + \beta^-)] = \quad (3.16) \\
 &= U \cdot I^- \cdot [\cos(\beta^- - 120^\circ) - \cos 2\omega t \cdot \cos \beta^- - \sin 2\omega t \cdot \sin \beta^-] = \\
 &= U \cdot I^- \cdot \cos(\beta^- - 120^\circ) - \frac{P^-}{3} \cos 2\omega t - \frac{Q^-}{3} \sin 2\omega t
 \end{aligned}$$

Variația calitativă a componentelor puterii instantanee de secvență negativă rel. (3.15) se poate urmări în explicativa din fig.3.6.

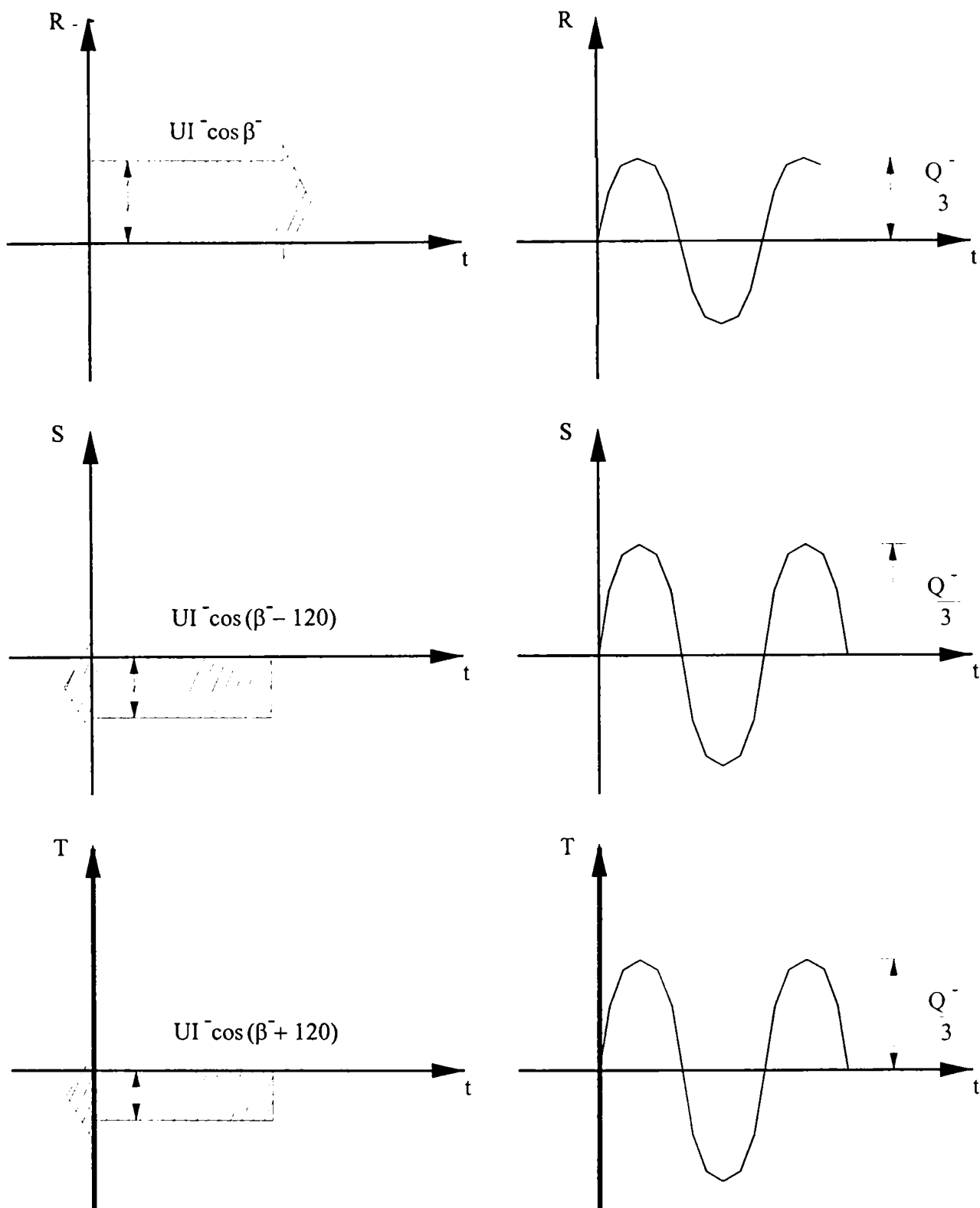


Fig. 3.6. Oscilograma puterilor instantanee de secvență negativă

Se poate constata că , pe fiecare fază , componenta constantă a puterii de secvență negativă este diferită de zero , dar suma acestor componente pe cele trei faze este nulă. De asemenea mai rezultă că , puterea activă de secvență negativă de pe o fază se întoarce pe celelalte faze. În ceea ce privește componentele oscilante de amplitudine $Q^- / 3$ ale puterilor reactive instantanee pe cele trei faze , ele sunt în fază.

În ceea ce privește componentele de secvență zero ale puterii instantanee rezulta :

$$\begin{aligned}
 p_R^0 &= 2 \cdot U \cdot I^0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \beta^0) = \\
 &= \frac{P^0}{3} (1 - \cos 2\omega t) + \frac{Q^0}{3} \sin 2\omega t = p_{RP}^0 + p_{RQ}^0
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned}
p_S^0 &= 2 \cdot U \cdot I^0 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \beta^0) = \\
&= \frac{P^0}{3} \left(-\frac{1}{2} - \cos(2\omega t - 120^\circ) \right) + \frac{Q^0}{3} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + \sin(2\omega t - 120^\circ) \right) = p_{SP}^0 + p_{SQ}^0 \\
p_T^0 &= 2 \cdot U \cdot I^0 \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot \sin(\omega t + \beta^0) = \\
&= \frac{P^0}{3} \left(-\frac{1}{2} - \cos(2\omega t + 120^\circ) \right) + \frac{Q^0}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \sin(2\omega t + 120^\circ) \right) = p_{TP}^0 + p_{TQ}^0
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Oscilațiile puterii de secvență zero, relațiile (3.17) se reprezintă grafic astfel :

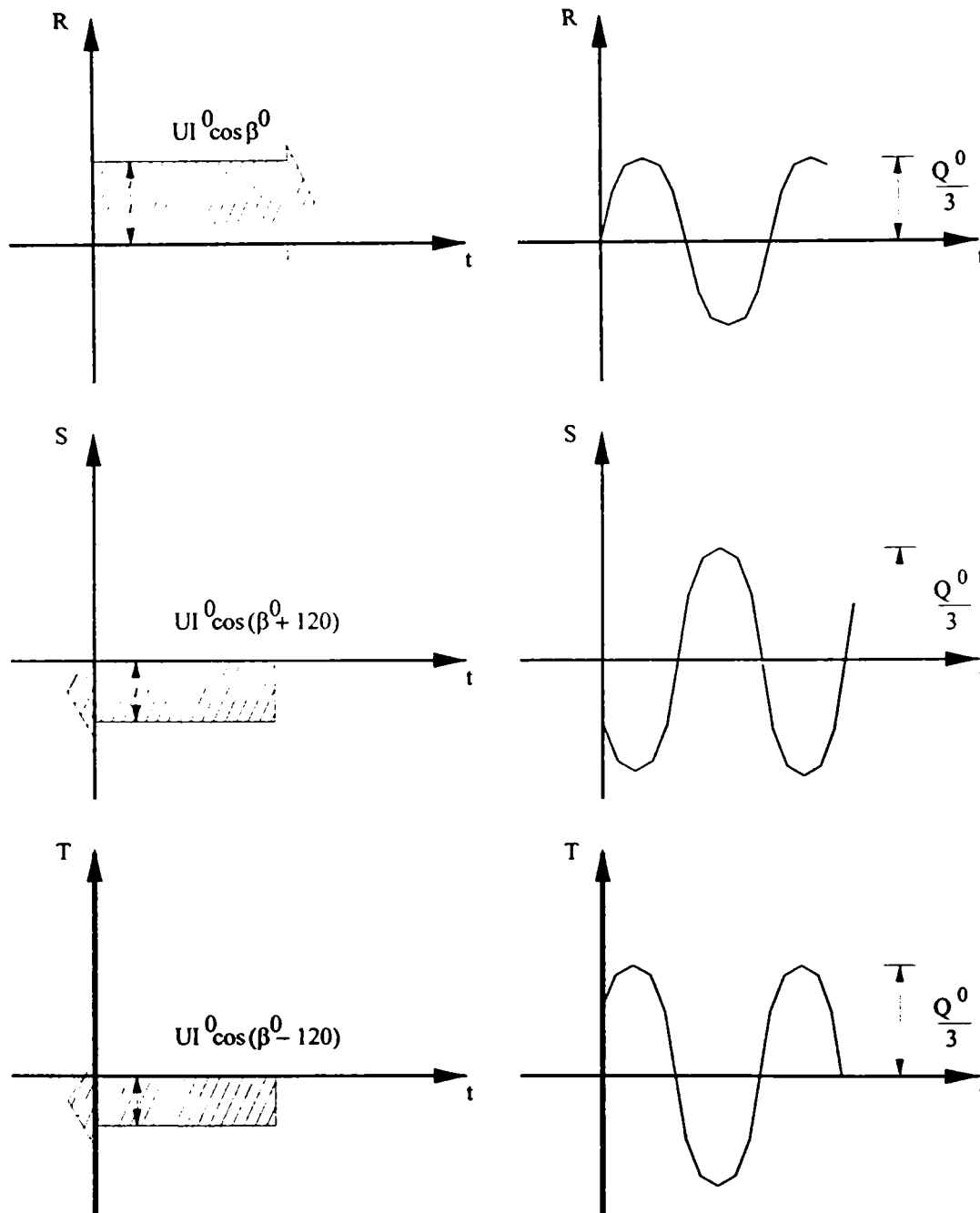


Fig. 3.8. Oscilograma puterilor de secvență zero

În afară de o temeinică fundamentare teoretică a analizei unui sistem trifazat nesimetric prin aplicarea metodei componentelor simetrice, trebuie subliniată și importanța unor rezultate finale obținute [E2]. Astfel, sunt relevante informațiile concrete, privind circulația pe cele trei faze ale componentelor puterilor instantanee de secvență pozitivă, negativă și zero. În strânsă legătură cu această circulație de puteri se mai arată că,

puterea activă pe care o primește, de fapt, de la rețea un receptor trifazat dezechilibrat este doar puterea activă de secvență pozitivă (P^+), rezultat important și pentru obținerea corespunzătoare a factorului de putere în sisteme trifazate nesimetrice, ($k_p = P^+/S$).

3.1.3 Puterea aparentă echivalentă la sistemele nesimetrice. Componentele puterii aparente.

Prin aplicarea metodei componentelor simetrice, pentru puterea aparentă a unui sistem trifazat cu sarcini dezechilibrate se obține expresia [E2]:

$$S = 3 \cdot U \cdot \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + I_0^2} \quad (3.18)$$

în care I^+, I^- și I^0 sunt componentele de secvență ale curenților trifazați nesimetrice I_R, I_S, I_T .

Deoarece este valabilă identitatea [E2]:

$$I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 = 3(I_+^2 + I_-^2 + I_0^2) \quad (3.19)$$

expresia puterii aparente devine:

$$S_e = 3 \cdot U \cdot I_e \quad (3.20)$$

în care:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}} = \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + I_0^2} \quad (3.21)$$

reprezintă un curent echivalent. Curentii echivalenți de pe cele trei faze ar produce aceleași pierderi de putere prin efect Joule pe o linie de alimentare simetrică și ca și curenți nesimetrice reali.

În cazul mai general când și tensiunile pe cele trei faze sunt nesimetrice, expresia puterii aparente este:

$$S_e = 3 \cdot U_e \cdot I_e \quad (3.22)$$

în care U_e este o tensiune echivalentă, având o expresie analogă curentului I_e și anume:

$$U_e = \sqrt{\frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{3}} \quad (3.23)$$

astfel ca expresia puterii aparente este:

$$S_e = 3 \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}} \sqrt{\frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{3}} \quad (3.24)$$

Aceasta expresie a puterii aparente, în care intervin mărimile echivalente (U_e, I_e) se numeste și putere aparentă echivalentă (S_e). Alți autori o mai numesc putere aparentă adevărată [H2].

Este interesant de mentionat faptul ca, aceasta expresie a puterii aparente a fost propusa initial, cu mai multi ani inainte, de catre F. Buchholtz [B7]. Expresia a fost dedusa ulterior pe diferite cai teoretice de catre A.E. Emanuel [E3], L.Czamechi [C11] si Fl. Manea [M2]. In orice caz, astazi expresia puterii aparente echivalente este cea mai larg folosita in analiza sistemelor trifazate nesimetrice. Trebuie deasemenea mentionat faptul ca, aceasta expresie a puterii aparente se aplica desigur in mod adecvat si la analiza sistemelor trifazate in regimuri nesimetrice și nesinusoidale [W1].

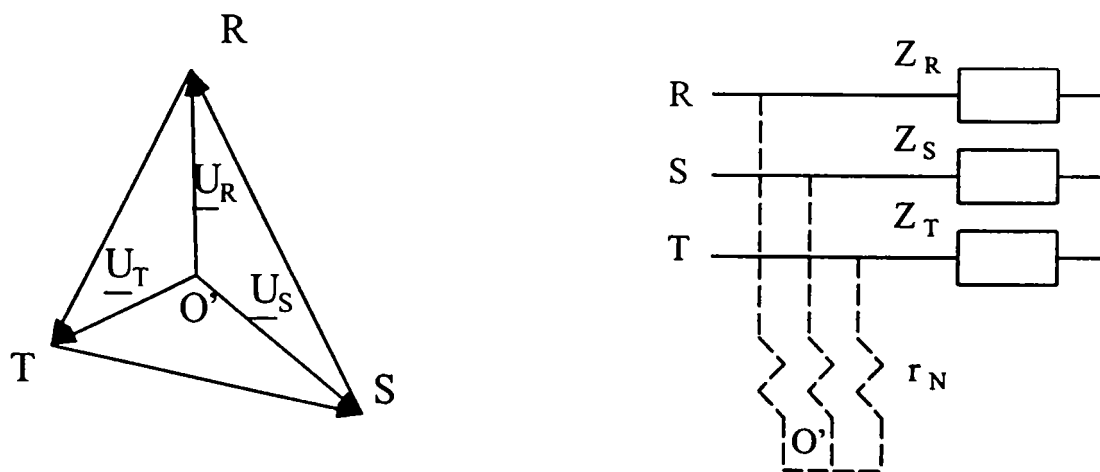
Există și alte expresii mai vechi pentru puterea aparenta a unui sistem trifazat nesimetric. Astfel, pînă la nivelul anului 1920 erau cunoscute deja doua expresii, dacă pentru cele trei faze se notează cu $\underline{S}_R = P_R + jQ_R$, $\underline{S}_S = P_S + jQ_S$, $\underline{S}_T = P_T + jQ_T$ puterile aparente în complex, cele doua definiții sunt:

$$S_A = S_R + S_S + S_T$$

si

$$S_G = |\underline{S}_R + \underline{S}_T + \underline{S}_T|$$
(3.25)

indicele A relevând faptul ca este vorba de o insumare aritmetica a valorilor puterilor aparente pe cele trei faze , iar indicele G indicind o insumare geometrica a acestor puteri. Desigur ca si valoarea factorului de putere depinde de expresia ce se considera pentru puterea aparentă ($k_p = P/S$).



a) diagrama fazorială a tensiunilor

b) circuit pentru formarea neutrului

Fig. 3.9. Explicativă privind determinarea puterii aparente echivalente la sisteme trifazate cu trei conductoare

Stabilirea expresiei puterii aparente echivalente în cazul unui sistem trifazat nesimetric cu trei conductoare se poate face si direct considerind criteriul care stă la bază. Astfel, pentru stabilirea unei puterii active maxime pentru sistemul trifazat dezechilibrat, se considera un circuit fictiv trifazat si echilibrat, avind o sarcina rezistiva R, aceeasi pe toate fazele si bineînțeles, aceleasi tensiuni de linie ca si la circuitul trifazat dezechilibrat ce se analizează. Curentii de faza a circuitului real dezechilibrat se noteaza cu I_R, I_S, I_T , curenții la

circuitul fictiv echivalent se notează cu I_R', I_S', I_T' , iar rezistența unui conductor a liniei trifazate de alimentare este r . Condiția de echivalență este ca în ambele cazuri să rezulte aceleași pierderi de putere activă pe linia de alimentare, adică :

$$r(I_R'^2 + I_S'^2 + I_T'^2) = r(I_R'^2 + I_S'^2 + I_T'^2), \text{ respectiv } I_R'^2 + I_S'^2 + I_T'^2 = I_R'^2 + I_S'^2 + I_T'^2.$$

În aceste condiții este evident că puterea activă a circuitului fictiv echivalent este maximă, deoarece acest circuit este echilibrat și în plus sarcina lui este pur rezistivă (R). Expresia acestei puteri active maxime, egală cu puterea aparentă, este :

$$P_{\max} = (I_R'^2 + I_S'^2 + I_T'^2) \cdot R = \frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{R} = S \quad (3.26)$$

sau, dacă se ține seama de condiția de echivalență se obține expresia evidentă:

$$S_e^2 = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \cdot (U_R^2 + U_S^2 + U_T^2) \quad (3.27)$$

respectiv

$$S_e = 3 \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{3}} \quad (3.28)$$

care este identică cu expresia puterii echivalente propuse inițial de F. Buchholtz [B5].

Trebuie precizat că în rel. (3.28), intervin tensiunile de fază de la circuitul echivalent care nu sunt în general identice cu tensiunile de fază de la circuitul analizat. Deoarece circuitul trifazat echivalent este echilibrat, tensiunile de fază U_R, U_S, U_T , (rel.3.27), sunt după medianele triunghiului tensiunilor de linie (fig.3.9.a).

Determinarea acestor tensiuni de fază se poate face fie plecând de la triunghiul tensiunilor între faze (de linie) și găsind punctul neutru O' , care este de fapt centrul de greutate al triunghiului tensiunilor de linie (fig.3.9.a), fie pe cale experimentală realizând, în cazul circuitului analizat, un punct neutru artificial (O'), cu trei rezistențe egale (r_N) în stea (fig.3.9. b). Dacă se cunosc tensiunile de linie, suma patratelor tensiunilor de fază, adică ($U_R^2 + U_S^2 + U_T^2$), care intervine în expresia puterii aparente echivalente se poate determina simplu din relația :

$$U_R^2 + U_S^2 + U_T^2 = \frac{(U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2)}{3} \quad (3.29)$$

expresia puterii aparente echivalente se poate deci scrie și sub forma :

$$S_e = \sqrt{(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \cdot \frac{U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2}{3}} \quad (3.30)$$

în care intervin numai curenți și tensiuni de linie.

Dacă sistemul trifazat analizat este cu patru conductoare trebuie să se țină seamă într-un anumit fel și de pierderile de putere activă pe conductorul neutru. Într-o lucrare recent apărută [E3] și prezintă o soluție pentru determinarea puterii aparente echivalente în acest caz, pe baza sugestiilor făcute de cercetătorii M. Depenbrock și V. Staudt în discuțiile la articolul [W1].

Soluția propusă în lucrarea menționată pentru curentul echivalent I_e și tensiunea echivalentă U_e în cazul unui sistem trifazat cu 4 conductoare este:

$$I_e = \sqrt{(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_n^2)} / 3 \quad (3.31)$$

$$\text{și } U_e = \sqrt{(U_{RN}^2 + U_{SN}^2 + U_{TN}^2 + U_{nN}^2)} / 3$$

în care I_n este curentul pe conductorul neutru, iar U_{nN} este tensiunea dintre neutrul sarcinii (n) și un punct neutru artificial N, corespunzător ales .

Se arată însă că expresia tensiunii echivalente U_e se poate scrie mai convenabil, respectiv mai simplu, dacă ea se exprimă în funcție de tensiunile de fază și tensiunile de linie astfel:

$$I_e = \sqrt{(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_n^2)} / 3 \quad (3.32)$$

$$\text{și } U_e = \sqrt{(U_R^2 + U_S^2 + U_T^2 + U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2)} / 12$$

care sunt expresii practice de calcul a mărimilor echivalente (U_e , I_e) pentru sisteme trifazate cu 4 conductoare și curent pe conductorul neutru (I_n).

Se știe că puterea aparentă în regim trifazat nesimetric se poate descompune în trei componente ortogonale :

$$S_e^2 = P^2 + Q^2 + N^2 \quad (3.33)$$

în care P și Q sunt puterile activă și reactivă, iar compor.enta N se numește putere de nesimetrie. Puterea de nesimetrie din această relație clasică are expresia cunoscută :

$$N = \sqrt{S_e^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (3.34)$$

Referitor la un circuit trifazat cu sarcini dezechilibrate, în această teză de doctorat se propune și o altă metodă mai particulară de determinare a puterii aparente echivalente. În cazul considerat expresia puterii aparente echivalente este:

$$S_{ech} = 3 \cdot U^+ \cdot \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + I_0^2} \quad (3.35)$$

iar puterea aparentă ce corespunde doar componentelor de secvență directă ale puterilor activă și reactivă este $S_+^2 = 3 \cdot U_+^2 \cdot I_+^2 = P_+^2 + Q_+^2$. Deoarece $S_{ech}^2 > S_+^2$ se poate introduce încă o componentă N'^2 care adunată cu $(P_+^2 + Q_+^2)$ să dea pe S_{ech}^2 . Se obține astfel relația:

$$N' = \sqrt{S_{ech}^2 - (P_+^2 + Q_+^2)} = \sqrt{(3 \cdot U^+ \cdot I_e)^2 - (3 \cdot U_+ \cdot I_+)^2} = 3 \cdot U^+ \sqrt{I_e^2 - I_+^2} = 3 \cdot U^+ \sqrt{I_+^2 - I_e^2} \quad (3.36)$$

din care rezultă că această putere de nesimetrie N' depinde în adevăr de componentele inversă și homopolară ale curenților, iar dacă aceste componente nu există (sistem simetric) și puterea de nesimetrie N' este nulă.

În figura 3.10 se prezintă o construcție grafică explicativă ce corespunde descompunerii puterii aparente dată de relația (3.36).

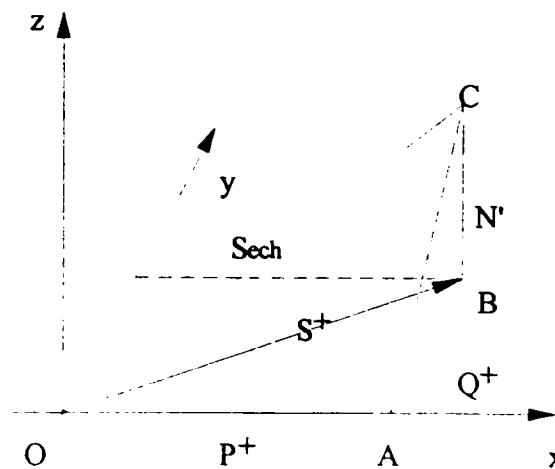


Fig.3.10. Figură explicativă privind calculul puterii aparente

Într-un sistem de axe de coordonate x, y, z se reprezintă după axa Ox puterea activă de secvență directă P^+ (segmentul \overline{OA}), iar din punctul A , după paralela la axa Oy se reprezintă puterea reactivă de secvență directă Q^+ (segmentul \overline{AB}). Puterea aparentă S^+ corespunzătoare puterilor activă și reactivă de secvență directă ($S_+^2 = P_+^2 + Q_+^2$) este segmentul \overline{OB} din planul xOy . Dacă în punctul B , perpendicular pe planul xOy se reprezintă grafic puterea de nesimetrie N' prin segmentul \overline{BC} , segmentul \overline{OC} va reprezenta puterea aparentă a circuitului $S_{ech}^2 = S_+^2 + N'^2$.

În această construcție grafică se pot identifica ușor anumiți indicatori energetici. Astfel, factorul de putere $k_p = P^+/S_{ech}$ este egal cu raportul $\overline{OA}/\overline{OC}$, iar factorul de putere corespunzător numai componentelor de secvență directă $k_{ps} = P^+/S^+$ (sistem simetric) este egal cu raportul $\overline{OA}/\overline{OB}$. În ceea ce privește raportul dintre puterea aparentă S^+ și puterea echivalentă S_{ech} a circuitului nesimetric, acesta este egală cu raportul segmentelor $\overline{OB}/\overline{OC}$ și s-ar putea numi factor de nesimetrie k_{pn} . Se poate observa că $k_p = k_{ps} \cdot k_{pn}$.

3.2. Problema puterilor în regimuri periodice nesinusoidale

3.2.1 Unele expresii clasice

În cazul unui circuit monofazat în regim periodic nesinusoidal, sunt binecunoscute expresiile clasice ale diferitelor mărimi și puteri ce intervin [S2]. Ținându-se seama de dezvoltarea în serie Fourier a unei funcții periodice nesinusoidale, tensiunea instantanee $u(t)$ și curentul electric $i(t)$ au expresiile :

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + \sqrt{2} \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(k\omega t + \alpha_k) \\ i(t) &= I_0 + \sqrt{2} \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega t + \beta_k) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Valorile efective ale acestor mărimi sunt:

$$U = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \quad \text{și} \quad I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} \quad (3.38)$$

în care k este ordinul armonicii.

Puterea aparentă S este egală cu produsul dintre valoarea efectivă a tensiunii (U) și valoarea efectivă a curentului (I):

$$S = UI = \sqrt{\sum_0^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_0^{\infty} I_k^2} \quad [\text{VA}] \quad (3.39)$$

În legătură cu puterea activă P se menționează că există un consens general în privința acțiunii acestor puteri ca suma puterilor active ale tuturor armonicilor, adică:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \, i \, dt = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k, \quad [W] \quad (3.40)$$

În ceea ce privește puterea reactivă Q expresia propusă pentru prima dată de academicianul C. Budeanu [B1] și acceptată la scurt timp de CEI, este:

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k, \quad [Var] \quad (3.41)$$

În literatura de specialitate există și alte expresii pentru puterea reactivă în regim nesinusoidal, dar expresia propusă de C. Budeanu a cunoscut și cunoaște și azi o aplicare practic exclusivă pe plan mondial.

Spre deosebire de un regim sinusoidal, într-un regim nesinusoidal în afară de puterile active și reactivă mai intervine o componentă a puterii aparente și anume puterea deformantă D [VAD], a cărei expresie clasică tot după C. Budeanu, este:

$$D = \sqrt{\sum_{k,j} \left[U_k^2 I_j^2 + U_j^2 I_k^2 + 2U_k U_j I_k I_j \cos(\varphi_k - \varphi_j) \right]} \quad (3.42)$$

care mai poate fi scrisă și în alte forme [A8]:

$$D = \sqrt{\sum_{k,j} \left[(U_k I_j \cos \varphi_j - U_j I_k \cos \varphi_k)^2 + (U_k I_j \sin \varphi_j - U_j I_k \sin \varphi_k)^2 \right]} \quad (3.43)$$

sau

$$D = \sqrt{\sum_{k,j} \left[(U_k I_j - U_j I_k)^2 + 4U_k U_j I_k I_j \sin^2 \frac{\varphi_k - \varphi_j}{2} \right]} \quad (3.44)$$

Însumarea din aceste expresii făcându-se prin permutarea circulară a indicilor

Între cele patru puteri (S , P , Q , D) există relația:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.45)$$

din care de obicei, se calculează simplu puterea deformantă atunci când se cunosc celelalte trei puteri $D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$. În legătură cu puterea deformantă se poate observa că, aceasta fiind o componentă suplimentară a puterii aparente contribuie, ca și puterea reactivă la creșterea curentului de alimentare la putere activă dată și implicit duce la mărirea pierderilor de putere activă pe rețeaua de alimentare. Prin putere complementară în regim nesinusoidal se înțelege expresia $P_c = \sqrt{Q^2 + D^2}$.

O altă mărime caracteristică în regim nesinusoidal este reziduul deformant al puterii active (P_d), care reprezintă suma tuturor puterilor active ale armonicilor superioare și are expresia:

$$P_d = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k \quad (3.46)$$

și de asemenea, reziduul deformant al puterilor reactive având expresia:

$$Q_d = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \quad (3.47)$$

Din relația (3.44) se poate vedea simplu în ce condiții puterea deformantă se anulează. Această putere devine nulă dacă sunt îndeplinite simultan condițiile:

$$(U_k I_j - U_j I_k)^2 = 0 \quad \text{și} \quad \sin^2 \frac{\varphi_k - \varphi_j}{2} = 0 \quad (3.48)$$

ceea ce înseamnă că:

$$\frac{U_k}{I_k} = \frac{U_j}{I_j} = \dots \quad \text{și} \quad \varphi_k = \varphi_j = \dots \quad (3.49)$$

adică toate armonicile de tensiune și curent de același ordin să fie proporționale, respectiv tensiunea și curentul să aibă același formă de variație în timp. În practică, acest caz presupune ca receptorul să fie o rezistență pură.

Un caz particular, care poate interveni adesea în practică, este acela când numai curentul este nesinusoidal. În acest caz ($U \cong U_1$) relația pentru calculul puterii deformante devine:

$$D = U \sqrt{I_0^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = UI_d \quad (3.50)$$

în care I_d este reziduul deformant al curentului, respectiv valoarea efectivă a armonicilor superioare ale curentului.

Dacă coeficientul de distorsiune al tensiunii depășește aproximativ 20% puterea deformantă poate fi calculată cu ajutorul expresiei:

$$D = UI_d + U_d I \quad (3.51)$$

în care U_d este reziduul deformant al tensiunii.

În legătură cu expresiile prezentate în acest paragraf, pot fi relevate unele neajunsuri. Astfel, dacă ne referim la expresiile puterilor aparentă și activă se poate observa că, principial valorile lor nu se modifică în aceeași măsură cu conținutul de armonici din sistem. În adevăr dacă valorile efective ale tensiunii și curentului, care definesc puterea aparentă, relația (3.39), cresc odată cu conținutul de armonici, în schimb puterea activă, relația (3.40) crește în general mai puțin, din cauza defazajelor între tensiunile și curenții armonicilor de același ordin (φ_k). În consecință, dacă factorul de putere se definește formal prin câtul dintre puterea activă și puterea aparentă, ca și într-un regim sinusoidal, valoarea acestuia nu este concludentă și pentru conținutul de armonici. De exemplu, este posibil ca în cazul unui receptor cu caracter inductiv, la care se aplică compensarea capacitivă, factorul de putere astfel definit după compensare să rezulte mai mic decât înainte de compensare. Desigur că, pentru definirea factorului de putere în regim nesinusoidal trebuie găsite soluții mai utile.

3.2.2. Relații de calcul practice în regimuri nesinusoidale

În paragraful 3.2.2 se prezintă unele sugestii și relații de calcul practice pentru determinarea puterilor și a unor indicatori energetici de interes în analiza circuitelor în regim nesinusoidal [W1]. Va fi abordat și cazul foarte general al unui sistem trifazat dezechilibrat și totodată în regim nesinusoidal,

În lucrarea [W1], care este o lucrare de referință în domeniu, se pornește analiza de la valorile efective ale tensiunii și curentului, care în cazul unui sistem monofazat se poate scrie sub forma:

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 \quad \text{și} \quad I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad (3.52)$$

în care :

$$U_H^2 = \sum_{k \neq 1} U_k^2 \quad \text{și} \quad I_H^2 = \sum_{k \neq 1} I_k^2 \quad (3.53)$$

Ținând seama de aceste relații, expresia puterii aparente devine:

$$\begin{aligned} S^2 = (UI)^2 &= (U_1 I_1)^2 + (U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2 = \\ &= S_1^2 + S_{NF}^2 \end{aligned} \quad (3.54)$$

unde S_1 este puterea aparentă pe fundamentală, iar S_{NF} este puterea aparentă non-fundamentală. Expresiile celor două componente ale puterii aparente sunt deci:

$$S_1^2 = (U_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (3.55)$$

$$S_{NF}^2 = (U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2 \quad (3.56)$$

Descompunerea puterii aparente S în cele două componente (S_1 și S_{NF}) ține seamă de faptul că în cele mai multe cazuri din practică, cea mai mare parte din puterea totală este putere pe fundamentală.

Ultimul termen $(U_H I_H)$ din expresia puterii non-fundamentale, rel.(3.56) este puterea aparentă numai a armonicilor superioare, care la rândul lui se descompune astfel:

$$(U_H I_H)^2 = S_d^2 = P_d^2 + N_d^2 \quad (3.57)$$

în care $P_d = \sum_{k \neq 1} U_k I_k \cos \varphi_k$ este reziduul deformant al puterii active, iar N_d^2 reprezintă suma puterilor non active ale armonicilor superioare.

Dacă puterilor activă (P_1) și reactivă (Q_1) pe fundamentală li se poate asocia un sens fizic, nu același lucru se poate spune despre componenta puterii S_{NF} . Aceste componente însă pot servi pentru introducerea în studiul regimului nesinusoidal a unor indicatori utili în scopul aprecierii nivelului de armonici, respectiv aprecierea poluării cu armonici a sistemului. Astfel prin împărțirea relației (3.56) cu relația (3.55) se obține raportul $(S_{NF}/S_1)^2$:

$$\left(\frac{S_{NF}}{S_1}\right)^2 = \left(\frac{I_H}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{U_H}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_H I_H}{U_1 I_1}\right)^2 \quad (3.58)$$

Dacă se ține seama de expresiile factorilor totali de distorsiune pentru curentul (ITHD) și pentru tensiuni (UTHD), relația (3.58) devine:

$$\left(\frac{S_{NF}}{S_1}\right)^2 = (ITHD)^2 + (UTHD)^2 + (ITHD \cdot UTHD)^2 \quad (3.59)$$

În mod obișnuit, factorul total de distorsiune pentru tensiune (UTHD) este foarte mic ($0,01 < UTHD < 0,03$), putându-se menționa o valoare orientativă limită de sub 5%. În ceea ce privește factorul total de distorsiune pentru curent (ITHD) acesta este mai mare, fiind obișnuit în instalațiile de joasă tensiune cuprins între valorile $0,65 < ITHD < 0,9$ [W1]. De asemenea, se mai precizează că raportul (S_{NF}/S_1) oferă informații concludente despre poluarea cu armonici a sistemului. Pe lângă factorul de putere global se recomandă că este util să se determine și factorul de putere pe fundamentală ($FK_p = P_1/S_1$), ceea ce este simplu de realizat dacă puterile se monitorizează separat și pe fundamentală.

Să ne referim acum pe scurt la un sistem trifazat în regim nesinusoidal. Dacă sistemul trifazat este echilibrat problema puterii aparente și a componentelor sale se poate principial analiza și pe o fază. În situația că sistemul trifazat este dezechilibrat sunt necesare considerații suplimentare.

S-a văzut că la un sistem trifazat dezechilibrat se poate defini satisfăcător o putere aparentă echivalentă (pct. 3.1.3). Pentru simplitate se consideră un sistem trifazat cu trei conductoare, la care puterea aparentă echivalentă este dată de relația :

$$S_e = 3U_e I_e = 3\sqrt{\frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}} \quad (3.60)$$

în care U_R , U_S și U_T sunt tensiunile de fază după medianele triunghiului tensiunilor de linie (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}).

În mod similar cazului de la un circuit monofazat, tensiunea echivalentă U_e și curentul echivalent se descompun în câte două componente:

$$U_e^2 = U_{e1}^2 + U_{eH}^2 \quad \text{și} \quad I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{eH}^2 \quad (3.61)$$

unde indicele 1 se referă la componentele fundamentale:

$$U_{e1}^2 = \frac{U_{R1}^2 + U_{S1}^2 + U_{T1}^2}{3} \quad \text{și} \quad I_{e1}^2 = \frac{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2}{3} \quad (3.62)$$

iar indicele H se referă la totalitatea componentelor non-fundamentale:

$$U_{eH}^2 = \sum_{k \neq 1} \frac{U_{Rk}^2 + U_{Sk}^2 + U_{Tk}^2}{3} \quad \text{și} \quad I_{eH}^2 = \sum_{k \neq 1} \frac{I_{Rk}^2 + I_{Sk}^2 + I_{Tk}^2}{3} \quad (3.63)$$

Ca și în cazul circuitelor monofazate, puterea aparentă echivalentă S_e se descompune în putere aparentă și fundamentală S_{e1} și putere aparentă non-fundamentală S_{eNF} :

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eNF}^2 \quad (3.64)$$

Definind și în acest caz factori echivalenți totali de distorsiune pentru tensiune ($UTHD_e$) și curenți ($ITHD_e$):

$$\frac{U_{eH}}{U_{e1}} = UTHD_e \text{ și } \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = ITHD_e \quad (3.65)$$

pentru raportul S_{eNF}/S_{e1} se obține expresia :

$$\left(\frac{S_{eNF}}{S_{e1}} \right)^2 = (ITHD_e)^2 + (UTHD_e)^2 + (ITHD_e \cdot UTHD_e)^2 \quad (3.66)$$

care este de aceeași formă cu expresia de la un circuit monofazat . Cunoașterea acestui raport (S_{eNF}/S_{e1}) în care $S_{eNF} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$, este utilă pentru aprecierea poluării în armonici a sistemului.

În cazul unui circuit trifazat dezechilibrat este inevitabilă definirea și a altor puteri aparente. Puterea aparentă echivalentă pe fundamentală S_{e1} se poate descompune și ea în doi termeni:

$$S_{e1}^2 = S_{1+}^2 + S_{u1}^2 \quad (3.67)$$

în care $S_{1+} = 3U_1^+ \cdot I_1^+$ este puterea aparentă de secvență pozitivă pe fundamentală, iar componenta S_{u1} este puterea aparentă de nesimetrie, pe fundamentală. Cunoașterea raportului S_{u1}/S_{e1} este utilă pentru aprecierea gradului de nesimetrie.

Deci puterea aparentă echivalentă se poate scrie și sub forma:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eNF}^2 = S_{1+}^2 + S_{u1}^2 + S_{eNF}^2 \quad (3.68)$$

3.2.3. Definiție neconvențională a puterii reactive în regim nesinusoidal

Expresia puterii reactive propusă de C. Budeanu și acceptată de C.E.I, cu peste 70 de ani înainte, a fost și este soluția pe care au adoptat-o practic electrotehnicienii din întreaga lume. În contextul preocupărilor pentru definirea puterilor în regim nesinusoidal și această expresie a fost discutată de-a lungul anilor, dar cu peste 10 ani în urmă, un cercetător polonez L. S. Czarnecki a criticat în mod vehement, cu argumentele cuprinse în articolul [C12]. Pe lângă faptul că L. S. Czarnecki propune o altă expresie pentru puterea reactivă în regim nesinusoidal, el sugerează și o posibilitate de compensare a acestei puteri, diferită de soluția clasică [C11].

În cele ce urmează se analizează critic ideile acestui cercetător, în această problemă. Definiția lui se bazează pe descompunerea curentului nesinusoidal în anumite componente. Tensiunea nesinusoidală aplicată circuitului receptor presupus liniar, se poate scrie sub forma:

$$u = \text{Im} \sum_k \sqrt{2} \underline{U}_k e^{jk\omega t} \quad (3.69)$$

unde $\underline{U}_k = U_k e^{j\alpha_k}$. Notând $\underline{Y}_k = G_k + jB_k$ admitanța receptorului corespunzătoare armonice de ordinul k se obține curentul:

$$i = \text{Im} \sum_k \sqrt{2} \underline{U}_k (G_k + jB_k) e^{jk\omega t} \quad (3.70)$$

Acest curent se poate descompune în trei componente, din care cauză i se mai spune curent „total”. O primă componentă este curentul i_a ce corespunde puterii active. Plecând de la puterea activă P din circuitul real, se poate determina prin calcul o conductanță echivalentă G_e , din condiția ca prin alimentarea cu aceeași tensiune nesinusoidală să se obțină o putere egală cu puterea activă. De aici rezultă valoarea acestei conductanțe echivalente :

$$G_e = \frac{P}{U^2} \quad (3.71)$$

în care U este valoarea efectivă a tensiunii, bineînțeles în regim nesinusoidal. Curentul activ este deci:

$$i_a = I_m \sum_k \sqrt{2} G_e \underline{U}_k e^{jk\omega t} \quad (3.72)$$

Ținând seama de expresia acestui curent, ceea ce rămâne va fi curentul:

$$i - i_a = I_m \sum_k \sqrt{2} (G_k + jB_k - G_e) \underline{U}_k e^{jk\omega t} \quad (3.73)$$

care de asemenea se poate descompune în două componente și anume:

$$i'_r = I_m \sum_k \sqrt{2} jB_k \underline{U}_k e^{jk\omega t} \quad (3.74)$$

$$i'_d = I_m \sum_k \sqrt{2} (G_k - G_e) \underline{U}_k e^{jk\omega t}$$

unde i'_r este curentul reactiv, iar i'_d se numește în literatura citată „scattered current”, și ar fi caracteristic regimului deformant. În cele ce urmează curentului i'_d îi spunem tot curent deformant, iar pentru a sublinia că avem de a face cu expresii noi față de cele rezultate prin metoda clasică, acest curent reactiv și curent deformant, precum și puterile respective Q' și P' le-am notat cu indicele prim.

Curentul i debitat de sursă se descompune deci în trei componente i_a , i'_r , i'_d , astfel că se poate scrie:

$$i = i_a + i'_r + i'_d \quad (3.75)$$

Se observă însă că valoarea medie pe timp de o perioadă a câte doi a câte doi dintre acești curenți, luați în ordine, este nulă, adică:

$$\langle i_a, i'_r \rangle = 0; \quad \langle i'_r, i'_d \rangle = 0; \quad \langle i'_d, i_a \rangle = 0 \quad (3.76)$$

ceea ce se verifică, dacă se ține seama de expresiile acestor curenți și de expresia valorii medii a două funcții nesinusoidale periodice, având aceeași perioadă. Datorită acestui fapt curenții sunt mutual ortogonali, ceea ce înseamnă că între valorile lor efective se poate scrie relația :

$$I^2 = I_a^2 + I_r'^2 + I_d'^2 \quad (3.77)$$

în care :

$$I_a = \frac{P}{U} \quad (3.78)$$

$$I_r' = \sqrt{\sum_k B_k^2 U_k^2} \quad (3.79)$$

$$I_d' = \sqrt{\sum_k (G_k - G_e) U^2} \quad (3.80)$$

Prin înmulțirea tuturor acestor termenilor cu valoarea efectivă a tensiunii aplicate, se obține relația dintre puteri:

$$S^2 = P^2 + Q'^2 + D'^2 \quad (3.81)$$

care este analogă descompunerii clasice , doar că termenii Q' și D' au alte expresii decât Q și D. De asemenea și aceste puteri sunt mutual ortogonale și se pot reprezenta în spațiu, analog reprezentării puterilor din descompunerea clasică.

De fapt, valoarea efectivă a curentului reactiv este egală cu rădăcina pătrată a sumei pătratelor valorilor efective ale curenților reactivi ai armonicilor . În adevăr :

$$I_{rk} = I_k \sin \varphi_k = \frac{Q_k}{U_k} \quad (3.82)$$

unde Q_k este puterea reactivă corespunzătoare armonicii k. Ținând seama de expresia cunoscută din regim sinusoidal a puterii reactive în funcție de susceptanță și tensiune, pentru puterea reactivă corespunzătoare armonicii k rezultă $Q_k = B_k U_k^2$, astfel că relația (3.82) devine :

$$I_{rk} = \frac{Q_k}{U_k} = B_k U_k \quad (3.83)$$

În consecință, puterea reactivă Q' are expresia :

$$Q' = UI_r' = U \sqrt{\sum_k \left(\frac{Q_k}{U_k} \right)^2} \quad (3.84)$$

Se vede că, în cazul că se consideră descompunerea prezentată a curentului nesinusoidal (relația 3.77), pentru puterea reactivă Q' se obține un rezultat diferit (relația 3.84). De altfel, în tabelul 3.1 respectiv 3.2 anexat, pe baza unor înregistrări efectuate în instalații în exploatare, înregistrări prezentate în detaliu în ANEXA 4, s-a calculat puterea reactivă Q' dată de (relația 3.84) respectiv puterea reactivă Q determinată conform teoriei Budeanu. După cum era și de așteptat, există diferențe între cele două expresii. De altfel, în expresia puterii reactive Q' propusă de Czarnecki, puterile reactive ale armonicilor componente rezultă mărimi pozitive (relația 3.84).

Se verifică faptul că particularizând relația (3.84) pentru un regim sinusoidal se obține tocmai expresia cunoscută dintr-un astfel de regim.

Descompunerea prezentată are particularitatea de a permite compensarea în regim nesinusoidal, teoretic chiar completă, a puterii reactive Q' astfel: să presupunem un diport reactiv pasiv, de susceptanță B_k pentru frecvență armonică de ordinul k , conectat în paralel cu circuitul receptor. Atunci curentul I'_r total devine:

$$I'_r = \sqrt{\sum_k (B_k + B_k^*)^2 U_k^2} \quad (3.85)$$

Se poate vedea din această relație că, dacă pentru fiecare armonică susceptanța B_k^* a dispozitivului reactiv conectat în paralel cu receptorul, va fi egală și de semn contrar cu susceptanța B_k^* a sarcinii, adică dacă:

$$B_k^* = -B_k \quad (3.86)$$

atunci curentul reactiv I'_r relația (3.86), respectiv puterea reactivă a ansamblului în regim nesinusoidal, devin nule, adică s-a realizat o compensare totală.

Este o idee teoretic interesantă, în orice caz distinctă principial de compensarea clasică, obișnuită a puterii reactive. O caracteristică a acestei metode de compensare este aspectul următor: compensarea puterii reactive Q' în regim nesinusoidal, se face prin compensarea puterilor reactive Q_k ale armonicilor ce intervin. Structura circuitului reactiv de compensare s-ar putea obține prin operațiuni de sinteză, din condiția pusă de a avea o anumită susceptanță echivalentă pentru frecvențele diferitelor armonice. Desigur că dificultatea de a găsi prin sinteză structura unor astfel de circuite de compensare este cu atât mai mare cu cât în procesul real intervin mai multe armonice. De asemenea problema se complică dacă se ține seama că de obicei în practica energetică sarcina nu e constantă. Nu mai punem în socoteală că receptorul poate să fie și neliniar.

În concluzie, în legătură cu descompunerea prezentată și implicit cu posibilitatea de compensare a puterii reactive, trebuie menționat faptul că această posibilitate este mai mult teoretică și este fără perspective reale de aplicare în electroenergetică. L.S.Czarnecki extinde aceste idei și la sisteme trifazate [C14, C18].

Inregistrare: ANEXA 1
 Loc masura: PT REDRESOR 2 ZAMFIRESCU
 Data: 7/8/1999 ORA 13:10

Tabelul 3.2

Faza	S [KVA]	P [KW]	Budeanu		Czarnecki	
			Q[KVAR]	D[KVAD]	Q'[KVAR]	D'[KVAD]
R	19.6451	17.2853	1.79193	9.16173	6.38046	6.81454
S	25.9863	24.0233	0.4521	9.89791	7.77758	6.1386
T	13.0706	11.9056	0.10959	5.39286	3.30101	4.26594

Tabelul 3.1

Armonica	Faza																				
	R						S						T								
	U _{K(V)}	I _{K(A)}	φ_{KU}	φ_{KI}	$\varphi_{KU} - \varphi_{KI}$	U _{K(V)}	I _{K(A)}	φ_{KU}	φ_{KI}	$\varphi_{KU} - \varphi_{KI}$	U _{K(V)}	I _{K(A)}	φ_{KU}	φ_{KI}	$\varphi_{KU} - \varphi_{KI}$	U _{K(V)}	I _{K(A)}	φ_{KU}	φ_{KI}	$\varphi_{KU} - \varphi_{KI}$	
1	274.8	64.3	0.1	5.1	5	267	91.17	238.1	238.3	0.2	280.5	42.92	116.8	116.6	-0.2	0.00001					
2	0.192	19.84	153.4	199.3	45.9	0.08	12.42	270.7	166.1	-104.6	0.281	12.89	171.6	311.1	139.5	0.00001					
3	12.81	13.29	66	261.2	195.2	11.56	10.09	58.3	305.5	247.2	12.68	0.627	65.1	106.9	41.8	0.00001					
4	0.082	7.163	198.4	329.6	131.2	0.08	6.45	109	87.5	-21.5	0.084	6.037	204.8	181.2	-23.6	0.00001					
5	15.42	16.31	38.9	143.1	104.2	16.69	25.74	145.7	261.5	115.8	14.28	8.926	262.5	26.6	-235.9	0.00001					
6	4.616	3.318	109.9	279.7	169.8	4.59	3.929	108.3	47.1	-61.2	5.05	1.082	110	173.1	63.1	0.00001					
7	16.27	5.607	3.8	152.9	149.1	14.07	10.09	248	20.4	-227.6	14.03	5.41	112.3	265.9	153.6	0.00001					
8	0.00001				0	0.0001				0	0.0001				0	0.0001					
9	0.00001				0	0.0001				0	0.0001				0	0.0001					
10	0.00001				0	0.0001				0	0.0001				0	0.0001					
11	0.00001				0	0.0001				0	0.0001				0	0.0001					
Val.ef.	276.049	71.1654				268.179	96.8991				281.5446	46.4244									

3.4. Concluzii și contribuții originale

În literatura de specialitate există un consens general numai în privința expresiilor puterilor ce intervin la circuitele monofazate și trifazate simetrice, în regim de funcționare sinusoidal [A8]. Problema definirii puterilor nu mai este așa de simplă în cazul circuitelor trifazate în regimuri nesimetrice sau / și în regimuri nesinusoidale.

Preocupările științifice de definire a puterii în cazul unor sisteme trifazate în regimuri nesimetrice și nesinusoidale datează de foarte multă vreme [B1, B5, F6]. În această problemă există numeroase lucrări de analiză în domeniul frecvenței și în domeniul timp [B1, C11, C12, C15, F6, K5, P5, S1, S3]. În acest capitol însă se prezintă și se discută doar expresiile cele mai uzuale ale puterilor ce intervin în analiza regimurilor nesimetrice și nesinusoidale. Unele considerații critice se face numai în legătură cu expresia puterii reactive în regim nesinusoidal propusă de L. S. Czarnecki, care contestă adoptarea expresiei puterii reactive propusă de C. Budeanu și recomandată de C.E.I.

Se poate observa că, dacă într-o perioadă destul de lungă cercetările în acest domeniu au fost orientate mai mult pe plan teoretic, tendința mai recentă este de a se găsi soluții pragmatice în problema puterilor. În acest sens merită să se sublinieze activitatea colectivului „IEEE Working Group of Nonsinusoidal Situations”, care într-o lucrare recentă [W1] prezintă o serie de sugestii și relații de calcul practice pentru cazul general al sistemelor trifazate nesimetrice, care în același timp funcționează și în regim nesinusoidal.

Dintre puterile prezentate în acest capitol, o importanță deosebită o are puterea aparentă echivalentă, a cărei expresie este foarte răspândită în practică. Expresia acestei puteri are la bază un criteriu energetic de echivalență foarte bine precizat. Este interesant de menționat că, expresia puterii aparente echivalente pentru sisteme trifazate cu 3 conductoare a fost propusă cu mulți ani înainte de F. Buchholz [B7], mai mult pe bază de intuiție, iar ulterior expresia a fost regăsită pe cale teoretică, în mod deosebit menționând aplicarea metodei componentelor simetrice [E2]. Într-o foarte recentă lucrare [E3] se analizează și extinderea definiției puterii aparente echivalente pentru sisteme trifazate cu 4 conductoare.

Capitolul mai cuprinde și unele referiri la componentele puterilor instantanee, fie în scopul relevării unor rezultate caracteristice în aceste regimuri, fie în scopul punerii în evidență a circulației componentelor puterilor instantanee de secvență directă, inversă și homopolară.

Contribuțiile cu caracter de originalitate formulate în acest capitol sunt :

- *se face propunerea ca puterea fluctuantă rezultantă la un sistem trifazat nesimetric să fie un indicator simplu pentru relevarea gradului de nesimetrie al sistemului. Se arată și posibilitatea de realizare practică a unei astfel de scheme, cu generatoare Hall;*
- *promovarea în analiză a puterii aparente echivalente și relevarea criteriului energetic care stă la bază;*
- *elaborarea unui model grafic explicativ pentru componentele puterii aparente într-un regim nesimetric;*
- *definirea sistematică a puterilor în regim nesimetric și nesinusoidal ;*
- *analiza critică a teoriei Czarnecki privind expresia propusă de acest cercetător pentru puterea reactivă în regim nesinusoidal.*

CAPITOLUL 4

Factorul de putere în rețele ce alimentează consumatori dezechilibrați și neliniari

Dacă în regimul armonic monofazat factorul de putere al unui consumator liniar se definește ca fiind raportul dintre puterea activă absorbită și puterea maximă activă pe care acesta putea să o absoarbă în condițiile menținerii aceluiași pierderi de putere în rețeaua de alimentare sau a aceleași valori efective a curentului în regim nesimetric și nesinusoidal, lucrurile devin mult mai complicate și aceasta din cauza interacțiunii problemelor energetice legate de transferul energiei electrice de la surse la consumatori, cu acela de calitate a energiei consumate [B8], [C8], [T1].

În cele ce urmează vor fi prezentate câteva probleme legate de calitatea energiei electrice tendințele care se manifestă actualmente în definirea și estimarea factorului de putere, precum preocupările de a încadra factorul de putere într-un cadru mai general acela de indicator de calitate a puterii active (energii active) consumate, util în asigurarea calității energiei electrice produse transportate, distribuite și consumate.

4.1 Calitatea energiei electrice. Indicatorii de calitate ai energiei electrice.

Calitatea energiei electrice constituie o problemă complexă și controversată. Complexitatea acesteia rezidă din multitudinea de factori care o condiționează din interdependența acestora. Multe din aspectele pe care le comportă calitatea energiei electrice nu sunt nici astăzi suficient fundamentate, definite și mai ales unanim acceptate [B8], [C8], [T1]. Numeroasele definiții care privesc calitatea energiei electrice vizează de fapt trei direcții principale și anume [C8], [T1]:

- energia este o marfă deci ei i se pot atribui calitățile acesteia;
- energia este un serviciu, alimentarea cu energie electrică a consumatorilor și acesta trebuie efectuat în condiții de calitate bine stabilite;
- energia este mărimea de ieșire a unui sistem, complex și ierarhizat sistemul electroenergetic.

Indiferent cum este privită, calitatea energiei electrice trebuie analizată fără îndoială în contextul relației furnizor-consumator sub incidența perturbațiilor. Acestea afectează calitatea energiei consumate modificând valoarea "factorului de putere". Dar perturbațiile pot fi provocate de furnizor, de consumator sau de cauze externe lor. Ca urmare mărimile ce caracterizează aceste perturbații nu sunt de regulă specifice consumatorilor, ci ele caracterizează interacțiunea dintre furnizor-consumator.

Pe de alta parte, perturbațiile sunt acelea care "strică" calitatea energiei electrice, afectând defavorabil procesul de producere transport și distribuție dar și de consum a energiei electrice. Cât de mult este afectată calitatea energiei de perturbații? Aceasta se poate aprecia pe baza unor indicatori sau parametrii energiei electrice care răspund prompt la acțiunea perturbațiilor.

Astfel calitatea energiei electrice se poate defini ca fiind ansamblul parametrilor (indicatorilor), care condiționează utilitatea energiei electrice, adică satisfacerea necesităților consumatorilor în concordanță cu destinația lor. Firește scopul furnizorului de energie electrică este acela de a asigura în permanență la dispoziția consumatorilor o

tensiune alternativă, sinusoidală de frecvență și valoare efectivă menținută între anumite limite, cât mai strânse, fixate contractual, egale pe cele trei faze ale rețelei. Deci asigurarea calității energiei electrice înseamnă menținerea indicatorilor energiei în limite admise. Dar acesta nu depinde așa cum s-a menționat anterior numai de furnizor ci și de modul în care este consumată energia electrică de consumator, de perturbațiile pe care le produce acesta și mai ales de cum sunt transmise în rețeaua de alimentare și percepute în nodul de racord al consumatorului. Prin urmare indicatorii ce exprimă modul în care consumatorul utilizează energia electrică absorbită din rețea, trebuie să aibă un caracter global incluzând în conținutul lor și referiri la calitatea energiei, de fapt la noncalitatea acesteia datorată lor în primul rând.

Deci caracteristicile procesului de consum sau transport și distribuție a energiei electrice nu pot fi separate de noncalitatea energiei electrice pe care o provoacă aceste procese. Cu alte cuvinte înrăutățirea calității energiei electrice consumate determină efecte energetice defavorabile (în cel mai simplu caz pierderi suplimentare).

Calitatea energiei electrice într-un nod al sistemului electroenergetic poate fi apreciată în funcție de [B8], [T1]:

- nivelul abaterilor tensiunii față de tensiunea nominală;
- nivelul abaterilor frecvenței față de frecvența nominală;
- gradul de simetrie a sistemului trifazat de tensiuni și curenți;
- puritatea curbilor de tensiune și curent, dorite a fi de forma sinusoidală.

Corespunzător acestor aspecte se introduc indicatori de calitate specifici sau globali. În majoritatea țărilor indicatorii de calitate specifici caracterizează cantitativ variațiile de tensiune, forma și simetria sistemului trifazat de tensiuni și curenți, precum și caracteristicile de variație ale frecvenței. Indicatorii globali reprezintă combinații ale indicatorilor specifici și ei conțin de multe ori și informații despre efectele energetice determinate de înrăutățirea calității energiei electrice, precum și de gradul de participare al consumatorilor.

Ca urmare în regimurile perturbate, factorul de putere își pierde sensul fizic atribuit în regimul ideal, fiind de fapt un indicator de calitate a energiei consumate, care așa cum s-a mai menționat reflectă efectele energetice determinate de înrăutățirea calității energiei electrice, precum și gradul de participare al consumatorului la aceasta înrăutățire. Dintre acești indicatori de calitate a energiei consumate se pot menționa:

- factorul de putere global k_p [T6], [T7], compus din factorul de putere de simetrie care ține seama de consumul de putere pe secvența pozitivă a armonicilor fundamentale k_{p1}^+ , factorul de putere nesimetric care ține seama de nesimetria regimului fundamentalei k_{p1}^{nes} și factorul de putere deformant care ține seama de circulația reziduului deformant al puterii active pe toate fazele și armonicile sale, indiferent de succesiunea lor, k_p^d , adică:

$$k_p = k_{p1}^+ + k_{p1}^{nes} + k_p^d \quad (4.1)$$

- indicator de deformare a puterii consumate [T1], [P15]:

$$k_d = P_1 / P_c \quad (4.2)$$

unde P_1 este puterea activă consumată pe fundamentala iar P_c puterea totală consumată;

- indicator de simetrie a puterii consumate [A3]:

$$k_n = P^+ / P_c = P^+ / (P^+ + P^- + P^0) \quad (4.3)$$

- indicatori de calitate a energiei medii [T1] de forma:

$$x_\theta = \frac{1}{\theta} \sqrt{k \int_{t-\theta}^t x^k(t) dt}$$

care reflectă influența indicatorului de calitate x pe o anumită perioadă de manifestare θ , unde gradul influenței indicatorului de calitate asupra echipamentelor și receptorilor electrici ($k=2$ pentru instalațiile de încălzit, $k=14$ pentru lămpile cu incandescență etc.);

- indicator de calitate general k_g , pentru evaluarea influenței comune a mai multor indicatori de calitate a energiei electrice asupra funcționării elementelor componente ale sistemului electroenergetic. Acesta se obține ca suma de valori medii [T2] a indicatorilor individuali x_i și anume:

$$k_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

Desigur cele prezentate corespund unor aspecte ce privesc de interacțiunea problemelor legate de calitatea energiei electrice și definirea unui factor de putere în regimuri perturbate – nesimetrice și nesinusoidale.

4.2. Tendințe în definirea și estimarea factorului de putere în regimuri nesimetrice și nesinusoidale.

În ultima perioadă se constată o preocupare intensă a cercetărilor în legătură cu definirea și estimarea puterilor și a factorului de putere în regimuri nesimetrice și nesinusoidale. Problemele legate de definirea puterilor în aceste regimuri au fost prezentate în capitolul 3, astfel ca în acest paragraf ne vom referi numai la factorul de putere, astfel legat de definirea și estimarea factorului de putere în ultima perioadă se constată următoarele preocupări și tendințe:

- stabilirea unor criterii de definire a factorului de putere în regim sinusoidal nesimetric și periodic nesinusoidal [C8], [F9], [P11];
- extinderea definiției clasice stabilite pentru consumatorul liniar funcționând în regimul periodic armonic la consumatorii trifazați dezechilibrați și neliniari [E3], [F2], [P14];
- cuprinderea indicatorilor de calitate a energiei electrice în expresia factorului de putere acesta devenind astfel un factor de calitate global al energiei consumate [F8], [F9], [W1];
- utilizarea teoriei puterilor instantanee la definirea unui factor de putere instantaneu [F7], [P16];
- dezvoltarea tehnicilor digitale în vederea realizării unor sisteme de măsurare performante a factorului de putere [E4], [T1];

Desigur problema cea mai delicată apare la definirea factorului de putere în nodurile de consum, în condițiile neasigurării energiei electrice consumate, mai ales atunci când însăși consumatorul neliniar și dezechilibrat este sursa regimului deformant și nesimetric.

4.2.1 Definirea factorului de putere în condițiile de noncalitate a energiei electrice.

În aceste condiții există două modalități principale de a proceda [F9] și anume:

- cele două probleme: definirea factorului de putere (circulația puterii reactive) și calitatea energiei electrice consumate sunt abordate diferit. Consumatorul este penalizat sensibil pentru neasigurarea calității energiei electrice consumate iar factorul de putere se calculează ca raportul dintre puterea totală consumată și puterea aparentă echivalentă calculată după Buchholz [B7], reluată de altfel și în [W1]. În aceste condiții factorul de putere își păstrează semnificația fizică, deși a pierdut proprietățile pe care le a avut în regim sinusoidal monofazat de a caracteriza complet consumatorul, el mai reprezintă încă un indicator de conformitate a formelor curbilor de curent de acelea de tensiune [F8] sau a simetriei curenților și tensiunilor [E4]. Datorită penalizărilor consumatorul va fi preocupat

să ia măsuri pentru echilibrarea sarcinii, stingerea armonicilor. Cu această ocazie va constata ca problema nu poate fi soluționată separat de aceea a compensării puterii reactive și ca soluționarea completă a problemei: calitate-factor de putere (reducerea circulației de putere reactive în rețea) presupune abordarea simultană acelor trei aspecte: compensarea-filtrarea, echilibrare [B9], [M17];

- cele două probleme sunt abordate simultan, factorul de putere este definit ca și un indicator global de calitate a energiei consumate care cuprinde în conținutul său atât din clasicul " $\cos\varphi$ " corespunzător fundamentalei și secvenței pozitive, cât și coeficienți de nesimetrie și de deformare care diminuează sensibil valoarea factorului de putere [F9], [P14]. Valorile scăzute ale indicatorului global de calitate obligă plata către furnizor a unor penalizări majorate, fapt ce va obliga consumatorul nelinier și dezechilibrat să ia măsuri corespunzătoare pentru a-și diminua emisia de curenți (și de puteri) de nesimetrie și deformante, el devine un instrument pentru furnizorul de energie de a obliga consumatorul nelinier și / sau dezechilibrat să consume îngrijit energia electrică [C8]. Desigur trebuie menționat aici spre exemplu factorul de putere ajustat armonic [C8] sau cel capacitiv [M17]. Mulți cercetători [C8] propun adoptarea diferențială a unor astfel de factori globali de calitate de către furnizorul de energie, dar fără îndoială consumatorul trebuie încurajat și sprijinit să-și filtreze emisiile perturbatoare în rețea.

Un alt aspect care se cuvine a fi relevat aici, este legat de faptul că unii cercetători [A3] nu acceptă utilitatea unui factor de putere trifazat și consideră că este suficient de a lucra cu un factor de putere monofazat, pe fiecare fază. Comoditatea care apare la prima vedere însă nu se justifică decât într-o primă etapă, deoarece limitarea dezechilibrului, stingerea armonicilor și reducerea circulației de putere reactivă în rețea trebuie făcute simultan, cu instalații trifazate-compensatoare de putere reactivă controlate static.

4.2.2 Criterii pentru definirea unui factor de putere în regim nesimetric și nesinusoidal.

În lucrările sale acad. Țugulea [T6], [T7], precum prof. Emanuel care-l citează pe Țugulea [E2], [E4] evidențiază câteva criterii care trebuiesc avute în vedere la definirea unui factor de putere în regimul periodic nesinusoidal al rețelelor electrice. Cum acest regim apare în rețelele trifazate aproape întotdeauna însoțit și de cel nesimetric [I4], practic se poate vorbi de un factor de putere definit în regim nesinusoidal și nesimetric. Astfel:

- factorul de putere trebuie să permită aprecierea gradului de utilizare a puterii active disponibile pentru un consumator alimentat de la rețea;
- trebuie să ofere informații despre consumul tehnologic (pierderile din rețea determinate de alimentarea consumatorului cu o anumită putere activă);
- prin definiția lui trebuie să ofere informații privind căile de creștere a valorii sale la valoarea optimală și chiar să oblige consumatorul să facă acest lucru;
- în regim permanent (sinusoidal, simetric) definiția factorului de putere trebuie să se reducă la aceea clasică;
- trebuie să poată fi măsurat cât mai simplu cu mijloace existente, sau ușor de conceput și realizat. În acest sens este necesar să se apeleze la mărimi cumulate în timp (energii pe cât posibil corespunzătoare unor puteri reale sau fictive).

La aceste criterii mai pot fi adăugate și altele [C8], [P14], [T1], cum ar fi:

- factorul de putere trebuie să constituie un indicator global de calitate a energiei electrice consumate;
- definirea factorului de putere trebuie să aibă în vedere o abordare mai largă, sistemică, de interfațare a consumatorului cu restul sistemului energetic, situația unui generator ideal și a unei rețele liniare și simetrice fiind un caz idealizat;

- să poată fi normat ușor, adică să cuprindă indicatori de calitate: compensare, nesimetrie, deformare, normați deja, fie să permită normarea orientată, pentru a obliga consumatorul să limiteze emisia în rețea a unor anumite perturbații (armonici spre exemplu). Desigur aceste criterii trebuie privite reunit, într-un tot unitar, plecat de la unul dintre ele și analizat cum sunt îndeplinite apoi condițiile impuse de celelalte criterii [T7].

Oricum, o prioritate a criteriilor prezentate mai sus nu se pot stabili decât dacă se are în vedere scopul urmărit prin definirea factorului de putere și politica energetică promovată de companiile producătoare, cum ar fi :

- reducerea circulației de putere reactivă în rețeaua de alimentare;
- echilibrarea sarcinilor consumatorului pe cele trei faze;
- limitarea poluării armonice produse de consumatorii deformanți.

4.3 Posibilități de definire a factorului de putere în regim nesinusoidal și nesimetric.

Pentru a defini efectiv factorul de putere, în continuare se va considera câte unul din criteriile mai sus enumerate și se rescrie expresia factorului de putere considerând mai întâi regimul monofazat nesinusoidal iar apoi cel trifazat nesimetric și nesinusoidal, desigur regimul nesimetric sinusoidal va fi considerat ca unul particular al celui nesimetric și nesinusoidal. O atenție sporită așa cum de fapt se prezintă și în literatură se va acorda modului de definire a puterii aparente [W1], [E2].

4.3.1 Factorul de putere permite aprecierea gradului de utilizare a puterii active disponibile maxime α .

Dacă se consideră un consumator monofazat , în regim nesinusoidal, factorul de putere se poate defini cu relația:

$$k_p = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{P_1 + P_d}{P_{\max}} \quad (4.4)$$

unde:

P este puterea activă absorbită de consumator;

P_1 - puterea activă pe fundamentală;

$P_d = \sum_{k=2} P_k$ - puterea activă pe armonici sau reziduul deformant al puterii active ;

k-rangul armonicii .

În legătură cu relația (4.4) se pune problema modului în care se determină puterea maximă P_{\max} . Astfel unii cercetători consideră că acesta trebuie calculată cu valorile efective ale tensiunii și curentului [A3], adică:

$$P_{\max} = S = UI = \left[\sum_{k=1} U_k^2 \right]^{1/2} \cdot \left[\sum_{k=1} I_k^2 \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

Acad. Țugulea arată că P_{\max} corespunde fundamentalei [T6].

$$P_{\max} = S_1 = U_1 I_1 \quad (4.6)$$

Desigur, dacă consumatorul este neliniar și nu absoarbe de la sursele sistemului decât pe fundamentala $P_{\max} = P_1$, dacă însă este liniar evident $P_1 < P_{\max}$. Oricum, dacă ne referim la consumatorii neliniari și dezechilibrați evident ca $P_{\max} = P_1$.

În ceea ce privește regimul trifazat nesimetric, încă din 1920, AIEE și National Electric Light Association definește factorul de putere cu două relații:

$$k_p^a = \frac{\sum_{m=1}^3 P_m}{\sum_{m=1}^3 S_m} \quad (4.7)$$

și

$$k_p^b = \frac{\sum_{m=1}^3 P_m}{\left| \sum_{m=1}^3 P_m + j \sum_{m=1}^3 Q_m \right|} \quad (4.8)$$

unde m este indicele corespunzător fazei.

Dacă în regim simetric cele două relații conduc la aceeași valoare pentru factorul de putere, nu același lucru se întâmplă și în regim nesimetric unde diferențele pot fi semnificative. Astfel Emanuel arată: considerând $S_1 = S_2 = P(1+j)$ și $S_3 = 2P(1-j)$ se obține $k_p^a = 0.707$ iar $k_p^b = 1$, ceea ce nu este deloc corespunzător.

Pentru îndreptarea situației Emanuel propune [E2], [E3] și apoi și IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations [W1] recomandă calculul puterii aparente echivalente cu relația:

$$S = 3U_e I_e \quad (4.9)$$

unde U_e și I_e sunt tensiunea echivalentă și respectiv curentul echivalent, determinate cu relațiile cunoscute încă de Buchholz, Goodhue și Manea [E3],[M2] și prezentate în capitolul 3 al acestei lucrări. O extensie a acestor relații este prezentată de Emanuel în [E4] pentru situația cu patru conductoare:

$$U_e = \left[(U_{RN}^2 + U_{SN}^2 + U_{TN}^2 + U_{nN}^2) / 3 \right]^{1/2}$$

$$I_e = \left[(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_n^2) / 3 \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

iar dacă neutrul rețelei nu este accesibil

$$U_e = \left[(U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2) / 9 \right]^{1/2}$$

sau $U_e = \left[(U_R^2 + U_S^2 + U_T^2 + U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2) / 12 \right]^{1/2} \quad (4.11)$

dacă $I_n = 0$.

În relațiile (4.10), (4.11) mărimile care intervin au notația consacrată iar N este neutrul artificial (fig. 4.1)

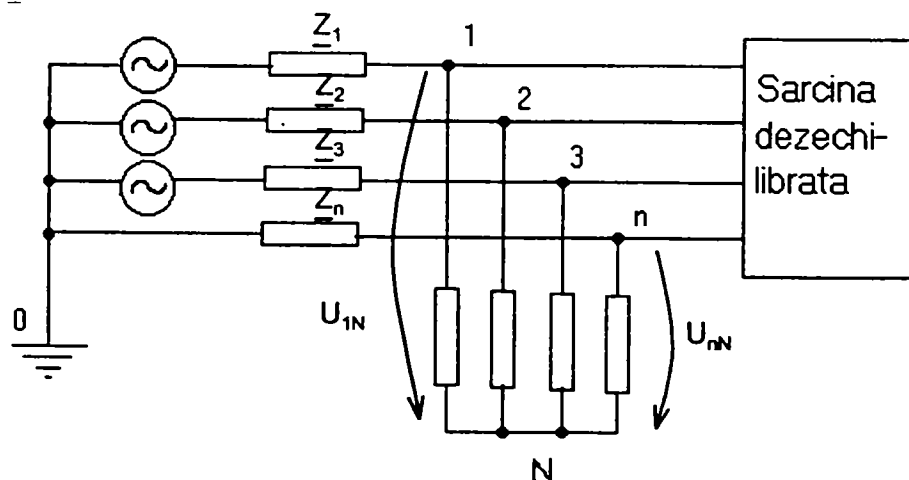


Fig. 4.1 Formarea neutrului artificial în vederea măsurării tensiunilor celor patru conductoare.

Deși susceptibilă de discuții, introducerea puterii aparente echivalente prin relația (4.9) prezintă avantajul că păstrează semnificația fizică a factorului de putere.

În sprijinul definiției puterii aparente și implicit a factorului de putere dată de Buchholz se pronunță și prof. A. M. Ferrero [F8] care arată că această definiție asigură puterii aparente următoarele proprietăți:

- nu este niciodată mai mică decât valoarea absolută a puterii active pentru aceleași valori efective ale tensiunii și curentului;
- este egală cu valoarea absolută a puterii active în condițiile regimului sinusoidal și simetric;
- este egală cu zero dacă și numai dacă fiecare dintre seturile de tensiuni sau curenți sau ambele seturi sunt identice cu zero. În regim nesimetric și nesinusoidal, acad. Țugulea arată ca puterea activă maximă pe care o poate absorbi consumatorul dezechilibrat și neliniar, este aceea corespunzătoare fundamentalei și secvenței pozitive, adică:

$$P_{\max} = S_1^+ = U_1^+ I_1^+ \quad (4.12)$$

$$k_p = \frac{P}{s_1^+} = \frac{P_1 + P_d}{3U_1^+ I_1^+} = \frac{P_1^+ + P_1^- + P_1^0 + P_d}{3U_1^+ I_1^+} \quad (4.13)$$

Dacă se apelează la mărimile caracteristice regimului nesimetric și nesinusoidal, relația (4.13) devine:

$$k_p = \cos \varphi_1^+ + \gamma_{nU_1}^- \gamma_{nI_1}^- \cos \varphi_1^- + \gamma_{nU_1}^0 \gamma_{nI_1}^0 \cos \varphi^0 + \sum_{m=1}^3 \sum_{k \neq 1} \gamma_{sk}^m \cos \varphi_{km} \quad (4.14)$$

unde:

$\cos \varphi_1^+$, $\cos \varphi_1^-$, $\cos \varphi_1^0$ sunt factori de putere pe fundamentală și respectiv secvența negativă și zero și aceștia au semnele puterilor active corespunzătoare ;

$\gamma_{nU_1}^-$, $\gamma_{nU_1}^0$, $\gamma_{nI_1}^-$, $\gamma_{nI_1}^0$ - coeficienții de nesimetrie ai tensiunilor și curenților de secvență negativă și zero pe fundamentală;

$\cos \varphi_{km}$ - factorul de putere pe armonică k și fază m și are semnul puterii active corespunzătoare.

γ_{sk}^m - coeficientul puterii aparente pe armonica k și faza m.

Din analiza relației (4.14) se constată că expresia factorului de putere conține toate informațiile referitoare la:

- circulația puterii reactive pe fundamentală și secvențele acesteia precum și armonicile superioare,
- gradul de simetrie al tensiunilor și curenților pe fundamentală și al puterilor aparente pe armonicile superioare;
- nivelul de deformare al curbilor de tensiune și curent prin ponderea puterii aparente pe armonica k în puterea aparentă pe fundamentală.

Desigur celelalte criterii pot fi ușor verificate că sunt îndeplinite astfel:

- valoarea redusă a factorului de putere se poate datora valorilor negative a lui $\cos \varphi_1^-$, $\cos \varphi_1^0$, $\cos \varphi_{km}$ și valorilor relativ mari ale lui $\gamma_{nU_1}^-$, $\gamma_{nI_1}^-$, $\gamma_{nU_1}^0$, $\gamma_{nI_1}^0$, γ_{sk}^m ;
- în absența regimului nesimetric și nesinusoidal $k_p = \cos \varphi_1^+ = \cos \varphi$;
- toate mărimile care intervin în relația (4.14) pot fi măsurate cu ajutorul unor sisteme digitale. În acest sens în fig. 4.2 este prezentată schema bloc a unui astfel de sistem. Mijloacele clasice de măsurare sunt insuficiente pentru a asigura estimarea corectă a factorului de putere definit astfel.

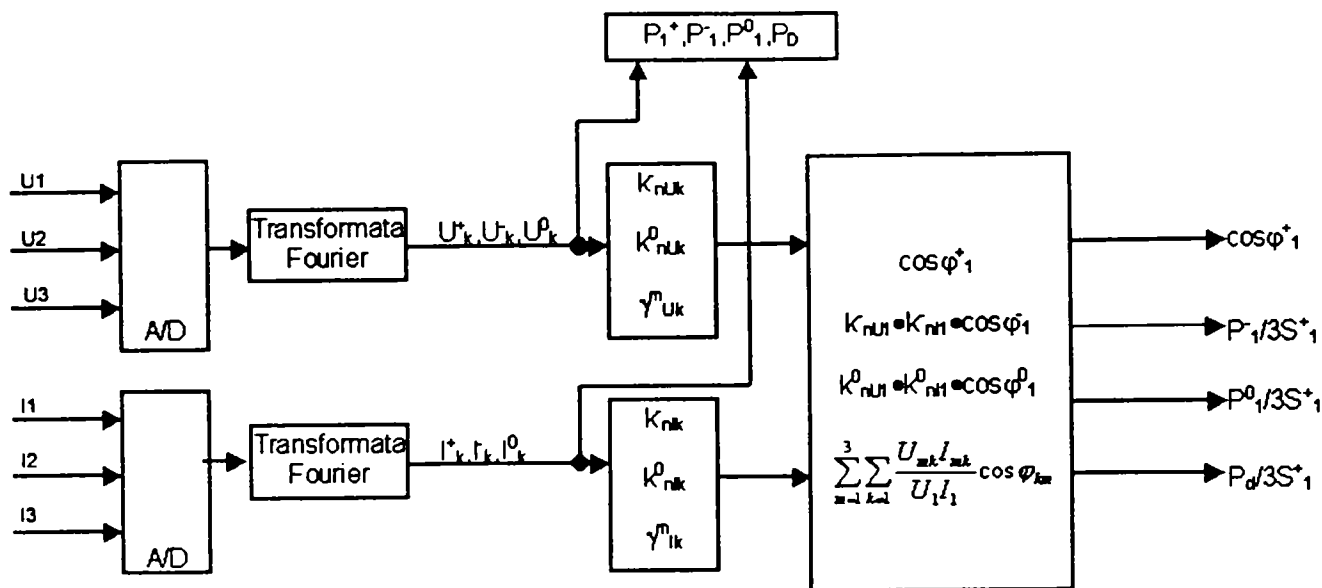


Fig.4.2. Schema bloc a sistemului bloc de estimare a factorului de putere definit cu relația(4.14)

Pot fi măsurate ușor mărimile care sunt cuprinse în definiția sa, fiind în majoritate indicatori de calitate ai regimului nesimetric și nesinusoidal. Singura observație care se poate ridica este aceea referitoare la factorul de putere armonic a cărei valoare este mică și aceasta pe măsură ce rangul armonicii k crește.

Poate fi considerat ca un indicator global de calitate pentru consumatorii neliniari și dezechilibrați, valoarea sa optimă fiind egală cu unitatea.

Întrucât factorul de putere prin această definiție și-a pierdut sensul inițial, este fără îndoială mai util a fi denumit *factor de calitate global* sau *factor de calitate al puterii consumate*.

O altă cale de definire a factorului de putere pe baza acestui criteriu poate avea în vedere înlocuirea regimului nesinusoidal nesimetric cu unul simetric sinusoidal echivalent. Astfel în regim nesimetric și nesinusoidal așa cum s-a prezentat în capitolul 3 apare o circulație de puteri pe fundamentală, puteri care pot fi descompuse în componente de secvență și o circulație de puteri pe fiecare armonică superioară. Curenții corespunzători acestor puteri vor produce pierderi în circuitul electric pe care-l străbat. Drept urmare, se poate determina un curent echivalent, simetric, sinusoidal, care va produce același pierderi în circuit. Acest curent echivalent se poate determina cu următoarea relație:

$$I_e = I_{el} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{I_{e2}}{I_{el}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{ek}}{I_{el}}\right)^2} \quad (4.15)$$

unde :

I_{el} – reprezintă un curent echivalent corespunzător fundamentalei;

I_{ek} – curent echivalent corespunzător armonicii de rang "n".

$$I_{el} = \sqrt{\frac{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2}{3}} \quad (4.16)$$

$$I_{ek} = \sqrt{\frac{I_{Rk}^2 + I_{Sk}^2 + I_{Tk}^2}{3}} \quad (4.17)$$

sau, dacă există conductor neutru

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2 + \frac{r_2}{r} \cdot I_{N1}^2}{3}} \quad (4.18)$$

$$I_{e2} = \sqrt{\frac{I_{R2}^2 + I_{S2}^2 + I_{T2}^2 + \frac{r_2}{r} \cdot I_{N2}^2}{3}}$$

În aceste condiții se poate defini o putere aparentă echivalentă S astfel :

$$S_e = 3U_1^+ \cdot I_e \quad (4.19)$$

Prezența nesimetriei pe fundamentală va conduce la posibilitatea definirii puterii aparente echivalente de nesimetre pe fundamentală :

$$S_{e1} = 3U_1^- \cdot I_{e1} \quad (4.20)$$

Expresia (4.20) poate fi scrisă și altfel [E4] :

$$S_{e1}^2 = S_{1-}^2 + N^2 \quad (4.21)$$

unde :

S_{1-} – este puterea aparentă de secvență directă pe fundamentală;

N – reprezintă un termen care are dimensiunile unei puteri și poate fi denumită drept putere de nesimetrie.

În aceste condiții relația (4.19) mai poate fi scrisă :

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + H^2 \quad (4.22)$$

unde :

H – reprezintă un termen care are dimensiunile unei puteri și care ar putea fi denumită putere nonfundamentală.

Expresia (4.21) poate fi scrisă și altfel :

$$S_{e1}^2 = P_{1+}^2 + Q_{1+}^2 + N^2 \quad (4.23)$$

Expresia de mai sus sugerează ecuația unei sfere de rază S_{e1} în spațiul tridimensional definit de direcțiile lui P_{1+} , Q_{1+} și a lui N .

În mod analog expresia (4.19) poate fi scrisă :

$$S_e^2 = P_{1+}^2 + Q_{1+}^2 + N^2 + H^2 = P_{1+}^2 + N_c^2 + H^2 \quad (4.24)$$

expresie care, la rândul ei, reprezintă ecuația unei sfere în spațiul constituit de P_{1+} , N_c , și H , astfel din relația (4.24) rezultă :

$$N_c^2 = Q_{1+}^2 + N^2 \quad (4.25)$$

Construcția grafică aferentă relațiilor (4.22 ; 4.23 ; 4.24) este prezentată în fig. 4.3.

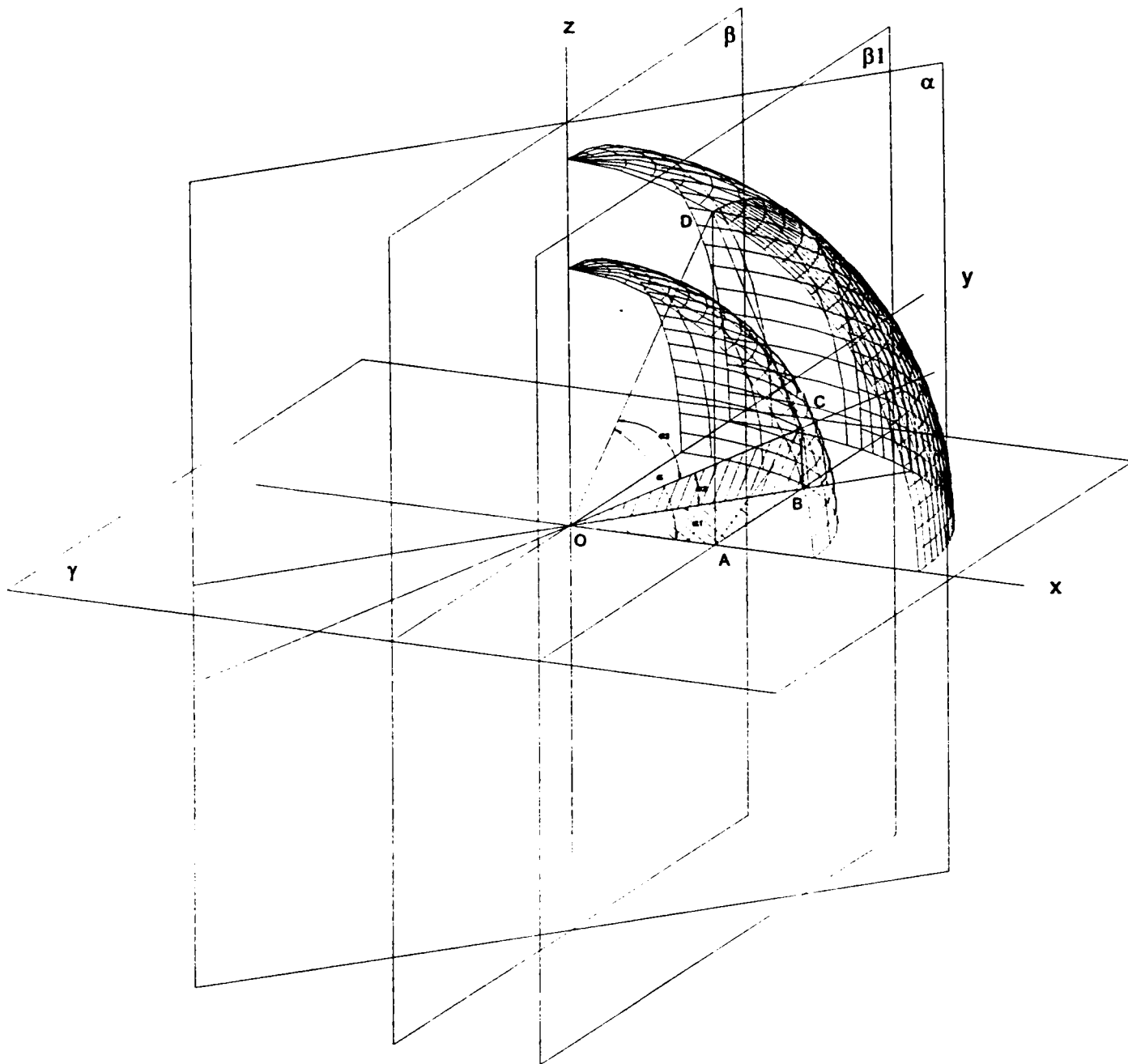


Fig. 4.3 Model grafic al compunerii puterilor în regim nesimetric și periodic nesinusoidal conform relațiilor (4.22 , 4.23 , 4.24)

În conformitate cu relațiile (4.22), (4.23), (4.24), notațiile din fig. 4.3 au următoarele semnificații:

$$OA \equiv P_1^+$$

$$OB \equiv S_1^+$$

$$AB \equiv Q_1^+$$

$$OC \equiv S_{e1}$$

$$AC \equiv N_c$$

$$BC \equiv N$$

$$DC \equiv H$$

$$OD \equiv S_e$$

(4.26)

Planul α este perpendicular pe planul xOy și face unghiul α_1 cu axa Ox .

În planul α sunt conținute segmentele de dreaptă OB, OC, BC. Segmentul OB reprezintă proiecția lui OC pe planul xOy.

Planul β_1 este la rândul său perpendicular pe planul xOy și paralel cu planul yOz.

În planul β_1 sunt conținute segmentele de dreaptă AB, AC, BC. Se construiește perpendiculara DC în punctul C pe dreptele AC și OC de lungime egală cu H ; rezultă segmentul OD de valoare S_e . Segmentul AB este proiecția lui AC pe planul xOy, astfel

ΔOCD este dreptunghic în C din construcție,

ΔACD este dreptunghic în C din construcție,

ΔOAD este dreptunghic în A din construcție.

Se observă ușor cum în absența regimului nesinusoidal H adică segmentul DC devine 0, respectiv în absența regimului nesimetric N adică BC devine 0, astfel încât în relația (4.24) devine $S_e = S_{1+}$.

În aceste condiții se poate defini factorul de putere global astfel :

$$k_p = \cos \alpha_1 = \frac{OA}{OD} = \frac{P_1^+}{S_e} \quad (4.27)$$

Factorul de nesimetrie :

$$k_{pN} = \cos \alpha_2 = \frac{OB}{OC} = \frac{S_1^+}{S_{e1}} \quad (4.28)$$

Factorul de regim deformant :

$$k_{pD} = \cos \alpha_3 = \frac{OC}{OD} = \frac{S_{e1}}{S_e} \quad (4.29)$$

Se observă cum :

$$k_p = k_{p1+} \cdot k_{pN} \cdot k_{pD} \quad (4.30)$$

unde : k_{p1+} – reprezintă factorul de putere de secvență directă pe fundamentală.

Problema care se pune constă în a verifica modul în care relația (4.30) verifică criteriile enumerate în cadrul paragrafului 4.2.2 .

Astfel analizand criteriile prezentate :

- factorul de putere trebuie să ofere informații pierderile de putere în rețea ; într-adevăr, în relațiile (4.27) respectiv (4.30) se observă ușor cum factorul de putere global este maxim doar în condițiile în care concomitent sunt îndeplinite cele trei condiții:

- consumator simetric,
- consumator liniar,
- putere reactivă minimă absorbită pe secvență directă;

- factorul de putere trebuie să ofere suficiente informații privind căile de optimizare a valorii sale; factorul de putere global exprimat de relațiile (4.27) și (4.30) privit prin prisma produsului a trei termeni oferă o imagine de ansamblu privind caracterul consumatorului sau circuitului la care face referință, oferind totodată și informații privind căile de acționare privind optimizarea valorii sale; spre exemplu un factor de putere exprimat astfel: $k_p = 0,7 \cdot 0,95 \cdot 0,87$ va sugera faptul că respectivul consumator are un factor de putere scăzut pe secvența directă, respectiv este un generator de armonici superioare; drept urmare pentru optimizarea sa va trebui acționat concomitent în sensul filtrării armonicilor respectiv în sensul compensării puterii reactive pe secvența directă;

- factorul de putere trebuie să poată fi determinat cât mai simplu; evidențierea regimurilor nesimetrice și nesinusoidale reclamă măsurători complexe și în consecință aparate de măsură complexe; în aceste condiții este de la sine înțeles că măsurarea factorului de putere în aceste regimuri, de maniera în care a fost el definit prin relațiile (4.27) și (4.30) nu se poate face cu instrumente obișnuite; problema poate fi însă rezolvată prin utilizarea

microprocesoarelor, de altfel în [E2] respectiv [S1] autorii propun realizarea unor aparate pentru măsurarea factorului de putere în regim nesimetric respectiv nesinusoidal ale căror scheme bloc sunt prezentate în lucrările respective; drept urmare, prin utilizarea tehnicii digitale este posibil a se realiza un aparat de măsură care să permită determinarea factorului de putere definit prin relația (4.27).

Schema bloc a unui astfel de aparat ar putea fi cea din figura de mai jos:

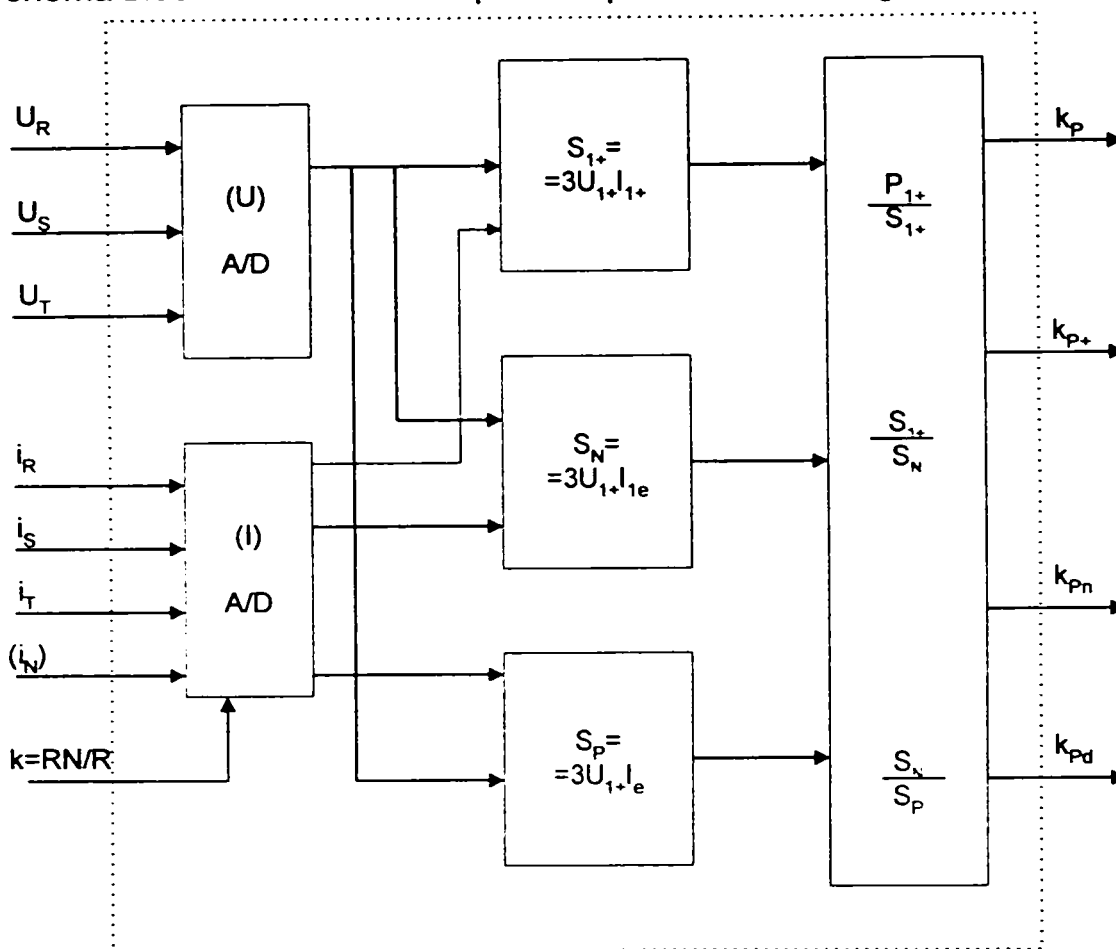


Fig. 4.4 Schema bloc a echipamentului pentru determinarea factorului de putere definit cu relația (4.30)

Schema bloc prezentată este suficient de sugestivă astfel încât nu necesită explicații suplimentare.

Factorul de putere definit de relațiile (4.27)- (4.30) satisface în bună măsură criteriile enumerate și poate fi luat în considerare în sensul caracterizării unui consumator oarecare, chiar dacă nu i se poate atribui un înțeles fizic.

4.3.2 Factorul de putere oferă informații despre pierderile de putere în rețea b.)

Astfel, pentru rețelele monofazate se poate scrie [T6]:

$$k_p = \sqrt{\Delta p_{\min} / \Delta p} = \sqrt{\Delta p_{c,f} / \Delta p} \quad (4.31)$$

unde:

$\Delta p_{c,f}$ – sunt pierderile de putere longitudinale pe linia de alimentare în situația compensării puterii reactive și a filtrării armonicilor, adică:

$$\Delta p_{c,f} = I_1^2 \cos^2 \varphi_1 R_1 \quad (4.32)$$

iar: R_1 – rezistența conductoarelor liniei pe fundamentală.

Pierderile de putere activă Δp pe linie au expresia:

$$\Delta p = \sum_k I_k^2 R_k = I_1^2 R_1 + I_1^2 \sum_{k>1} \gamma_{I_k}^2 R_k \quad (4.33)$$

unde: $\gamma_{I_k}^2$ – este nivelul armonicilor de curent de rang k;

R_k – rezistența conductoarelor liniei pentru armonica de curent de rang k;

$$\text{Ca urmare } k_p = \cos \varphi_1 / \left(1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{I_k}^2 R_k \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.34)$$

Dar, pe lângă pierderile longitudinale în rețeaua de alimentare se pot exprima și pierderi transversale δp a căror expresie poate fi:

$$\delta p = \sum_k U_k^2 G_k = U_1^2 G_1 + U_1^2 \sum_{k>1} \gamma_{U_k}^2 G_k \quad (4.35)$$

unde: U_1 – este valoarea efectivă a tensiunii liniei de alimentare;

U_k – este valoarea efectivă a armonicilor de rang k a tensiunii;

$\gamma_{U_k}^2$ – nivelul armonicilor tensiunii U_k ;

G_1, G_k – conductanța liniei pentru fundamentala respectiv armonica de rangul k;

Valoarea minimă a lui δp se obține în regim sinusoidal și are expresia:

$$\delta p_{\min} = U_1^2 G_1 \quad (4.36)$$

Corespunzător relațiilor (4.35) și (4.36) se poate introduce un coeficient de putere corespunzător consumului de putere transversal sau coeficient al pierderilor transversale $k_{\delta p}$ definit cu relația:

$$k_{\delta p} = \sqrt{\delta p_{\min} / \delta p} = \sqrt{U_1^2 G_1 / (U_1^2 G_1 + U_1^2 \sum_{k>1} \gamma_{U_k}^2 G_k)}$$

sau:

$$k_{\delta p} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{G_1} \sum_{k>1} \gamma_{U_k}^2 \cdot G_k}} \quad (4.37)$$

Ținând cont de coeficientul de pierderi transversale, expresia factorului de putere (4.34) poate fi scrisă astfel:

$$k_p = \cos \varphi_1 / \left[\left(1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{I_k}^2 R_k \right) \left(1 + \frac{1}{G_1} \sum_{k>1} \gamma_{U_k}^2 G_k \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \cos \varphi_1 \cdot k_{\Delta p} \cdot k_{\delta p} \quad (4.38)$$

unde $k_{\Delta p}$ reprezintă coeficientul de pierderi longitudinale.

În rețelele trifazate pe lângă regimul nesinusoidal apare și acela nesimetric, astfel că pierderile minime longitudinale și transversale apar în situațiile compensatorii puterii reactive, fiecărei armonici și echilibrării sarcinii. Astfel expresia (4.32) devine:

$$\Delta p_{\min} = 3I_{1+}^2 \cdot \cos \varphi_{1+}^2 \cdot R_1 \quad (4.39)$$

iar expresia (4.36) devine:

$$\delta p_{\min} = 3U_{1+}^2 \cdot G_1 \quad (4.40)$$

În plus dacă se are în vedere că în rețele cu trei conductoare $I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 = 3(I_{1+}^2 + I_{1-}^2 + I_{10}^2)$ iar $U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 = 3(U_{1+}^2 + U_{1-}^2 + U_{10}^2)$, expresia factorului de putere dată de relația (4.31) devine:

$$k_p = \frac{\cos \varphi_{1+}}{\left[1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{I_{k+}}^2 \cdot R_k + (k_{nl_1}^-)^2 \left(1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{I_{k-}}^2 \cdot R_k \right) + (k_{nl_1}^0)^2 \left(1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{I_{k0}}^2 R_k \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.41)$$

unde: $k_{nl_1}^-$, $k_{nl_1}^0$ – sunt coeficienții de nesimetrie negativă și zero a curenților pe fundamentală;

$\gamma_{I_{k+}}, \gamma_{I_{k-}}, \gamma_{I_{k0}}$ – nivelul armonicilor de curent de secvență pozitivă, negativă și zero;

Dacă se consideră rețele cu patru conductoare, relația (4.41) devine:

$$k_p = \frac{\cos \varphi_1^+}{\left[1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{ik}^2 R_k + (k^{-nl1})^2 \left(1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{ik}^2 R_k\right) + (k^{0nl1})^2 \left(1 + \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{ik0} R_k\right) + 3 \left((k^{0nl1})^2 \frac{1}{R_1} \sum_{k>1} \gamma_{ik0}^2 R_k \right)^{1/2}\right]} \quad (4.42)$$

unde: R_{nk} este rezistența conductorului neutru pentru armonica k .

În mod similar și pentru $k_{\delta p}$ se poate scrie o relație asemănătoare și anume:

$$k_{\delta p} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{G_1} \sum_{k>1} \gamma_{Uk}^2 G_k + (k^{-nU1})^2 \left(1 + \frac{1}{G_1} \sum_{k>1} \gamma_{Uk}^2 G_k\right) + (k^{0nU1})^2 \left(1 + \frac{1}{G_1} \sum_{k>1} \gamma_{Uk0}^2 G_k\right) + 3 \left((k^{0nU1})^2 \frac{1}{G_1} \sum_{k>1} \gamma_{Uk0}^2 G_k \right)^{1/2}\right]} \quad (4.43)$$

unde mărimile care intervin au semnificație cunoscută. Evident că pentru simplificare $G_k = G_1 k$ sau $G_k = G_1 (k+k^2)/2$ și aceasta dependent de faptul că ne referim la bobină sau la un transformator.

Cu cele prezentate mai sus pare și firesc ca factorul de putere să se definească ca fiind:

$$k_p = \cos \varphi_1 k_{\Delta p} k_{\delta p} \quad (4.44)$$

Relația (4.44) exprimă atât calitatea curenților cât și a tensiunilor. În [P14] se arată că valoarea lui k_p folosind o expresie de tipul celei (4.42) conduce la valori mai pesimiste decât expresia (4.14).

Analizând expresia (4.44), adică relațiile (4.42) și (4.43) se constata că toate celelalte criterii sunt îndeplinite. Mai mult la numitorul expresiilor apărând forme pătratice, întotdeauna $k_{\Delta p}$ nu poate fi supraunitar. Din nefericire expresia factorului de putere astfel definit nu ne permite diferențierea consumatorilor în poluați sau poluanți.

4.3.3 Definiția factorului de putere oferă indicații privind creșterea valorii sale și chiar obligă consumatorul să facă acest lucru. $\zeta \triangleright$

De obicei prin penalizările impuse consumatorului, furnizorul de energie impune acestuia să-și compenseze puterea reactivă, să-și filtreze armonicile și să-și atenueze dezechilibrul puterilor active. Probleme delicate apar însă datorită interdependenței dintre aceste trei aspecte [B3], motiv pentru care ele nu pot fi abordate separat, ci trebuie soluționate împreună. Situații critice pot apărea din cauza unui nivel ridicat de poluare armonică, accentuat de compensarea neîngrijită a puterii reactive. În aceste condiții în literatură se propune folosirea factorului de putere ajustat armonic [C8], [P14], [E1]. Pentru consumatorii monofazați el poate fi definit cu relația:

$$k_{ph} = \frac{P}{U_h I_h} \quad (4.45)$$

unde peste puterea activă absorbită de consumator, U_h , I_h valorile efective ale tensiunii și curentului ajustate armonic. Ele se calculează cu relația de forma:

$$A_h^2 = \sum_{k=1} C_k A_k^2, \quad A_k - \text{fiind valoarea efectivă a tensiunii sau a curentului armonic de rang } k;$$

C_k – constantă care pentru tensiune se adoptă de regulă 1, iar pentru curent $C_k=k; \sqrt[3]{k^4}; \sqrt{k}; \sqrt{1+x(k^2-1)}$, x -parametru cuprins între 0,01-0,1.

Relația (4.45) poate fi extrapolată și la consumatorii trifazați, puterea activă calculându-se cu relația cunoscută:

$$p = p^+ + p^- + p^0 + p_d$$

iar U_h^2 și I_h^2 cu relații de forma:

$$\sum_{m=1}^3 \sum_{k=1}^3 (C_k A_{km}^2) / 3 \quad (4.46)$$

Introducerea factorului de putere ajustat armonic are în vedere așa cum s-a mai menționat, atenuarea regimului nesinusoidal, dar el poate evidenția și alte aspecte. Astfel în [F9] se prezintă expresia:

$$k_{ph} = \frac{p_1}{U_1 I_1} \frac{U_1 I_1}{U_h I_h} \frac{p}{p_1} = \cos \varphi_1 \frac{1 + p_d / p_1}{\sqrt{1 + \delta_{U_h}^2} \sqrt{1 + \delta_{I_h}^2}} \quad (4.47)$$

care evidențiază și factorul de putere pe fundamentală.

În relația (4.47) δ_{U_h} și δ_{I_h} sunt coeficienții de distorsiune ajustați armonic a curbelor tensiunii și curentului, definiți cu relațiile consacrate [C8].

În regim trifazat nesimetric și nesinusoidal, δ_{U_h} și δ_{I_h} corespund unor valori medii pe cele trei faze, $\cos \varphi_1$ devine $\cos \varphi_1^+$, iar P_1 devine P_1^+ , adică:

$$k_{ph} = \cos \varphi_1^+ \frac{1 + p_d / p_1^+}{\sqrt{1 + \delta_{U_h}^2} \sqrt{1 + \delta_{I_h}^2}} \quad (4.48)$$

O relație asemănătoare cu (4.48) se prezintă în [P14] și anume:

$$k_p = \cos \varphi^+ \frac{P}{P_1^+} \frac{1}{\sqrt{(1 + \delta_{U^+}^2)(1 + \delta_{I^+}^2)}} \quad (4.49)$$

unde: δ_{U^+} , δ_{I^+} – sunt coeficienți de formă a curbei tensiunii și respectiv curentului, se

calculează cu relațiile: $\delta_{U,I^+} = \sqrt{\frac{A^2}{A_{1+}^2} - 1}$

unde: A -valoarea efectivă medie a tensiunilor sau curenților;

A_1^+ - valoarea efectivă medie pe fundamentală și secvența pozitivă;

P - puterea activă totală, asociată fundamentalei și armonicilor;

p_1^+ - puterea activă asociată fundamentalei și secvenței pozitive a curenților și tensiunilor.

4.3.4 Factorul de putere oferă informații despre regimul real de funcționare al consumatorului, dar trebuie să fie cât mai simplu măsurat. ↷

În acest sens, „IEEE Working Group on nonsinusoidal situations” [W1], definește pentru regimul nesinusoidal monofazat un factor de putere de forma:

$$k_p = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_d}{UI} = \frac{P_1 + P_d}{[(U_1 I_1)^2 + (U_1 I_d)^2 + (U_d I_1)^2 + (U_d I_d)^2]^{1/2}} \quad (4.50)$$

unde U_d și I_d sunt reziduurile deformante ale tensiunii și curentului.

Puterea activă poate fi evaluată pe o perioadă de timp T cu ajutorul unui contor de energie performant, care oferă valoarea energiei active:

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \Delta t \quad (4.50)$$

În relația (4.50), N este numărul de estimări (eșantioane) de putere efectuate în intervalul T iar Δt intervalul dintre două eșantioane consecutive.

Puterea aparentă și corespunzător "energia aparentă" poate fi evaluată cu ajutorul unor contoare de pierderi care calculează mărimile:

$$\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^2 \Delta t \quad \text{și}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i^2 \Delta t \quad (4.51)$$

Ca urmare, pe intervalul T, factorul de putere poate fi estimat cu o relație de forma:

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \Delta t}{\left(\sum_{i=1}^N U_i^2 \Delta t \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^N I_i^2 \Delta t \right)^{1/2}} \quad (4.52)$$

Pentru rețelele trifazate în locul puterilor aparente se consideră o putere aparentă echivalentă S_e , adică $S_e = U_e I_e$, unde:

$$U_e^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{U_i^2}{3} \quad \text{iar} \quad I_e^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{I_i^2}{3} \quad (4.53)$$

iar puterea activă se calculează ca sumă a puterilor active pe cele trei faze.

Practic pe fiecare fază se montează trei contoare, unul pentru energia activă, unul pentru calculul lui $\int U^2 dt$ și altul pentru calculul lui $\int I^2 dt$. După un interval T prin însumarea citirilor pe faze se calculează mărimi proporționale cu puterea activă, puterea aparentă echivalentă și corespunzător se calculează factorul de putere.

4.3.5 Factorul de putere este un indicator global de calitate a energiei consumate $e \rightarrow$

Firește expresiile (4.14), (4.42)-(4.44) și (4.49) pot constitui fără îndoială indicatori de calitate a puterii consumate, ele conținând informații privind nesimetria curenților, tensiunilor, forma curbelor de tensiune și curent, circulația puterilor reactive și pe fundamentală și chiar pe armonici.

La fel D. Sharon în [S1] propune un indicator numit „factor de calitate a puterii transferate” definit cu relația:

$$k_F = k_1 \cos \varphi_1 + k_2 \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \right) + k_3 \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \right) \quad (4.54)$$

unde: $\cos \varphi_1$ - reprezintă factorul de putere pe fundamentală;

U_1, I_1 - valorile efective ale tensiunii, respectiv curentului pe fundamentală;

U_k, I_k - valorile efective ale armonicilor de tensiune și curent de rang k;

k_1, k_2, k_3 - factorii coeficienți a căror sumă este egală cu 1, [M3], [M9];

Expresia (4.38) este valabilă pentru circuite monofazate, în circuite trifazate trebuie considerate și nesimetriile tensiunilor și curenților. Astfel:

$$k_F = k_1 \cos \varphi_1^+ + k_2 \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^3 \sum_{k=2}^{\infty} U_{mk}^2 / 3}}{U_1^+}\right) + k_3 \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^3 \sum_{k=2}^{\infty} I_{mk}^2 / 3}}{I_1^+}\right) \quad (4.55)$$

Mărimile care intervin în relația (4.39) au notația consacrată. Desigur, valoarea lui k_F depinde foarte mult de modul în care se iau coeficienții k_1 , k_2 , k_3 , aceasta oferind și posibilitatea furnizorului de energie de a dirija în sensul dorit preocupările consumatorului de a-și limita perturbațiile pe care le produce: circulație de reactiv, dezechilibrul curenților și tensiunilor, poluarea armonică.

4.3.6 Observații asupra criteriilor și posibilităților de definire a factorului de putere

Desigur diverși autori au propus expresii diferite pentru factorul de putere al consumatorilor dezechilibrați și neliniari, încercând să surprindă cât mai bine perturbațiile pe care aceștia le introduce în rețeaua de alimentare sau chiar le transmit unor consumatori echilibrați și liniari. Un clasament al propunerilor este dificil de efectuat, totuși se poate întocmi o tabelă de calificative (o variantă posibilă), referitor la modul în care sunt îndeplinite celelalte criterii mai puțin acela de definiție (tabelul.4.1), în concordanță cu cele prezentate în această lucrare :

Tabelul 4.1 Calificative acordate expresiilor factorului de putere.

Expresia	(4.14)	(4.27) (4.26) (4.25)	(4.31)	(4.36) (4.37)	(4.39)
Criteriul /Criteriul	a)	b)	c)	d)	e)
a)	X	B	B	FB	B
b)	FB ⁾	X	B	B	B
c)	FB	FB	X	B	B
d)	B ⁾	B	FB	X	FB
e)	FB	FB	FB	B	X

FB⁾ –foarte bun, B⁾ –bun

Din analiza celor înscrise în tabelul 4.1 se constată că cele mai bune calificative le au în ordine expresiile (4.14), (4.27), (4.31). calificative bune însă au și expresiile (4.36),(4.39).

Desigur așa cum a rezultat fundamental în exprimarea factorului de putere este modul de definire a puterilor aparente totale (suma aritmetică a puterilor aparente pe faze, suma geometrică, puterea aparentă echivalentă, ajustata etc.) și a puterii active considerata ($P_1^+ + P_1^- + P_1^0$; P_1^+).Orice combinație a acestor puteri poate conduce la un alt rezultat. Deci înainte de a analiza valorile factorului de putere pentru un consumator este neapărat necesar a se cunoaște cum a fost el definit.

Chiar și în aceste condiții, valoarea optimă a factorului de putere este egală cu unitatea iar măsurile de “îmbunătățire” a factorului de putere sunt de fapt măsuri de optimizare a transferului de energie (putere) de la furnizor la consumatorul de energie.

Revenind însă la criteriul a) de definire a factorului de putere , în sprijinul acestuia trebuia menționată o aplicație foarte interesantă prezentată în [P4]. Pentru un consumator particular - dezechilibrat și neliniar - tracțiunea electrică , factorul de putere s-a calculat folosind acest criteriu pe două căi distincte:

- consumatorul a fost privit ca unul trifazat, curentul absorbit pe una din faze (și puterile) fiind nul;

- consumatorul a fost considerat ca unul monofazat, alimentat între cele două faze.

Rezultatele obținute au fost practic identice $k_p=0,9165$ și respectiv 0,917 de unde a rezultat și utilitatea criteriului a).

Înainte de a încheia acest capitol se cuvine a prezenta și câteva aspecte legate de definirea unui "factor de putere momentan" știind faptul că definirea clasică a factorului de putere (aceea prezentată până aici) are la bază puteri, deci energii măsurate pe anumite intervale de timp.

4.4 Definirea factorului de putere momentan

Definirea factorului de putere "momentan" are la bază teoria puterilor instantanee elaborată de Akagi [A6] [A7] și dezvoltă în cadrul școlii europene cu scopul de a perfecționa un aparat matematic performant care să permită analiza sistemelor trifazate nesimetrice și nesinusoidale în timp real.

4.4.1 Teoria puterilor instantanee

Teoria puterilor instantanee generalizate are la bază transformata d, q, o a unui sistem trifazat. Astfel pentru un sistem trifazat se poate scrie:

$$[U_p] = [T_p][U_f] \quad (4.56)$$

$$[I_p] = [T_p][I_f]$$

unde: $[U_p]$ - matricea componentelor d, q, o (Park) ale tensiunilor de fază;

$[U_f]$ - matricea tensiunilor de fază;

$[I_p]$ - matricea componentelor d, q, o (Park) ale curenților de fază;

$[I_f]$ - matricea curenților de fază;

$[T_p]$ - matricea de transformare de la mărimi de fază la componente d, q, o.

Pentru tensiuni de exemplu, matricile prezentate mai sus pot fi explicitate după cum urmează:

$$[u_p] = \begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix}; [u_f] = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix}; [T_p] = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Mărimile (vectorii) Park se caracterizează prin următoarele proprietăți :

- sunt invariante la termenii aditivi, dacă același termen se adaugă pe fiecare fază;
- vectorul Park reprezintă componenta trifazată specifică(proprie) unui sistem trifazat. Ca urmare sistemul trifazat "pur" poate fi reprezentat doar prin vectorii Park de tensiune și de curent în planul d - q, într-un formalism similar cu cel fazorial, utilizat în sistemele sinusoidale monofazate;

- faza între vectorii Park de curent și tensiune depinde de natura sarcinii;

În aceste condiții se pot defini puterile instantanee în coordonate d, q, o de forma:

$$p(t) = [u_d(t)u_q(t)u_o(t)] \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_o(t) \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Adoptând un formalism similar cu acela al fazorilor utilizați în regim sinusoidal, se definește puterea complexă instantanee Park:

$$a_p(t) = u_p(t)i_p^*(t) \quad (4.59)$$

unde: $u_p(t) = u_d(t) + ju_q(t)$ - este fazorul corespunzător vectorului Park de tensiune;

$i_p(t) = i_d(t) + ji_q(t)$ - este fazorul corespunzător factorului Park de curent;

Prin integrarea lui $u_p(t)$ și al lui $i_p(t)$ se pot obține tensiunea și curentul Park, astfel:

$$\underline{U}_p = U_{pd} + jU_{pq} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T U_d^2(t) dt \right]^{1/2} + j \left[\frac{1}{T} \int_0^T U_q^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (4.60)$$

$$U_p^2 = U_{pd}^2 + U_{pq}^2 = U^2$$

$$\underline{I}_p = I_{pd} + jI_{pq} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T I_d^2(t) dt \right]^{1/2} + j \left[\frac{1}{T} \int_0^T I_q^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (4.61)$$

$$I_p^2 = I_{pd}^2 + I_{pq}^2 = I^2$$

Puterea complexă instantanee Park se poate descompune în partea reală, numită parte reală Park și partea imaginară, numită partea imaginară Park. Astfel:

$$a_p(t) = P_p(t) + jQ_p(t) \quad (4.62)$$

unde:

$$P_p(t) = R_e[a_p(t)] = u_d(t)i_d(t) + u_q(t)i_q(t)$$

$$q_p(t) = I_m[a_p(t)] = u_q(t)i_d(t) - u_d(t)i_q(t)$$

$$\hat{A}_p = P_p + jQ_p = \frac{1}{T} \int_0^T u_p(t) i_p^*(t) dt .$$

Pentru sisteme nesinusoidale și dezechilibrate, dacă se aplică transformata Fourier asupra componentelor Park (mai sus definite) se obțin puterile Park sub forma:

– Valoarea puterii instantanee Park:

$$a_p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} U_k I_k^* + \sum_{\substack{k,h=-\infty \\ k \neq h}}^{\infty} U_k I_h^* \exp[j(k-h)\omega t]$$

– Valoarea puterii mediate Park:

$$A_p = P_p + jQ_p = \sum_{k=-\infty}^{\infty} U_k I_k^* \quad (4.63)$$

– Valoarea puterii reale Park:

$$P_p = R_e \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} U_k I_k^* \right\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} P_k , \text{ unde } P_k \text{ sunt puterile reale Park asociate cu fiecare armonică și fiecare componentă simetrică;}$$

– Valoarea puterii imaginare Park:

$$Q_p = I_m \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} U_k I_k^* \right\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Q_k , \text{ unde } Q_k \text{ sunt puterile imaginare Park asociate cu fiecare armonică și fiecare componentă simetrică.}$$

Dacă se are în vedere relația dintre puterea imaginară Park și puterea reactivă, în condiții sinusoidale, se poate scrie că:

$$Q_p = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k^+ + \sum_{k=1}^{\infty} Q_k^- + \sum_{k=1}^{\infty} Q_k^0 \quad (4.64)$$

În relația (4.47), Q_k^+ , Q_k^- , Q_k^0 , sunt puterile reactive pe armonica de rang k și secvența +,-,0.

4.4.2 Puterea aparentă și factorul de putere în teoria puterilor instantanee

Puterea aparentă Park se poate calcula cu relația: $S_p = U_p I_p = S$, S fiind puterea aparentă trifazată. Evident că se poate scrie relația: $S = 3UI$.

În aceste condiții se poate defini factorul de putere Park.

$$k_p = \frac{P_p}{S} \quad (4.65)$$

unde: $S \geq A_p$, A_p fiind definit cu relația (4.47).

Similar cu relația lui Budeanu se poate scrie că:

$$S^2 = P_p^2 + Q_p^2 + D_p^2 \quad (4.66)$$

Referitor la valorile factorului de putere Park, în [P15] pentru un subsistem ce alimentează un consumator nelinier și echilibrat (DE), altul nelinier și dezechilibrat (DN) și altul linier și echilibrat (LE) s-a calculat factorul de putere Park, k_p și unul clasic k_p^c dat de relația (4.7) pentru diferite valori ale parametrilor elementelor circuitelor DE și DN. Valorile sunt înscrise în tabelul 4.2.

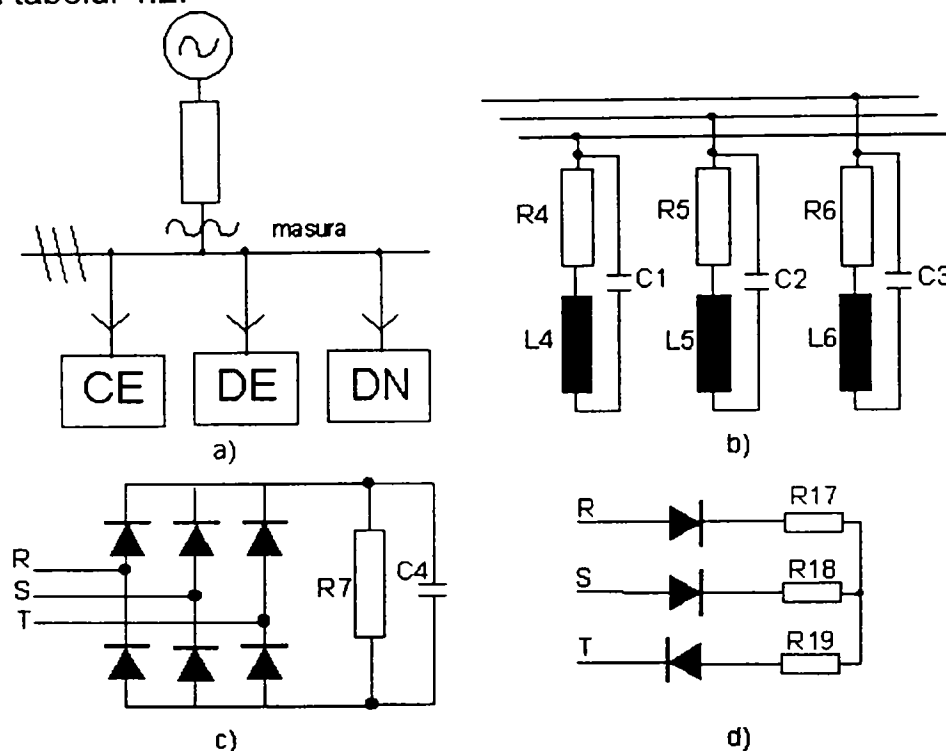


Fig.4.5 Schema principială a montajului folosit în [P15] pentru estimarea factorului de putere: a) schema electrică subsistem; b) schema consumatorului LE; c) schema consumatorului DE; d) schema consumatorului DN

Tabelul 4.2. Valorile factorului de putere k_p , estimate în [P15]

Regim	Consumator linier	Consumator nelinier	K_p	k_p^c
LE, DN	$R_{4,5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=1mH$,	$R_{17}=R_{18}=R_{19}=50\Omega$;	1,0;	1,0
LE, DN	$R_{4,5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=100mH$,	$R_{17}=R_{18}=R_{19}=50\Omega$;	0,955;	0,954
LE, DN	$R_{4,5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=300mH$,	$R_{17}=R_{18}=R_{19}=50\Omega$;	0,728;	0,728
LN, LD	$R_4=50\Omega$; $R_{5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=1mH$,	$R_{17}=R_{18}=R_{19}=50\Omega$;	0,989;	0,980
LN, LD	$R_4=50\Omega$; $R_{5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=100mH$,	$R_{17}=R_{18}=R_{19}=50\Omega$;	0,920;	0,912
LN, LD	$R_4=50\Omega$; $R_{5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=300mH$,	$R_{17}=R_{18}=R_{19}=50\Omega$;	0,651;	0,722
LE, DE	$R_{4,5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=1mH$,	$R_7=100\Omega$; $C_4=1nF$;	1,0;	1,0
LE, DE	$R_{4,5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=100mH$,	$R_7=100\Omega$; $C_4=1nF$;	0,948;	0,948
LE, DE	$R_{4,5,6}=100\Omega$; $C_{1,2,3}=0.1\mu F$; $L_{4,5,6}=300mH$,	$R_7=100\Omega$; $C_4=1nF$;	1,0;	1,0

Din cele prezentate în tabelul 4.2 se poate constata că valorile factorului de putere k_p sunt foarte apropiate de acelea ale factorului de putere calculat cu o relație clasică.

4.5 Concluzii

Scopul acestui capitol a fost acela de a prezenta problemele legate de definirea și estimarea factorului de putere. Deși legat de circulația puterilor reactive în rețelele electrice, factorul de putere a devenit astăzi un *indicator de calitate* a modului în care este consumată energia electrică. Din acest motiv pentru început s-au analizat câteva probleme generale legate de calitatea energiei. Cu această ocazie au fost prezentate cele mai uzuale concepte ale calității energiei scoțându-se în evidență *necesitatea de a introduce un indicator care să permită aprecierea modului în care este consumată energia electrică*. Acest indicator este tocmai factorul de putere și el trebuie să reflecte și participarea consumatorului la noncalitatea energiei electrice. Valoarea lui trebuie să permită furnizorului de energie luarea unor măsuri prin care să oblige consumatorul să se preocupe de a-și îmbunătăți condițiile calitative în care consumă energia electrică, ținând să aducă factorul de putere la valoarea optimă. Apoi sunt prezentate tendințele care se manifestă în ultima vreme privind definirea și estimarea factorului de putere. Rețin atenția în mod deosebit preocupările privind adoptarea unor criterii care să permită definirea factorului de putere ca indicatori globali de calitate a energiei consumate, folosirea teoriei puterilor instantanee la definirea factorului de putere, estimarea factorului de putere în timp real.

Referitor la criteriile adoptate pentru definirea factorului de putere, trebuie menționate în mod deosebit cele prezentate de acad. A. Țugulea lucrări de bază [T6] și [T7], care au jalonat fără îndoială cercetările privind circulația puterilor în rețele funcționând în regimuri nesimetrice și nesinusoidale, definirea puterilor și a factorului de putere. La acestea însă se mai pot adăuga și alte criterii, legate de faptul că factorul de putere trebuie să fie și un indicator de calitate a energiei consumate.

Corespunzător fiecărui criteriu adoptat s-a definit un factor de putere, mai întâi pentru consumatorii monofazați și apoi s-a extins pentru consumatorii trifazați. De remarcat și aici expresia factorului de putere definit, plecând de la majorarea pierderilor de putere longitudinale și transversale în rețele ce alimentează consumatorii dezechilibrați și neliniari, precum și acela care se definește ca în circuitele monofazate înlocuind regimul real cu unul echilibrat.

Interesant de remarcat este faptul că acest factor de putere nu poate deveni mai mare ca unitatea, iar valoarea lui este foarte sensibilă la înrăutățirea regimului. Considerarea pierderilor transversale este foarte utilă actualmente, când gradul de încărcare al transformatoarelor multor consumatori este foarte redus, și ca urmare rolul pierderilor transversale este relativ mare în totalul pierderilor.

Un alt aspect demn de remarcat este introducerea de către IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations a puterii aparente echivalente propuse încă de Buchholz cu aproape 70 de ani în urmă și extinsă de Emanuel și la rețele cu patru conductoare [E4]. Aplicarea acesteia presupune, fără îndoială, ca nivelul perturbațiilor injectate în rețea de consumatorul dezechilibrat și neliniar, să nu depășească nivelele limită admise. Considerarea acestei puteri aparente echivalente, precum și considerarea tensiunii conductorului neutru la calculul tensiunii echivalente asigură o mare elasticitate la calculul factorului de putere. În plus, în situația unor consumatori puternic dezechilibrați la estimarea pierderilor longitudinale și transversale, poate fi considerată și participarea conductorului neutru.

În ultima parte a capitolului s-a prezentat teoria puterilor instantanee dezvoltată de Akagi [A7] și s-a exprimat cu ajutorul acestora *factorul de putere Park*.

Potrivit celor prezentate la concluzii, *în România este în vigoare normativul PE 120/1994 privind "Compensarea puterii reactive în rețelele electrice ale furnizorilor de energie și la consumatorii industriali și similari"* care consideră factorul de putere neutral, egal cu 0,92, momentul măsurării și obligația consumatorului de a participa la solicitarea dispecerului la reglajul tensiunii în rețea [A4]. Normativul menționat face referire numai la consumatorii inductivi, fără a face vreo referire la posibilitatea funcționării cu factor de putere capacitiv.

ANRE nu a reglementat încă aspectele legate de circulația puterii reactive, folosirea și producerea acesteia, unele elemente fiind cuprinse în "Codul rețelelor de distribuție" aflat în fază de elaborare. Din aceste aspecte se impun următoarele:

- gestiunea energiei electrice trebuie să cuprindă și controlul circulației puterilor reactive;
- urmărirea factorului de putere trebuie făcută în timp real, valorile actuale ca medie pe intervalul de facturare nu pot fi utilizate în aprecierea modului de utilizare de către consumator a rețelei furnizorului deoarece nu reflectă regimurile realizate și implicațiile lor asupra dimensionării și funcționării rețelei;
- stabilirea unei metodologii clare pentru penalizarea consumatorului care nu se încadrează în limitele admise ale factorului de putere;
- în cazul consumatorilor puternic dezechilibrați se impune monitorizarea factorului de putere pe fiecare fază;
- necesitatea contorizării energiei electrice corespunzătoare puterii aparente, putere care după opinia unor cercetători [A4] ar defini mai corect eforturile furnizorului și consumatorului pentru utilizarea eficientă a resurselor sistemului energetic.

Contribuțiile originale aduse de autor în cadrul acestui capitol se referă la:

- prezentarea interacțiunii dintre factorul de putere ca indicator al circulației de putere reactivă pe laturile rețelelor electrice și indicatorii de calitate a energiei electrice consumate;
- sintetizarea direcțiilor de cercetare existente în literatură în ceea ce privește definirea și estimarea factorului de putere în nodurile rețelelor ce alimentează consumatori dezechilibrați și neliniari;
- sistematizarea criteriilor folosite pentru definirea factorului de putere în rețele funcționând în regim nesimetric și nesinusoidal; prezentarea într-o formă sistematică a relațiilor de definire a factorului de putere, corespunzător criteriilor: a), b), c), d);
- stabilirea expresiei factorului de putere plecând de la pierderile de putere longitudinale și transversale, care apar în rețeaua de alimentare a consumatorului dezechilibrat și neliniar; este vorba de relațiile (4.42), (4.43), (4.44).

Capitolul 5. Simulări, determinări experimentale, măsurători

Prezentul capitol își propune să scoată în evidență măsura în care, considerațiile teoretice prezentate în capitolele anterioare pot fi validate prin simulare sau măsurători în instalații. Pentru aceasta s-a acționat pe trei căi și anume:

- modelarea prin software și analiza prin simulare a circuitelor electrice,
- determinări experimentale pe model fizic în laborator,
- măsurători în instalații electrice în funcțiune.

Sintetic, modul în care s-a acționat și mijloacele folosite pot fi reprezentate astfel:

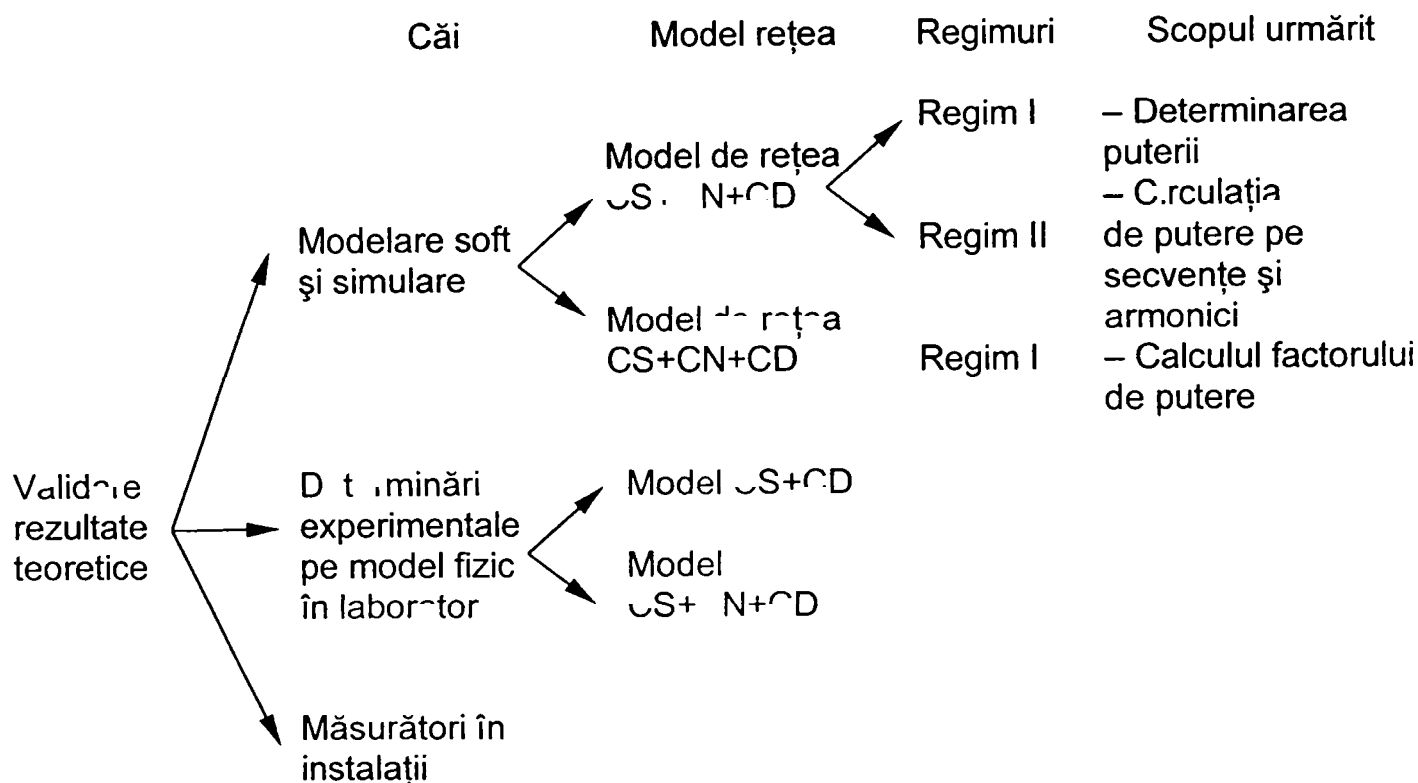


Fig. 5.1 Prezentarea sintetică a problemelor urmărite în capitolul

În fig. 5.1 s-au utilizat următoarele notații:

- CS – consumator simetric
- CN – consumator dezechilibrat
- CD – consumator neliniar.

5.1 Modelare software și analiza prin simulare a circuitelor electrice

Drept mediu soft pentru simulare s-a utilizat programul PSPICE sau mai exact, o variantă PSPICE a firmei Micro Sim Corporation concepută să lucreze pe calculatoare P.C. Programul este cunoscut, având o largă răspândire în mediile universitare și în industrie, astfel încât nu este oportună o descriere de detaliu. Oricum, el cuprinde în linii mari, următoarele componente: o parte de descriere a circuitului simulat, o parte de oscilografie soft, respectiv o secțiune de modelare și un ansamblu de biblioteci aferente. În aceste condiții modelele de rețea utilizate, în ceea ce privește partea descriptivă a lor s-au realizat ținând seama de rigorile PSPICE.

Prelucrarea ulterioară a datelor, calculul puterilor, a factorului de putere etc. s-a efectuat cu ajutorul unor aplicații soft concepute în acest scop.

5.1.1 Model de rețea alimentând consumatori simetrici și nesimetrici

În ceea ce privește modelele de rețea utilizate s-a căutat o apropiere atât cât a fost posibil de situațiile frecvent întâlnite în practică. Și, pentru că prezența regimurilor nesimetrice și nesinusoidale se manifestă mai mult în rețelele de joasă tensiune, s-au realizat modele de rețea la acest nivel de tensiune (deci cu patru conductoare).

În fig. 5.2 se prezintă schema electrică monofilară a modelului de rețea utilizat.

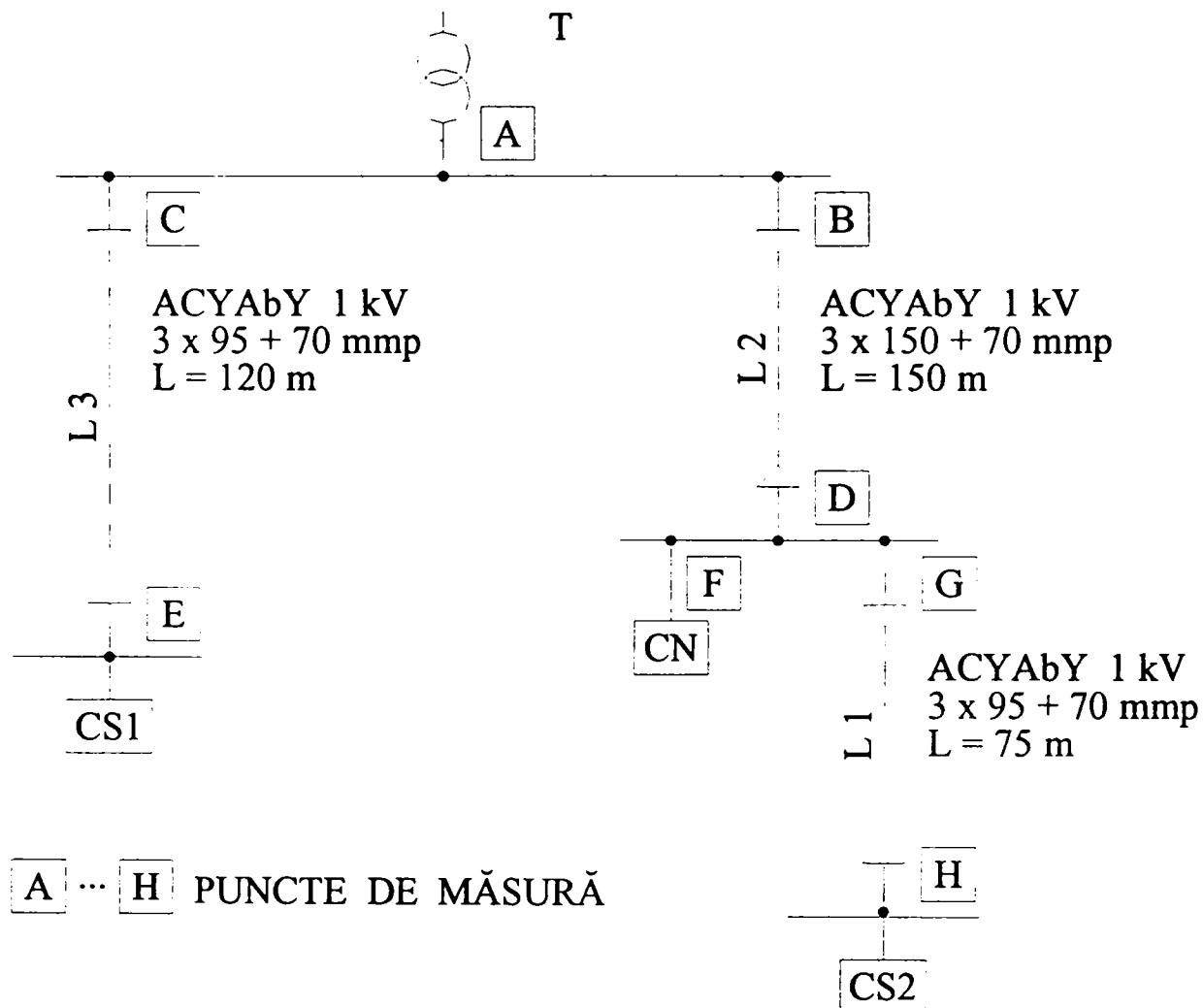


Fig. 5.2 Model de rețea de joasă tensiune alimentând consumatori simetrici (CS1, CS2) și nesimetrici (CN)

Modelul din fig. 5.2 a fost realizat în trifazat utilizându-se notațiile din fig. 5.3. Valorile parametrilor de rețea precum și caracteristicile consumatorilor pot fi urmărite în Anexa 2 (fișierele Det5, CIR). Simularea s-a efectuat în două regimuri diferite Reg. I și Reg. II caracterizate prin valori diferite doar în ceea ce privește caracteristicile consumatorului nesimetric CN. Cu alte cuvinte s-au simulat, pentru același model de rețea două regimuri caracterizate prin grade diferite de nesimetrie.

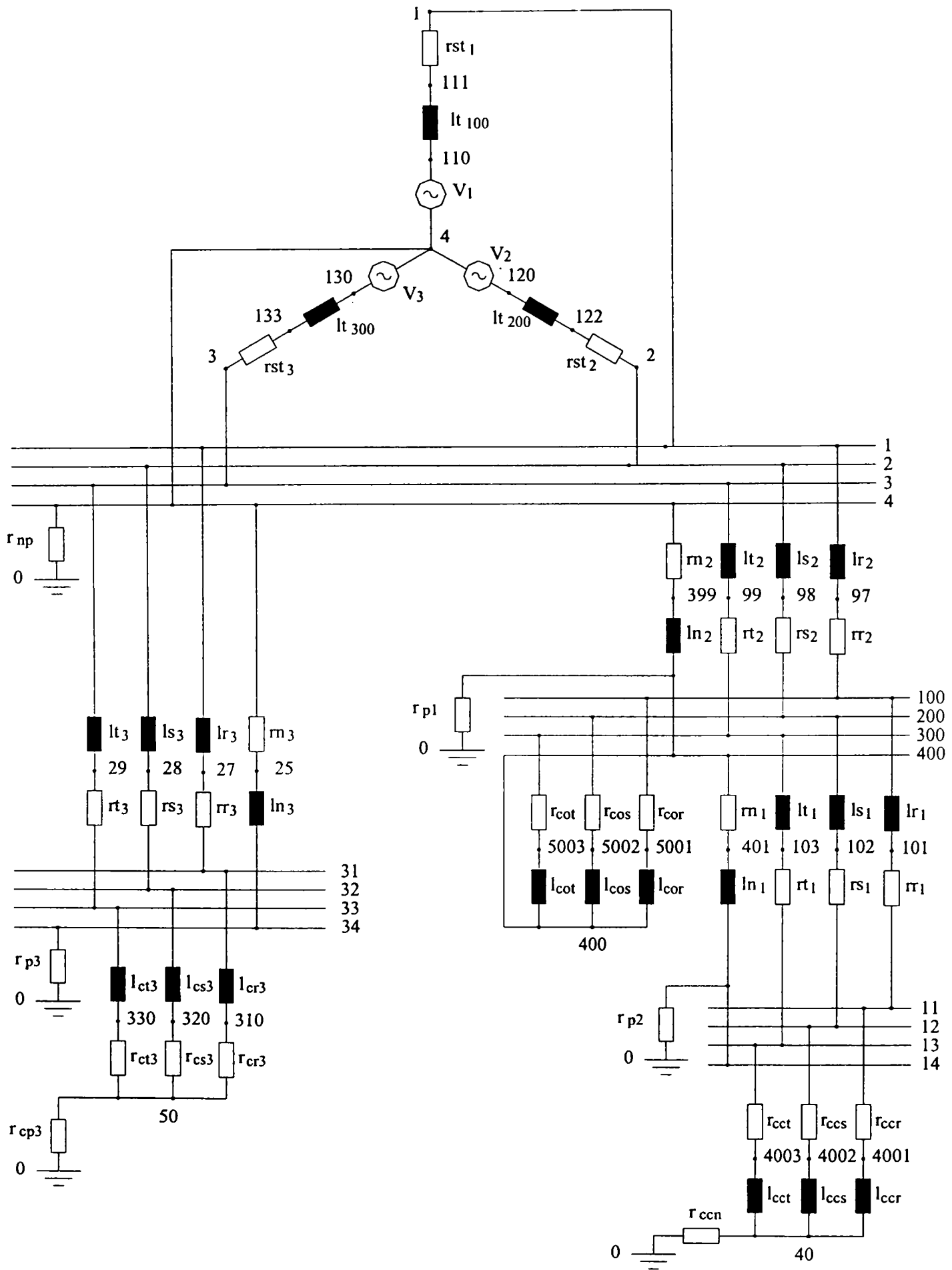


Fig. 5.3 Schema electrică a circuitului analizat, prezentat în fig.5.2.

Tabel 5.1

Caracteristicile consumatorului CN în cele două regimuri analizate

Regimul	$R_{echiv} [\Omega]$			$L_{echiv} [mh]$			Anexa
	R	S	T	R	S	T	
I	2	1,082	3	13	8	1,05	2.1a
II	0,8	2,8	3,5	3,5	10	15	2.1b

Rezultatele calculelor în urma simulării (tensiuni și curenți) oarecum și prelucrarea rezultatelor sunt prezentate în fișierele PSPICE Def5. CIR precum și în fișele de calcul anexate corespunzător fiecărui punct de măsură, în ANEXA1 pentru regimul I și ANEXA 2 pentru regimul II. Centralizarea rezultatelor s-a făcut în tabelul 5.2 pentru regimul I respectiv 5.3 pentru regimul II.

În tabele s-au calculat o serie de mărimi și indicatori cum ar fi:

- puterea aparentă echivalentă. Se calculează cu relația (3.22)
- puterea aparentă echivalentă. Se calculează cu relația (4.19) propusă în această teză,
- factorul de putere corespunzător componentelor de secvență pozitivă k_{P1+}
- factorul de nesimetrie k_{PN} propus în lucrare, conform relației (4.28)
- factorul de putere $k_P = P^+/S$ propus în lucrare, conform relației (4.30)
- factorul de putere k_p calculat conform relației (4.14),
- factorul de putere k_F calculat conform relației (4.55),
- factorul de putere mediu calculat ca medie a factorilor de putere pe cele trei faze.

Fișierele de calcul din Anexa 1 au permis foarte comod determinarea circulației de putere corespunzător componentelor de secvență negativă respectiv zero (fig.5.4).

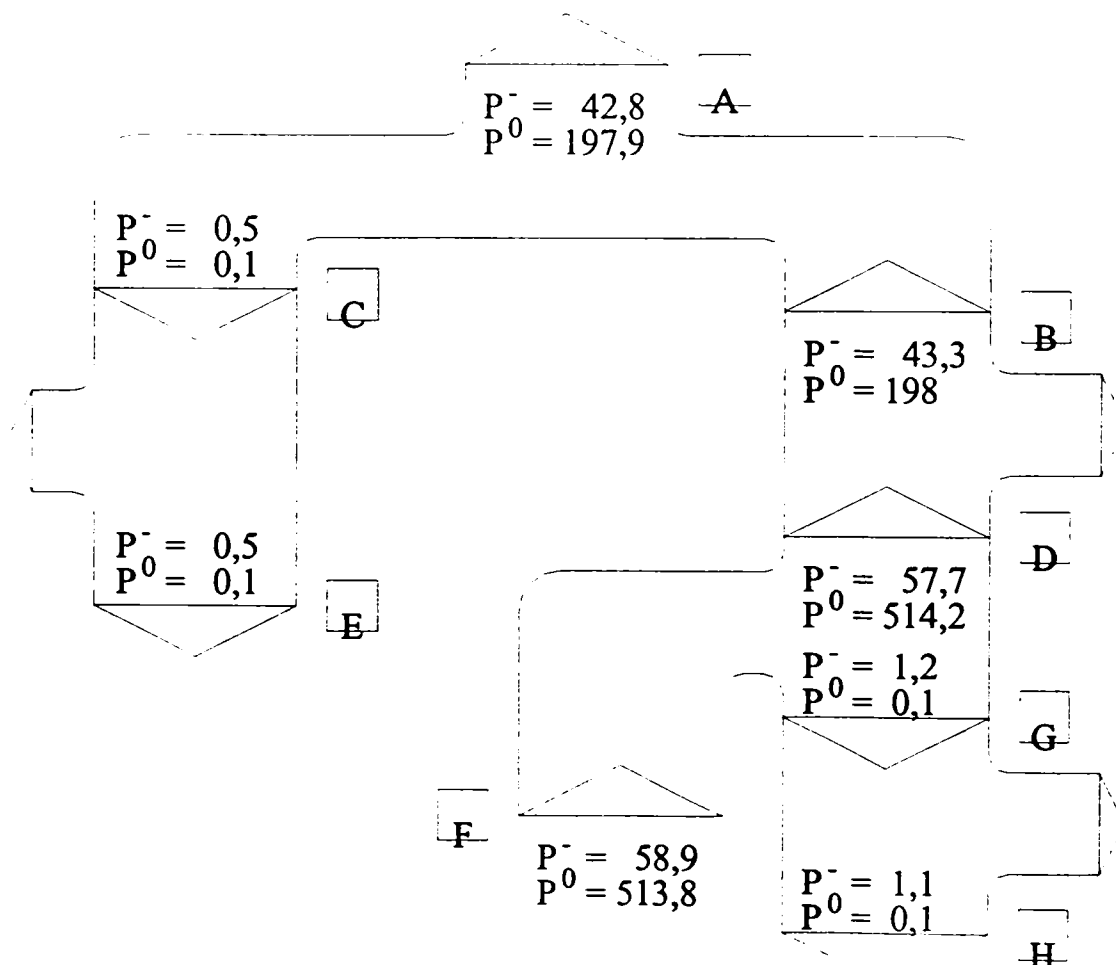


Fig. 5.4 Circulația de putere pentru componenta de secvență negativă și zero

Tabelul 5.2. Principali indicatori ai regimului nesimetric calculați pe modelul de rețea din fig. 5.2. (Anexa 3) în regimul R II

Fișier def5.out/04/04/2001

Tip cons.	Punct măsură	P	P*	S*	S _e	S' _e	P _r	kp1+	k _{pN}	k _p	k _p	k _F	k _m
	Relația				(3.22)	(4.19)			(4.28)	(4.3)	(4.14)	(4.55)	
Bara PT	A	80401	80641.5	107736.7	118857.1	118987.7	9234.5	0.748	0.905	0.677	0.746	0.519	0.732
	B	57905.3	58146.6	75756.9	90889.2	91059.4	9522.4	0.767	0.832	0.638	0.764	0.528	0.734
	C	22529	22528.6	32087.7	32091	32088.1	16.8	0.702	0.999	0.702	0.702	0.491	0.702
	D	56844.1	57416	74921	89915.8	90054.7	9267.5	0.766	0.832	0.637	0.759	0.527	0.729
CS1	E	22331.1	22330.7	31890.7	31894.2	31891.1	25.5	0.7	0.999	0.7	0.7	0.49	0.7
CN	F	28763.3	29336	41472.1	64741.5	64922.4	9693.6	0.707	0.638	0.452	0.693	0.466	0.609
	G	28062.2	28061.1	33787.4	33802.2	33788.2	20.6	0.83	0.999	0.83	0.83	0.581	0.83
CS2	H	27948	27946.9	33668.2	33682.4	33669	23.9	0.83	0.999	0.83	0.83	0.581	0.83

P* Puterea activa pe secventa pozitiva

S* Puterea aparenta pe secventa pozitiva

CS Consumator simetric

CN Consumator nesimetric

Tabelul 5.3. Principalii indicatori ai regimului nesimetric calculați pe modelul de rețea din fig. 5.2. (Anexa 3) în regimul R II
 Fișier def5.out/04/04/2001

Tip cons.	Punct măsură	P	P*	S*	S _o	S _i	P _i	kp1+	K _{pN}	K _p	K _p	K _F	K _m
Relația					(3.22)	(4.19)			(4.28)	(4.3)	(4.14)	(4.55)	
Bara PT	A	84920.1	85498	121306.2	138005.4	138138	22486.9	0.705	0.878	0.619	0.7	0.485	0.71
	B	62651.8	63233.4	89576.9	111225	111432	23197.5	0.706	0.804	0.567	0.699	0.479	0.717
	C												
	D	61105.8	62246.1	88444	109876.9	110022.6	22552	0.704	0.804	0.565	0.691	0.477	0.714
CS1	E												
CN	F												
	G												
CS2	H	27557.3	27549.8	33191	33219.8	33195.2	10.4	0.83	0.999	0.83	0.83	0.581	0.83

P* Puterea activa pe secventa pozitiva

S* Puterea aparenta pe secventa pozitiva

CS Consumator simetric

CN Consumator nesimetric

5.1.2 Model de rețea alimentând consumatori echilibrați, dezechilibrați și neliniari

Modelul de rețea utilizat în acest caz păstrează structura și parametrii de rețea prezentă în Fig. 5.2, deosebirile fiind evidențiate în Fig. 5.5

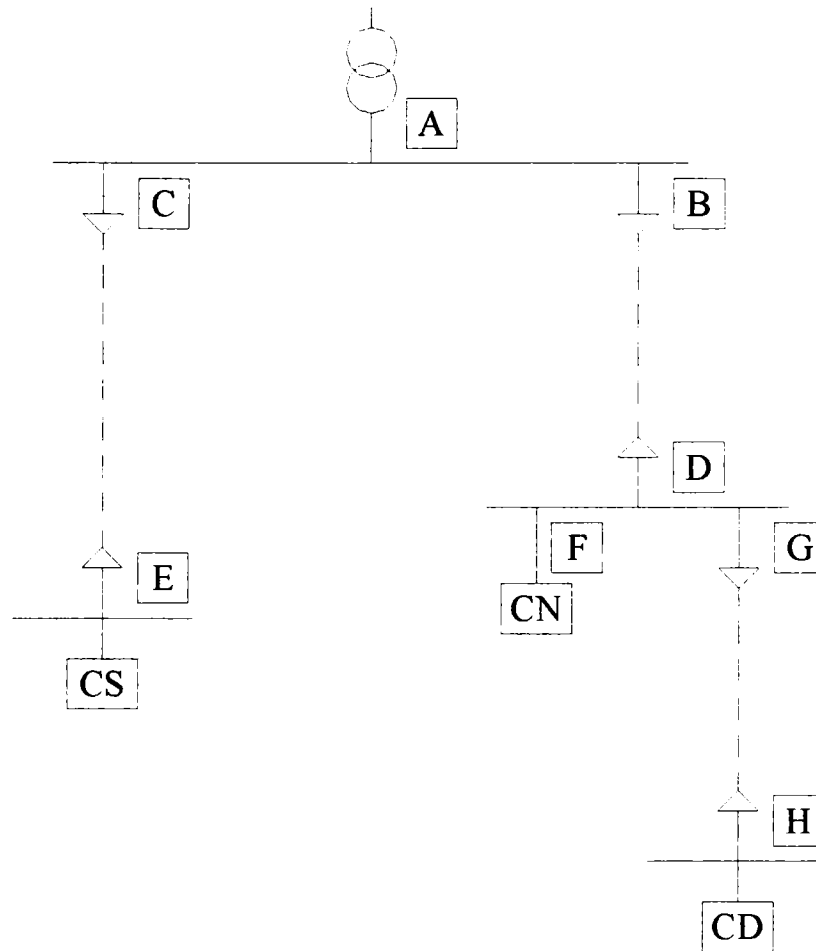


Fig.5.5 Model de rețea de joasă tensiune alimentând consumatori simetrici(CS), consumatori nesimetrici (CN) și consumatori neliniari (CD)

În Fig. 5.5 consumatorul neliniar a fost modelat aidoma unui consumator tip tracțiune electrică urbană conform schemei electrice monofilare din Fig. 5.6

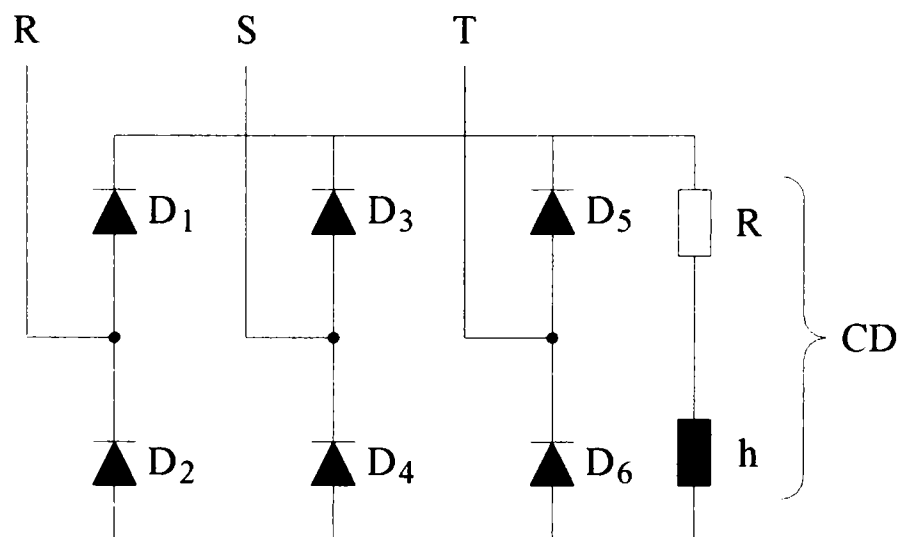


Fig. 5.6 Modelul de consumator neliniar utilizat

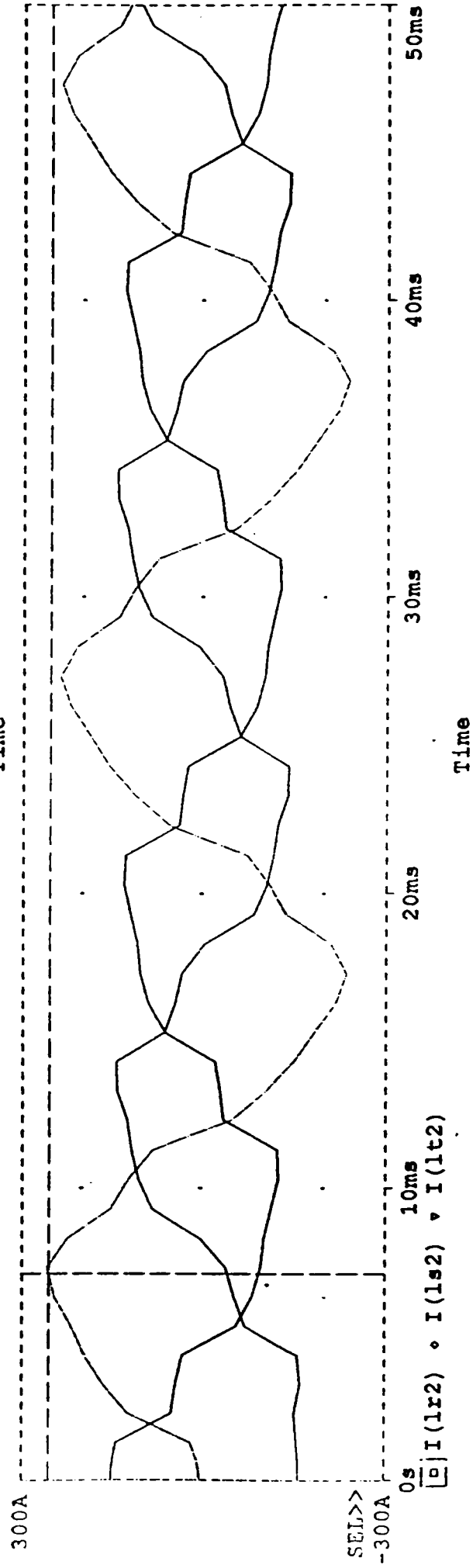
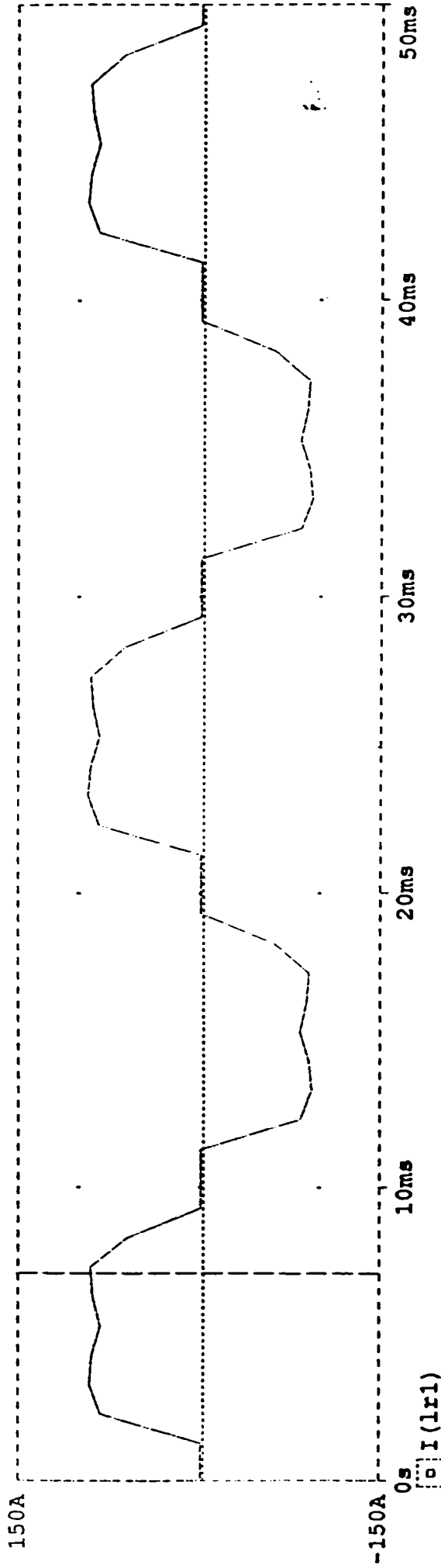
Notă: În Fig. 5.6 pentru diodele D1 – D6 s-a utilizat un model de diodă aflat în biblioteca PSPICE.

Date/Time run: 04/06/101 11:33:04

reg.nesimetric nesinusoidal

Temperature: 27.0

(C) C:\MSIMEV53\DEF6.DAT



C1:(7.0732m,255.440) C2:(-10.264M,-2.2222) DIFF(C):(10.264M,257.662)

Date: April 09, 2001

Page 1

Time: 09:04:51

Valorile parametrilor utilizați, rezultatele analizei Fourier pentru tensiunile și curenții din nodurile rețelei precum și fișele de calcul al puterilor în nodurile rețelei pe fundamentală și armonicile 3, 5, 7 (cele mai reprezentative) se regăsesc în ANEXA 3. Cu acestea se poate reconstitui ușor circulația de putere pentru secvența negativă și zero referentă fundamentalei, respectiv pentru armonicile 3, 5, 7 după cum urmează:

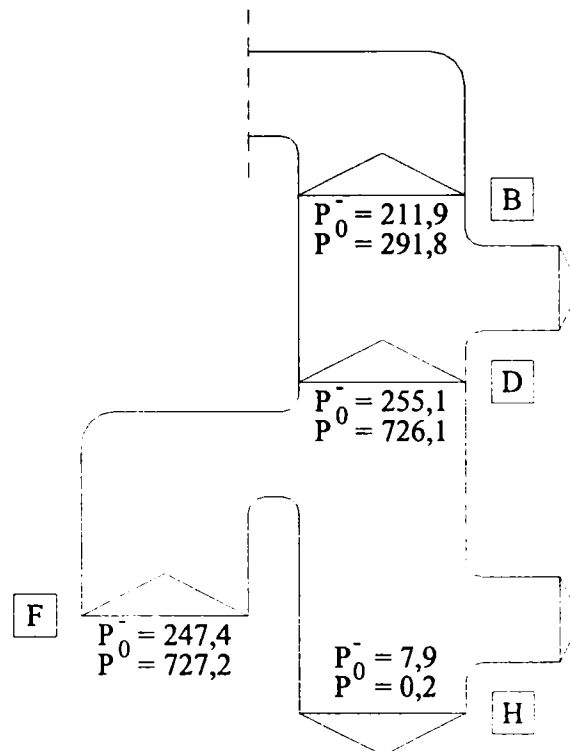


Fig. 5.7 Circulația de putere pentru secvențele negativă și zero, pentru fundamentală

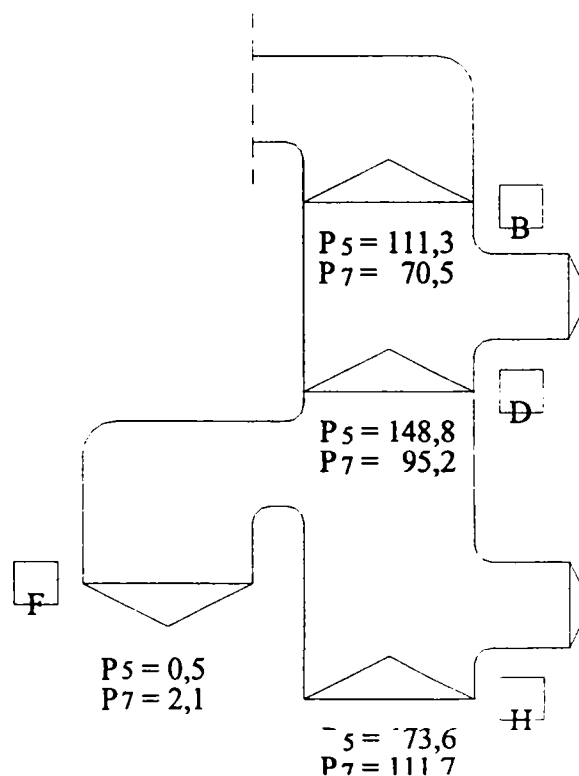


Fig. 5.8 Circulația de putere pentru armonicile 5,7

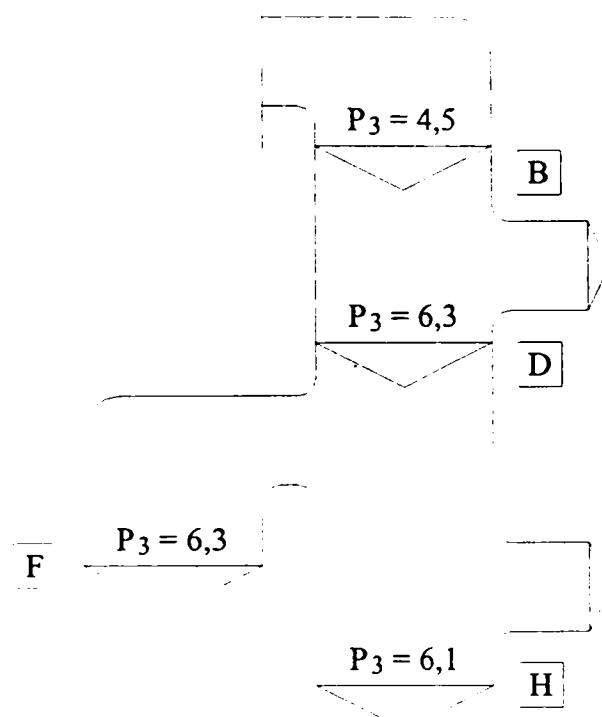


Fig. 5.9 Circulația de putere pentru armonica 3

Tabelul 5.4 Valorile factorului de putere calculat în regim nesimetric și nesinusoidal pe modelul din Fig. 5.5

	Pct. Măsură	k_{P1+}	k_{pN}	k_{pD}	k_p	k_p	$k_{\Delta P}$	$k_{\delta P}$	k_P	k_{ph}	k_F
Relația			(4.28)	(4.29)	(4.30)	(4.14)	(4.42)	(4.43)	(4.44)	(4.47)	(4.55)
Bara PT	B	0,97	0,864	0,994	0,779	0,901	0,86	0,999	0,859	0,868	0,908
C N.	D	0,908	0,864	0,995	0,78	0,897	0,86	0,998	0,859	0,868	0,908
C D.	F	0,605	0,653	0,999	0,395	0,587	0,51	0,999	0,51	0,604	0,709
	H	0,999	0,999	0,980	0,979	0,995	0,981	0,999	0,98	0,892	0,955

În tabelul 5.4 s-au calculat, pe baza rezultatelor explicitate în ANEXA 3. diverse valori ale factorului de putere în funcție de relația de definiție, după cum urmează:

- factorul de putere propus în lucrare, explicitat de relația (4.30), ca produs a trei termeni
- factorul de putere definit de relația (4.14)
- factorul de putere definit de relațiile (4.43, 4.42, 4.44)
- factorul de putere ajustat armonic, definit de relația (4.47)
- factorul de putere definit de relația (4.55)

Calcululele s-au efectuat în punctele de măsură B, D, F, H considerate ca fiind cele mai reprezentative pentru scopul urmărit.

5.2. Măsurători efectuate pe model fizic în laborator

5.2.1. Experiment nr.1. – post de transformare ce alimentează un consumator tip unitate de învățământ superior (facultate). Majoritatea consumatorilor – tehnică de calcul.



Fig.5.10. Schemă electrică experiment nr.1

Caracteristicile regimului urmărit : Ziua : 2.04.2001.ora 18.38
 $f=50.14\text{Hz}$;
 $U_{\text{ef}}(R)=234.7\text{V}$; $U_{\text{ef}}(S)=234.5\text{V}$; $U_{\text{ef}}(T)=235.5\text{V}$;
 $k_{\text{ns}2}=0.016$; $k_{\text{ns}0}=0.014$; $k_{\text{ns}}=0.03$; $r_{\text{ns}}=0.03$; $r_{\text{nsd}}=4.3$;
 $\delta U_R=4.42\%$; $\delta U_S=3.08\%$; $\delta U_T=3.5\%$

Tabelul 5.5 Nivelul armonicilor impare

	U_R	U_S	U_T	U^+	U^-	U^0
[V]	234.4	234.3	235.3	234.6	3.761	3.373
Arm. [%]				[V]		
3	0.8	0.92	0.91	0.31	0.17	3.135
5	4.28	2.85	3.28	1.007	8.094	1.308
7	0.54	0.49	0.59	1.245	.21	.13
9	0.16	0.17	0.13	0.045	0.025	0.36
11	0.3	0.2	0.22	0.11	0.54	0.17
13	0.23	0.26	0.27	0.57	0.11	0.14
17	0.16	0.04	0.08	0.052	0.21	0.13

$I_{\text{ef}}(R)=0.37\text{A}$; $I_{\text{ef}}(S)=0.34\text{A}$; $I_{\text{ef}}(T)=0.38\text{A}$;
 $k_{\text{ns}2}=0.47$; $k_{\text{ns}0}=0.38$; $k_{\text{ns}}=0.85$; $r_{\text{ns}}=0.895$; $r_{\text{nsd}}=0.11$;
 $\delta I_R=34.03\%$; $\delta I_S=27.35\%$; $\delta I_T=33.92\%$

Tabelul 5.6 Nivelul armonicilor impare

	I_R	I_S	I_T	I^+	I^-	I^0
[A]	0.33	0.3	0.33	0.28	0.13	0.1
Arm [%]				[A]		
3	27.35	20.93	27.25	0.057	0.056	0.022
5	17.27	14.75	17.16	0.02	0.048	0.011
7	8.86	8.19	8.85	0.023	0.012	0.011
9	2.53	2.79	2.55	5.5m	5.5m	3.3m
11	2.07	1.89	2.14	1.8m	6.1m	0.49m
13	2.94	2.58	3.01	6.9m	4.5m	4.3m
17	0.48	0.57	0.51	0.37m	1.6m	0.28m

Puteri absorbite de consumator pe faze

$P(R)=19.82W$
 $Q(R)=76.3VAr$
 $D(R)=38.97VAd$
 $S(R)=87.77VA$
 $K_P(R)=0.226$

$P(S)=69.56W$
 $Q(S)=10.9VAr$
 $D(S)=35.7VAd$
 $S(S)=78.95VA$
 $K_P(S)=0.881$

$P(T)=75.87W$
 $Q(T)=21.06VAr$
 $D(T)=40.59VAd$
 $S(T)=88.58VA$
 $K_P(T)=0.856$

puteri totale

$P=165.3W$
 $Q=108.3VAr$
 $D=66.41VAd$
 $S=208.4VA$
 $K_P=0.793$

Tabelul 5.7 Puteri pe armonici

Arm.	$P_R [W]$	$P_S [W]$	$P_T [W]$	$Q_R [VAr]$	$Q_S [VAr]$	$Q_T [VAr]$
1	19.62	69.21	75.71	75.76	11.17	21.4
3	-0.044	-0.018	-0.053	0.17	-0.13	-0.19
5	-0.4	-0.28	-0.43	0.42	-0.11	-0.11
7	3.9m	-0.024	-0.03	-0.037	-0.016	-0.027
11	-3m	-2.3m	-3.5m	3.9m	0.13m	-1.2m
13	3.9m	-0.31m	-0.53m	-3.6m	-4.8m	-6.4m

Determinările au vizat :

- Circulația puterilor active și reactive pe armonici ;
- Circulația puterilor pe faze ;
- Nivelul regimului nesinusoidal și a celui nesimetric ;
- Valoarea factorului de putere pe faze și per total.

- a) În legătura cu natura regimului se poate aprecia că este relativ simetric, dar evident are un pronunțat caracter nesinusoidal periodic în curent. Așa cum era de așteptat sistemul tensiunilor de alimentare este simetric și practic sinusoidal. Coeficientul de nesimetrie negativă nu depășește 1.6% iar cel de nesimetrie homopolară 1.4%. Coeficientul de distorsiune al tensiunilor de fază are valoare maximă 4.42%. În schimb curenții sunt relativ nesimetri. Prezența unor componente homopolare, face ca, curentul pe neutru să fie aproximativ egal cu cel de pe faza , adică $I_N=0.3A$. În plus distorsiunile curbei curenților sunt cuprinse între 27.35% și 33.92%, mai pronunțate pe faza T. Nivelul armonicilor de rang 3 pe faza R este de 27.35% și 27.25% pentru faza T ceace denotă prezența semnificativă în rândul receptorilor a unor elemente de redresare monofazate.
- b) Puterile absorbite pe armonicile semnificative (inpare) sunt negative, adică sunt debitate de către consumator în rețea. Totuși ponderea lor este mică față de puterea absorbită pe fundamentală. Astfel 2.26% pentru faza R, 0.469% pentru faza S, 0.68% pentru faza T. Osituație similară apare și pentru puterile reactive.
- c) Sarcinile active și reactive cu care se încarcă cele trei faze diferă sensibil dela faza R la celelalte faze S și T. Faza R este încărcată la circa 30% cu putere activă față de S și T și de 400% cu sarcină reactivă.
- d) Determinarea factorului de putere.
O primă estimare a valorii factorului de putere poate fi efectuată considerând pentru puterea aparentă relațiile :

$$S = 3 \cdot U_e \cdot I_e = 3 \cdot \sqrt{\frac{234.4^2 + 234.3^2 + 235.3^2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{0.33^2 + 0.30^2 + 0.33^2 + 0.30^2}{3}} =$$

$$= 3 \cdot 234.699 \cdot 0.403 = 283.893 \text{ VA}$$

$$S = \sum_1^3 U_f \cdot I_f = 234.4 \cdot 0.33 + 234.3 \cdot 0.3 + 235.3 \cdot 0.33 = 225.29 \text{ VA}$$

$$S = 3 \cdot U_1^+ \cdot I_1^+ = 3 \cdot 234.6 \cdot 0.28 = 197.064 \text{ VA}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{165.3^2 + 108.3^2 + 208.4^2} = 208.4 \text{ VA}$$

iar pentru puterile active

$$P = \sum P_f = 165.3 \text{ W}$$

$$P = \sum P_1 = 164.54 \text{ W}$$

$$P = 3 \cdot P_1^+ = 143.828 \text{ W}$$

Cu acestea s-au calculat 12 valori pentru factorul de putere k_p , valori înscrise în tabelul 5.

Tabelul 5.8 Valorile factorului de putere k_p .

S[VA] \ P[W]	165.3	164.54	143.828
283.89	0.582	0.579	0.5066
225.29	0.7337	0.7303	0.638
197.064	0.8388	0.835	0.729
208.4	0.793	0.789	0.69

Din analiza valorilor înscrise în tabelul 5. se constată că valorile factorului de putere variază într-o plajă relativ mare, de la 0.5066 la 0.835, adică variația este de cca 50% dacă ne raportăm la valoarea medie a factorului de putere.

În continuare factorul de putere a fost calculat pe baza criteriilor enumerate în capitolul 4. Astfel :

$$k_p^{a)} = \frac{P}{3 \cdot S_1^+} = \frac{165.3}{197.064} = 0.8388$$

$$k_p^{b)} = k_{\Delta P} \cdot k_{\delta P} = \frac{0.729}{[1 + 0.355 + 0.286 + 0.136 + 0.0277]^{1/2}} \cdot 0.999 = 0.5424$$

$$k_p^{c)} = \cos \varphi_1^+ \cdot \frac{1 + P_d / P_1^+}{\sqrt{1 + \delta_{U_h}^2} \cdot \sqrt{1 + \delta_{I_h}^2}} = \frac{0.729 \cdot (1 - 0.0077)}{\sqrt{1 + 0.03213} \cdot \sqrt{1 + 3.2}} = 0.3475$$

unde $C_k = k$

$$k_p^{d)} = \frac{P}{S_e} = 0.582$$

$$k_p^{e)} = k_1 \cdot 0.729 + k_2 \cdot 0.96 + k_3 \cdot 0.682$$

pentru $k_1 = k_2 = k_3 = 0.333$ $k_p^e = 0.7795$

$k_1 = 0.4$; $k_2 = k_3 = 0.3$ $k_p^e = 0.7842$

$k_1 = 0.8$; $k_2 = k_3 = 0.1$ $k_p^e = 0.7474$

Din analiza valorilor obținute pentru factorul de putere, se constată că acestea variază într-o plajă relativ mare, de la 0.3479 la 0.8388. Prin urmare valoarea factorului de putere nu constituie o indicație privind regimul consumatorului atât timp cât nu se precizează condițiile de definiție ale acestuia, respectiv criteriul care s-a avut în vedere. O

valoarea mai mare sau mai mică poate crea o falsă impresie asupra modului în care este consumată energia sau poate obliga consumatorul să ia niște măsuri nejustificate privind gospodărirea energiei electrice consumate.

O analiză atentă a factorului de putere pe faze, evidențiază un lucru deosebit pe faza R, valoarea factorului de putere calculat cu relația clasică, folosită actualmente (P_R/S_R) este foarte redusă cca 0.226, ceace semnifică existența unei circulații suplimentare de putere reactivă pe această fază pentru echilibrarea regimului consumatorului echilibrat.

5.2.2. Experiment nr.2

În laborator s-a realizat montajul din fig.5.11

Fig.5.

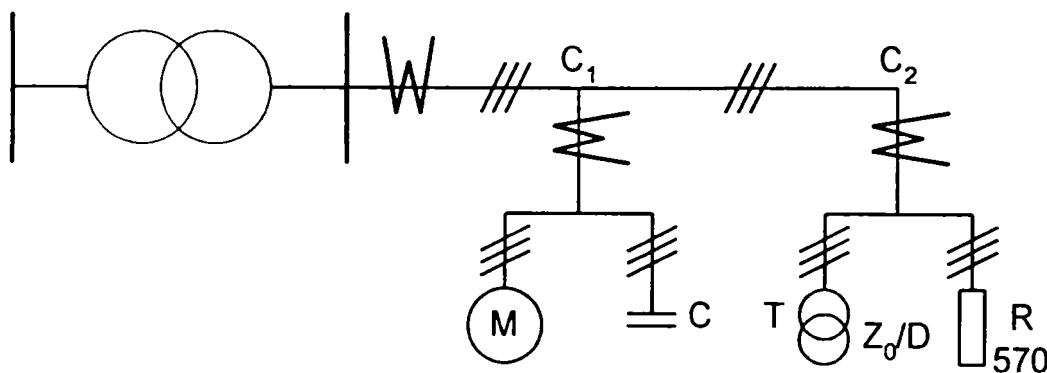


Fig.5.11. Schemă electrică experiment 2

C_1 prezintă următoarele caracteristici :

$I_R=0.98A$	$U_R=199.6V$	$P_R=60.66W$	$Q_{\bar{R}}=186.5VAr$	$D_{\bar{R}}=14.4VAD$
$I_S=1.15A$	$U_S=206.3V$	$P_S=71.33W$	$Q_{\bar{S}}=226.2VAr$	$D_{\bar{S}}=16.02VAD$
$I_T=1.06A$	$U_T=202.3V$	$P_T=38.0W$	$Q_{\bar{T}}=210.4VAr$	$D_{\bar{T}}=163.5VAD$
$S_R=196.6VA$	$P_{3f}=170.0W$	$k_{PR}=0.309$	$\delta_{UR}=3.15\%$	$\delta_{IR}=4.51\%$
$S_S=237.8VA$	$Q_{3f}=623.1VAr$	$k_{PS}=0.30$	$\delta_{US}=3.93\%$	$\delta_{IS}=4.02\%$
$S_T=214.4VA$	$D_{3f}=27.05VAD$	$k_{PT}=0.177$	$\delta_{UT}=3.51\%$	$\delta_{IT}=4.50\%$
	$S_{3f}=646.4VA$	$k_{3f}=0.263$		

C_2 prezintă următoarele caracteristici :

$I_R=1.816A$	$U_R=189.8V$	$P_R=223.9W$	$Q_R=261VAr$	$D_{\bar{R}}=23.23VAD$
$I_S=1.375A$	$U_S=198.0V$	$P_S=163.9W$	$Q_{\bar{S}}=211.6VAr$	$D_{\bar{S}}=50.04VAD$
$I_T=1.558A$	$U_T=189.5V$	$P_T=238.6W$	$Q_{\bar{T}}=169.5VAr$	$D_{\bar{T}}=37.82VAD$
$S_R=344.7VA$	$P_{3f}=626.4W$	$k_{PR}=0.650$	$\delta_{UR}=2.74\%$	$\delta_{IR}=8.25\%$
$S_S=272.2VA$	$Q_{3f}=642.0VAr$	$k_{PS}=0.602$	$\delta_{US}=4.72\%$	$\delta_{IS}=16.54\%$
$S_T=295.1VA$	$D_{3f}=66.89VAD$	$k_{PT}=0.809$	$\delta_{UT}=3.55\%$	$\delta_{IT}=12.70\%$
	$S_{3f}=899.5VA$	$k_{3f}=0.696$		

Linia și consumatorii C_1 și C_2 alcătuiesc un consumator echivalent având caracteristicile :

$I_R=2.737A$	$U_R=220.2V$	$P_R=345.2W$	$Q_{\bar{R}}=493.7VAr$	$D_{\bar{R}}=16.48VAD$
$I_S=2.455A$	$U_S=220.4V$	$P_S=265.6W$	$Q_{\bar{S}}=469.2VAr$	$D_{\bar{S}}=44.32VAD$
$I_T=2.404A$	$U_T=218.5V$	$P_T=323.9W$	$Q_{\bar{T}}=412.4VAr$	$D_{\bar{T}}=29.51VAD$
$S_R=602.6VA$	$P_{3f}=934.7W$	$k_{PR}=0.573$	$\delta_{UR}=3.84\%$	$\delta_{IR}=5.26\%$
$S_S=541.0VA$	$Q_{3f}=1375VAr$	$k_{PS}=0.491$	$\delta_{US}=3.89\%$	$\delta_{IS}=8.50\%$
$S_T=525.3VA$	$D_{3f}=55.74VAD$	$k_{PT}=0.617$	$\delta_{UT}=3.94\%$	$\delta_{IT}=7.41\%$

$$S_{3f}=1664\text{VA} \quad k_{3f}=0.562$$

Variația tensiunilor și curenților în secțiunile de măsură sunt prezentate în cele ce urmează, în fig.5.

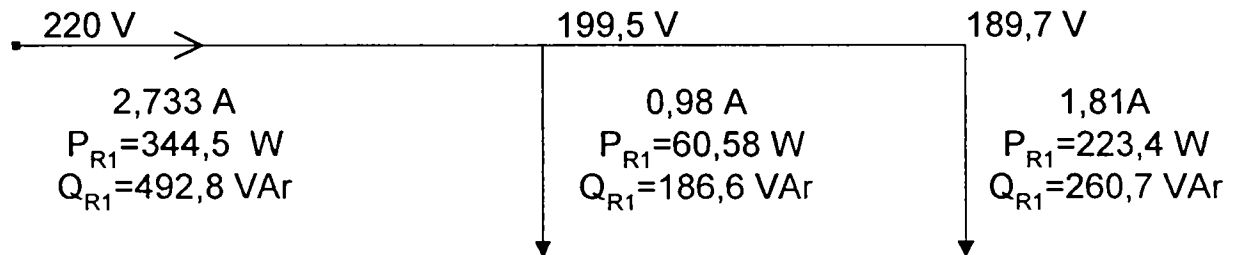
Sistemul folosit pentru achiziție și prelucrare este unul de tip TRINET fabricat de firma TELECOM București.

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a putut trasa circulația curenților armonici pe faze, iar în cadrul armoniceilor pe secvențe.

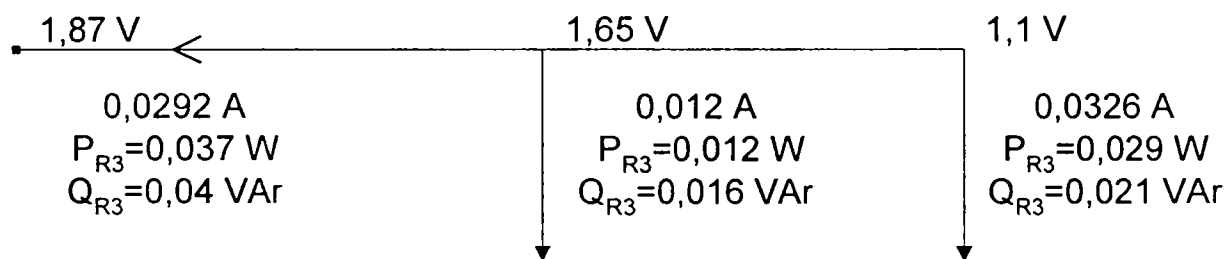
Astfel :

a) Circulația curenților armonici pe faza R

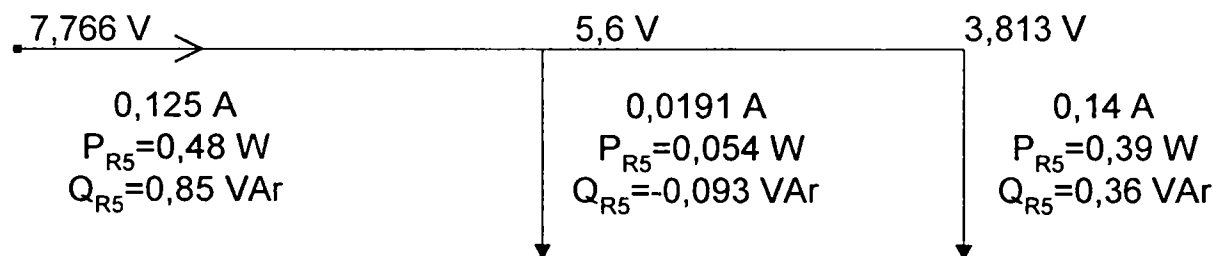
K=1



K=3



K=5



K=7

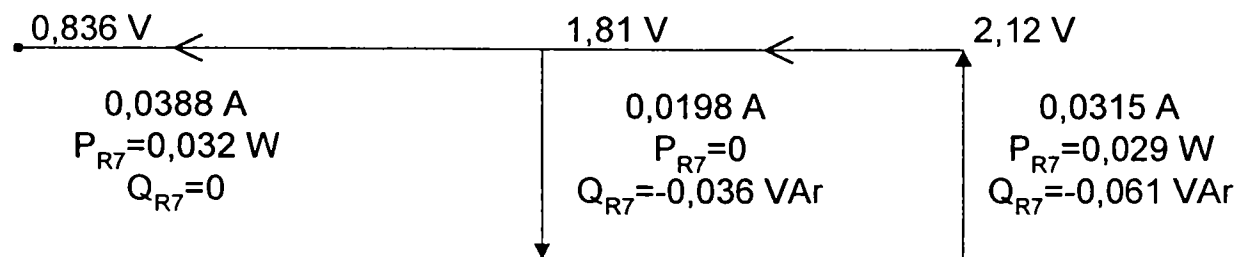
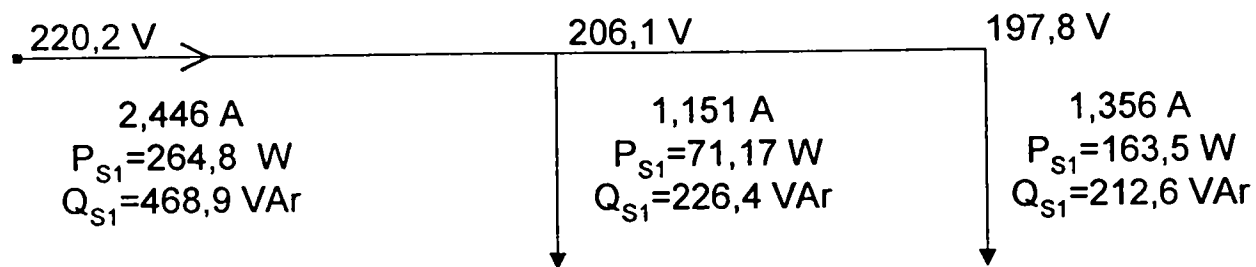
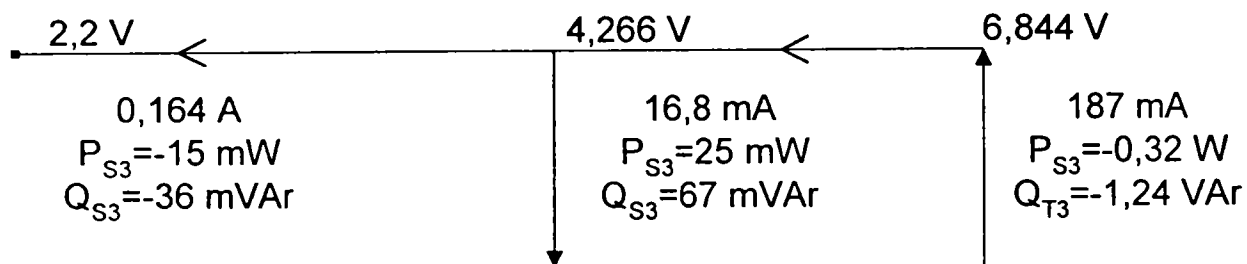


Fig.5.12. a. Circulația curenților armonici , faza R

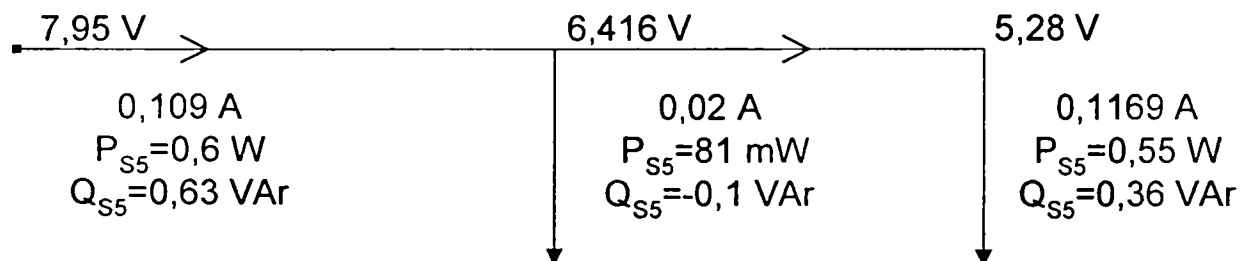
b) Circulația curenților armonici pe faza S
K=1



K=3



K=5



K=7

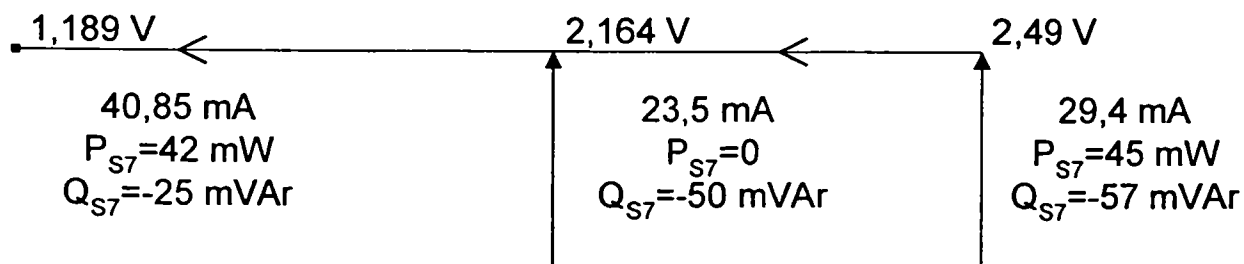
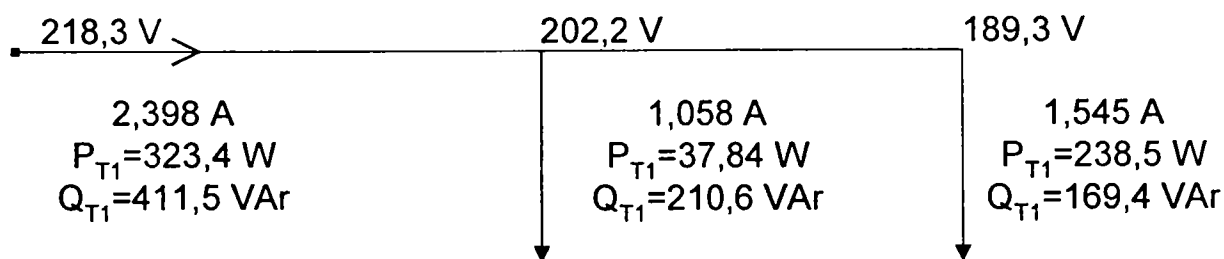
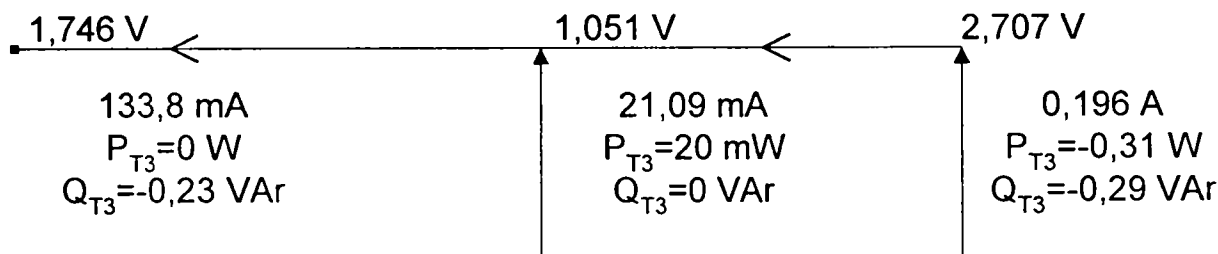


Fig.5.12. b. Circulația curenților armonici , faza S

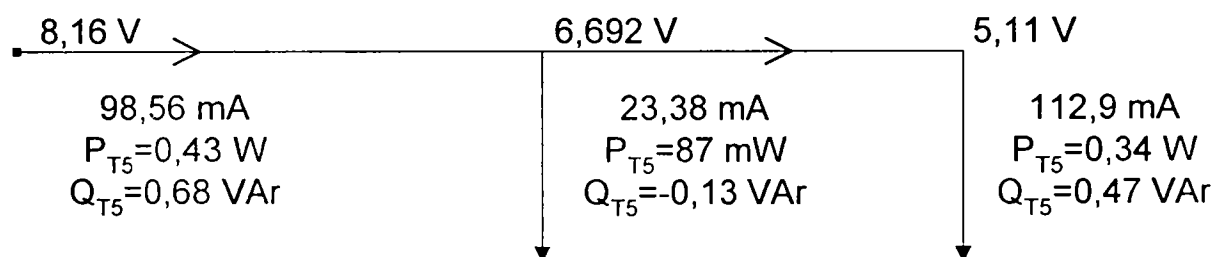
c) Circulația curenților armonici pe faza T
K=1



K=3



K=5



K=7

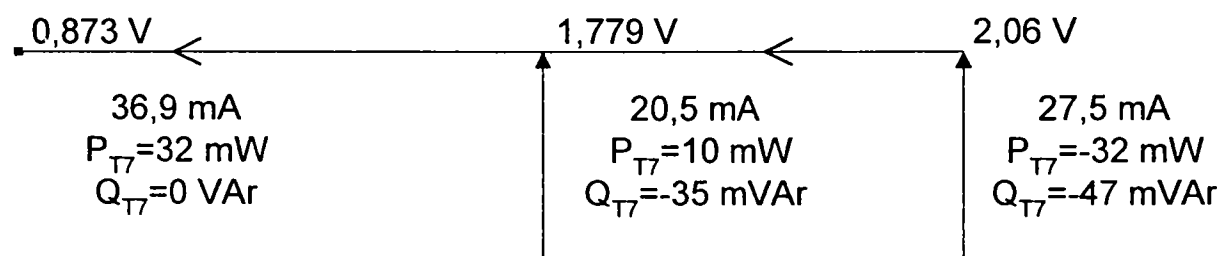


Fig.5.12. c. Circulația curenților armonici , faza T

Din analiza celor prezentate grafic rezultă că circulația curenților armonici și o putere corespunzătoare, diferă de la o fază la alta, iar pentru unele armonici și faze de la putere activă la cea reactivă.

Astfel :

- Pe fundamentală sensul este clar : de la sursă spre consumatori, indiferent de caracterul acestora, liniari sau neliniari, echilibrați sau dezechilibrați ;
- Pe armonica a 3-a pe fazele S și T circulația se efectuează de la consumatorul dezechilibrat și neliniar, adică C₂ spre consumatorul C₁ și sursă (notată pe figura TRINET cu C₃). Consumatorul C₁ absoarbă putere activă și reactivă de la C₂ ;

- Pe armonica a 3-a pe faza R, circulația similară cu aceea pe fundamentală de la sursă spre consumatori ;
- Pe armonica a 5-a pe fazele R,S,T circulația curenților și a puterilor se efectuează de la sursă spre consumatori C₁ și C₂. Face excepție consumatorul C₁ care pe toate cele trei faze debitează reactiv și nu absoarbe ;
- Pe armonica a 7-a consumatorii C₁ și C₂ debitează în rețea putere reactivă și absorb putere activă C₂ iar C₁ practic puterea activă zero.

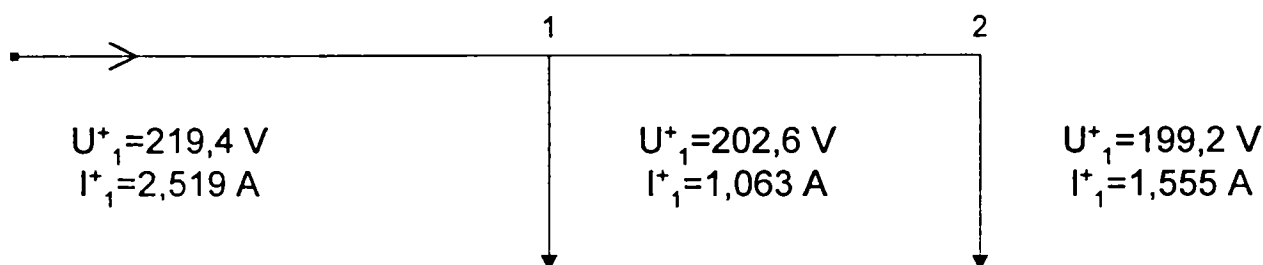
Prin urmare armonica a 3-a respectă ipoteza admisă și parțial și armonica a 7-a, armonica a 5-a, armonica inversă foarte prezentă în tensiunea sursei (3,53%; 3,61%; 3,74%) nu respectă această ipoteză.

d) Circulația curenților pe armonici și secvențe este prezentată în fig.5.13

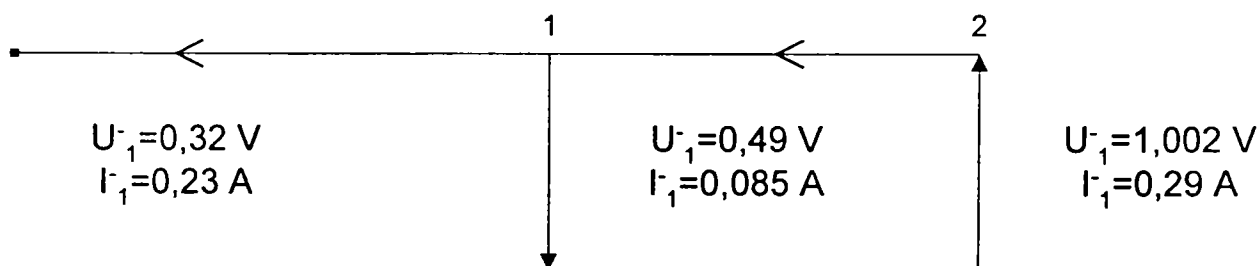
CIRCULATIA PE ARMONICI SI SECVENTE

K=1

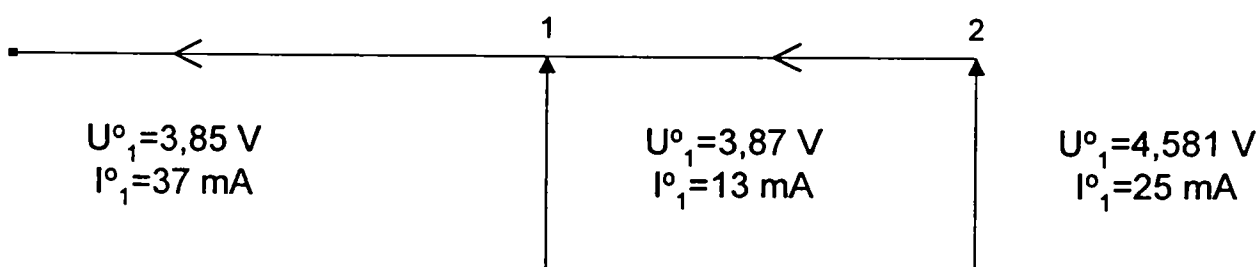
□ secvența pozitivă



□ secvența negativă

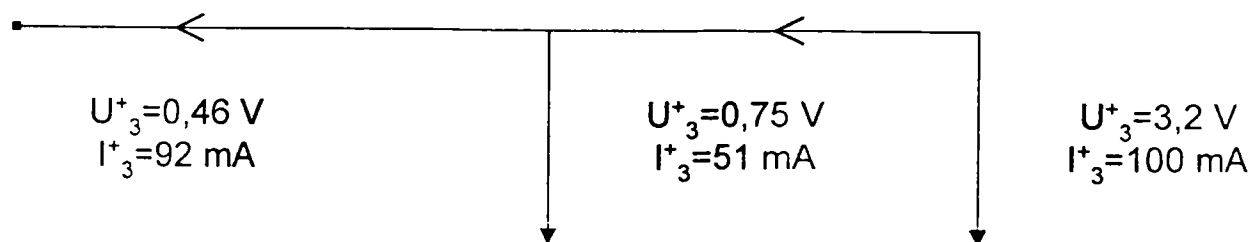


□ secvența zero

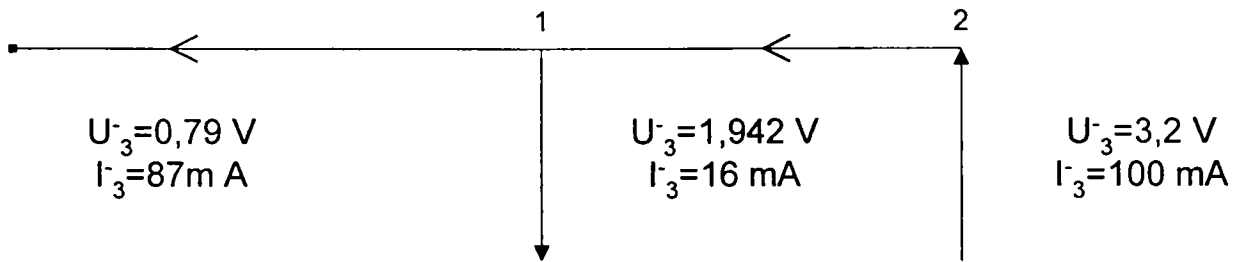


K=3

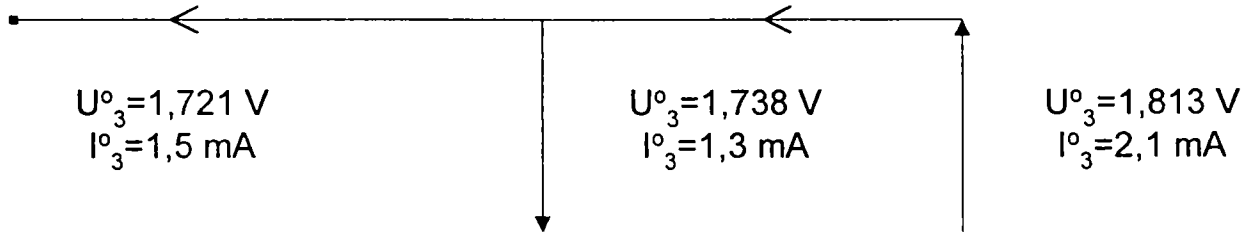
□ secvența pozitivă



□ secvența negativă

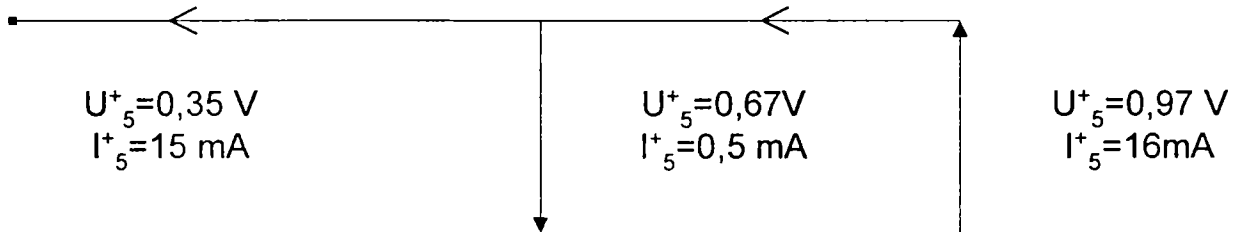


□ secvența zero

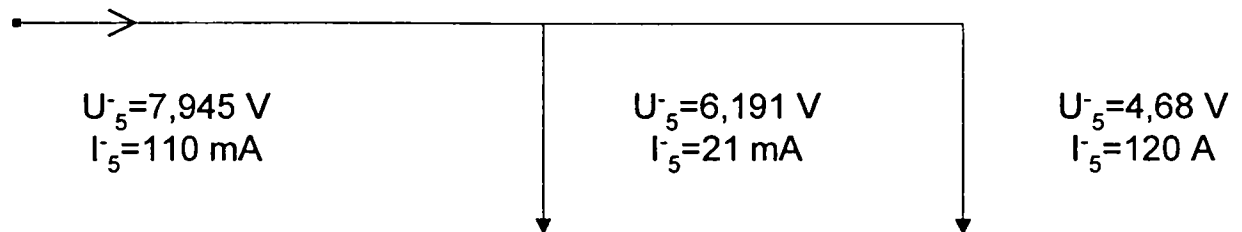


K=5

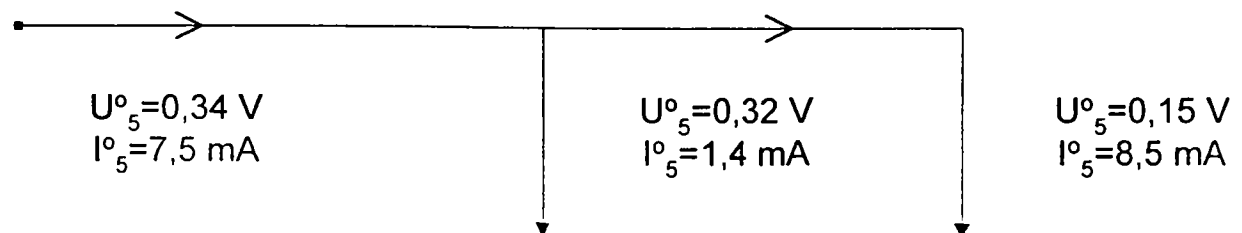
□ secvența pozitivă



□ secvența negativă

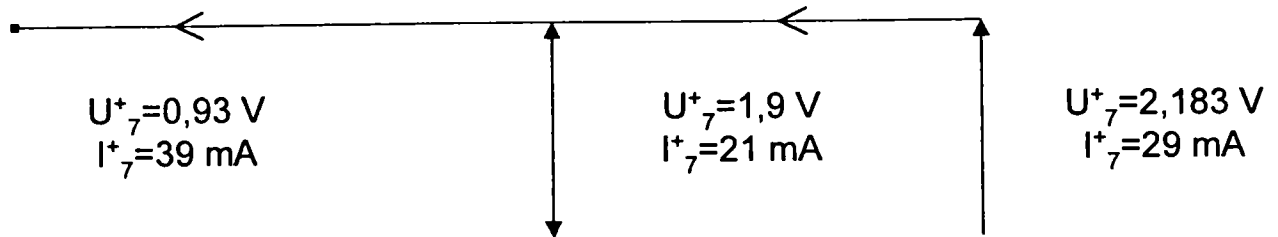


□ secvența zero

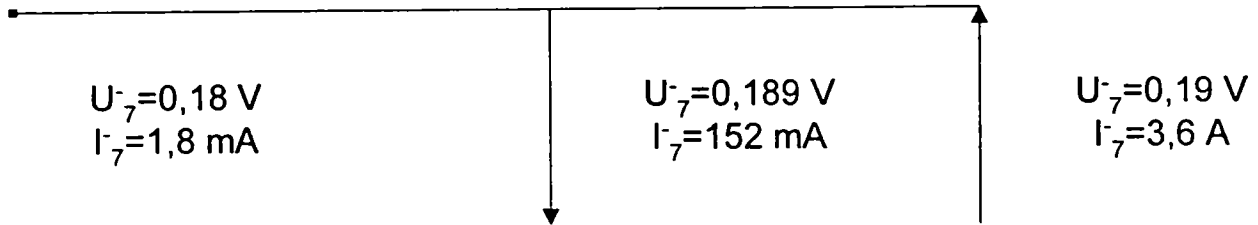


K=7

□ secvența pozitivă



□ secvența negativă



□ secvența zero

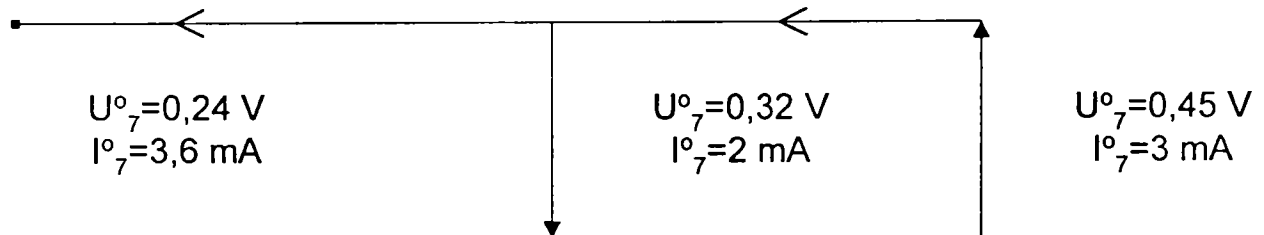


Fig.5.13. Circulație curenți, pe armonici și secvențe

Din cele prezentate rezultă următoarele:

- pe fundamentală și secvența pozitivă consumatorii absorb curenți respectiv puteri; circulația curenților se efectuează de la sursă spre consumatori;
- pe fundamentală, secvența negativă și zero curenții circulă de la consumatorul neliniar și dezechilibrat la consumatorul echilibrat și liniar;
- pe armonica a 3-a și a 7-a toate secvențele, consumatorul 2 debitează curenți atât consumatorului 1, cât și sursei;
- pe armonica a 5-a și secvența pozitivă, circulația curenților se face de la consumatorul 2 spre consumatorul 1 și sursă, pe secvența negativă și zero de la sursă spre cei doi consumatori;

Deci ipotezele admise sunt valabile pe fundamentală și armonica a 3-a și a 7-a. Pe armonica a 5-a validarea este parțială. Cauza este fără îndoială sursa limitată de putere (autotransformatorul), care prezintă armonica a 5-a și erorile de măsură.

5.3. Măsurători în instalații

Pe parcursul anilor 1998-2000 s-au efectuat o serie de măsurători în instalațiile S.D.ORADEA, în diverse puncte în rețea. Instrumentele folosite au fost din cele mai performante, digitale, și anume unul de fabricație autohtonă, TRINET, iar celălalt, ACE 2000 de fabricație canadiană. Măsurătorile s-au efectuat atât la medie cât și la joasă tensiune, schemele de montaj fiind cele prezentate în figurile de mai jos.

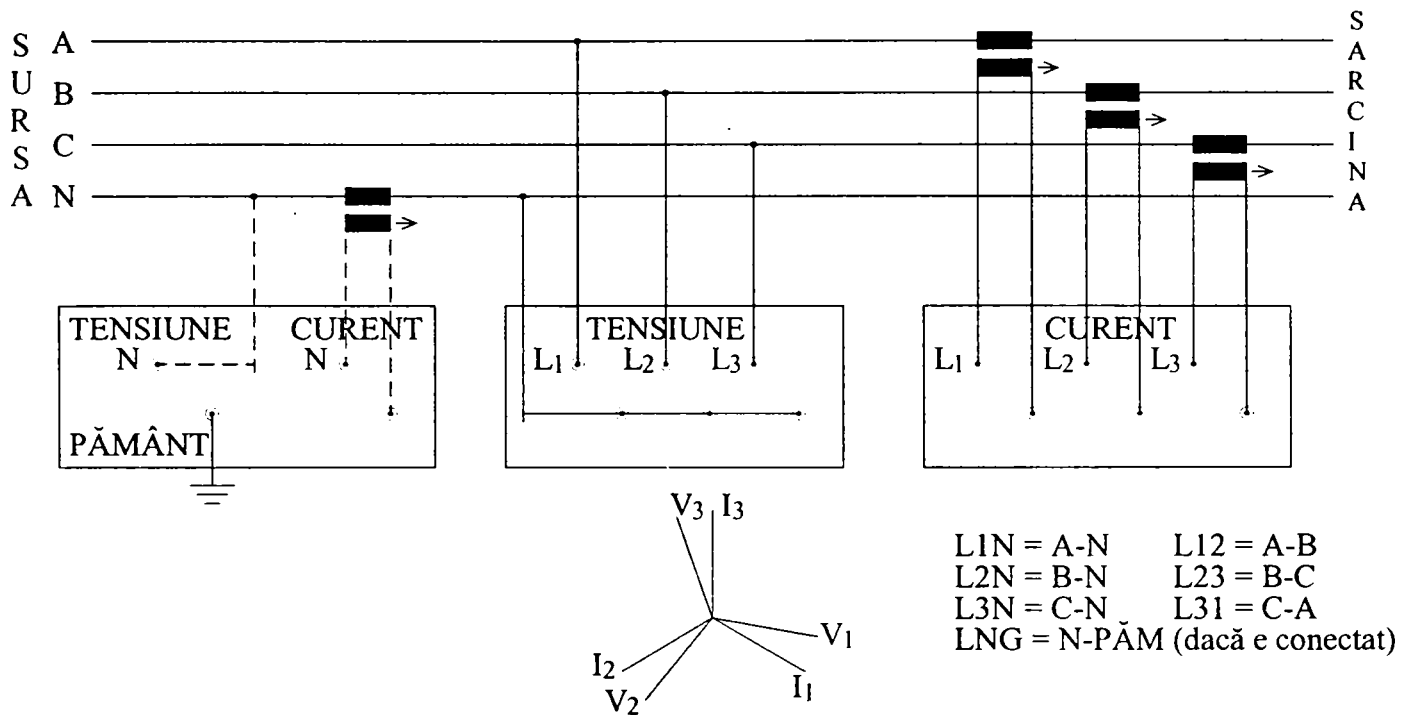


Fig. 5.14. Schema de montaj a ACE 2000 pentru măsurători în rețele de joasă tensiune

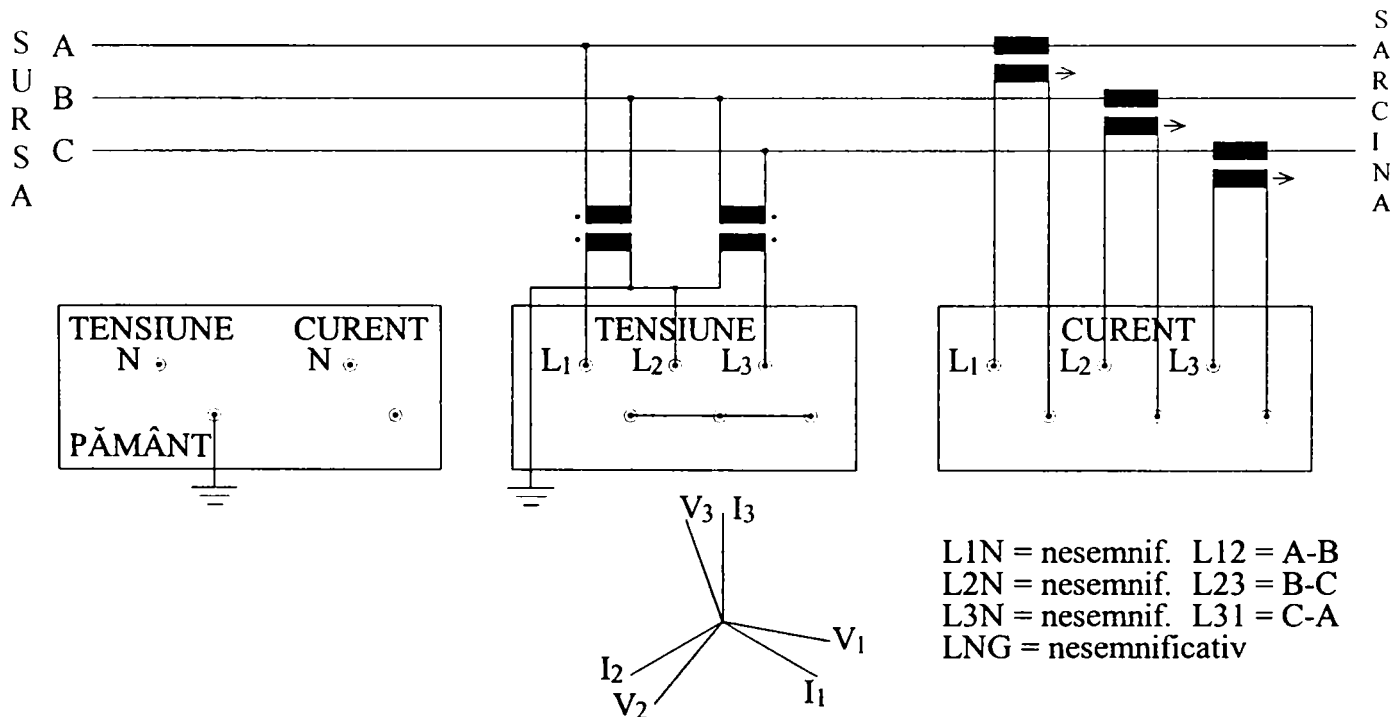


Fig. 5.15. Schema de montaj a ACE 2000 pentru măsurători în rețele de medie tensiune

În Anexa 4 sunt prezentate câteva din înregistrările făcute atât cu TRINET cât și cu ACE 2000. În lucrare se prezintă una dintre înregistrările cele mai reprezentative realizate cu ACE 2000 și anume o înregistrare într-un post de transformare de pe raza municipiului ORADEA, RAOTL, pe una dintre plecărilor de joasă tensiune care alimentează o stație de

redresori pentru tracțiune electrică urbană. Prelucrarea rezultatelor s-a efectuat pentru fundamentală și pentru fiecare dintre armonicile de rang 3,5,7. Rezultatele calculelor s-au centralizat în tabelul de mai jos.

Rang armonică	P	P*	P ⁻	P ⁰	S*	S	S _e	S _f
1	53980,9	54234,9	-17,9	-271,8	54262,9	54005,0	56735	13709,7
3	-203,6	-1,4	-6,2	208,3	3,2	251,0	-	259,9
5	-320,1	-4,0	-315,7	8,4	8,9	802,7	-	256,6
7	-241,9	-248,6	1,2	-7,9	308,8	304,8	-	88,0

Tabelul 5.9 cuprinzând rezultatele calculelor efectuate pentru înregistrarea RAOTL – Redresor 2 Zamfirescu 07/08/99 12:40:01

Se observă ușor cum, observațiile efectuate de către prof. Țugulea privind circulația fluxului de putere în regim nesimetric și nesinusoidal se respectă atât pentru fundamentală cât și pentru armonicile importante de rang impar (3,5,7).

În cazul armonicilor superioare teoria se respectă pentru ansamblul puterii active și nu pentru puterile active de secvență.

Prezența regimurilor nesimetrice și nesinusoidale în instalații a determinat conducerea S. D. Oradea la inițierea unui contract de cercetare cu Universitatea Oradea contract derulat pe parcursul anului 1988.

Lucrarea [F2], intitulată "Studiu privind stabilirea consumatorilor alimentați din rețeaua S. D. Oradea care provoacă regim deformant și nesimetric, a gradului de poluare al rețelei și a pierderilor suplimentare de energie provocate" a constat din identificarea zonelor "fierbinți" din instalații S. D. Oradea, din efectuarea de măsurători în aceste puncte (zone) și din prelucrarea rezultatelor prin perspectiva determinării pierderilor suplimentare de putere în aceste regimuri, respectiv a costurilor pe care le implică aceste pierderi suplimentare. Câteva din înregistrările efectuate sunt prezentate în Anexa 3:

În tabelul de mai jos se regăsesc coeficienții de distorsiune și de nesimetrie în câteva puncte din rețea în care s-au efectuat înregistrări.

Punctul de măsură	Distorsiune		Nesimetrie	
	δU [%]	δI [%]	K_{nsU} [%]	K_{nsI} [%]
Oradea Centru Redresor	1,96	20,64	2,1	4,9
Oradea Centru Zamfirescu	2,23	24,57	2,2	8,2
P.T. Accesorii	1,17	12,46	0,82	6,6
P.T. Cuptoare	1,62	5,34	0,79	4,9

Tabelul 5.10

Reprezentarea grafică a variațiilor pierderilor suplimentare cu gradul de încărcare al rețelei este redată, pentru P.T. Accesorii în fig. 5.16

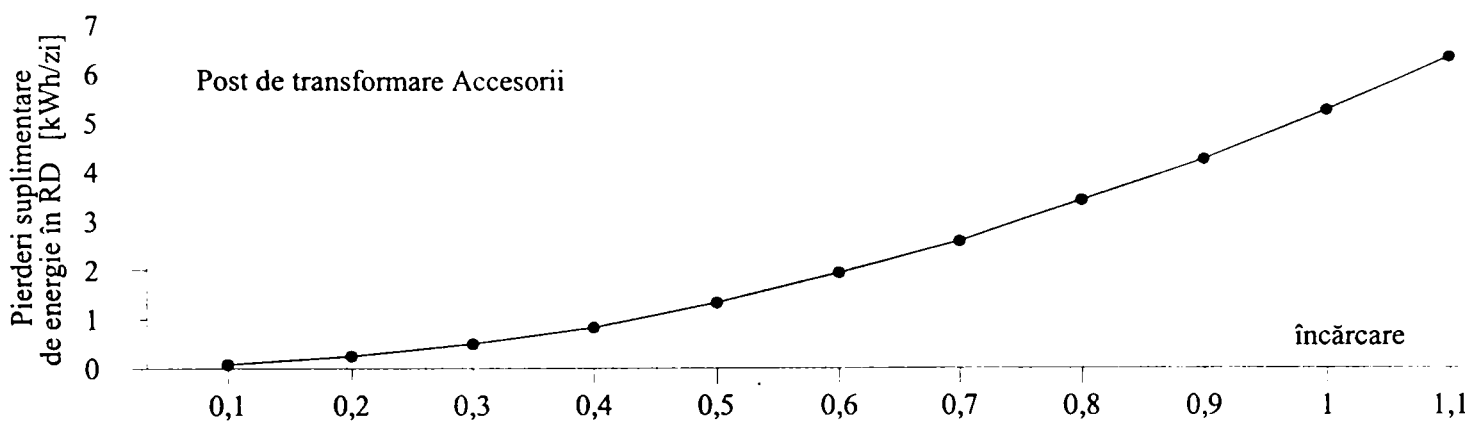


Fig. 5.16 Variația pierderilor suplimentare de energie în vârful de dimineață în funcție de gradul de încărcare, pentru P.T. Accesorii.

În cele ce urmează se prezintă câteva din concluziile desprinse în urma prelucrării înregistrărilor efectuate:

- pierderile suplimentare de energie provocate de funcționarea transformatoarelor analizate în regimuri nesimetrice și nesinusoidale pe parcursul unui an se estimează la 1,553 MWh, din care 9,52% provocate de regimul nesinusoidal și 90,48% provocate de regimul nesimetric
- pierderile suplimentare de energie provocate de funcționarea liniilor electrice analizate în regimuri nesimetrice și nesinusoidale se cifrează la 63,664 MWh din care 17,53% provocate de regimul nesinusoidal și 82,47% provocate de regimul nesimetric
- funcționare rețele analizate în regimuri nesimetrice și nesinusoidale conduce la existența unor daune estimate la 2616,06 milioane lei / an. Ponderea o dețin daunele provocate de pierderile suplimentare de energie în transformatoare și linii electrice adică 1623,78 milioane lei / an.

5.4. Interpretarea rezultatelor, concluzii

În conformitate cu cele analizate se pot enunța câteva concluzii. Privitor la circulația de putere, așa după cum de altfel era de așteptat, în fig.5.4. și în fig.5.7. se observă ușor cum consumatorul dezechilibrat devine "sursă" în ceea ce privește puterile de secvență negativă și zero.

Puterea fluctuantă, prin valoarea sa poate constitui un indicator fidel al gradului de nesimetrie din circuit, mai mult chiar urmărind valorile crescătoare ale puterii fluctuante, se pot identifica ușor nodurile în circuit în care sunt racordați consumatori nesimetrici.

În regim periodic nesinusoidal, în situațiile în care în circuit există și consumatori nesimetrici și consumatori neliniari, peste circulația de puteri de secvență negativă și zero pentru fundamentală (orientată dinspre consumatorul nesimetric către celelalte elemente din circuit, fig.5.7) se suprapune o circulație de puteri pe armonicile superioare (în cazul analizat armonicile 5 ; 7) orientată dinspre sursa de putere către restul circuitului. Având în vedere amplitudinea curenților de armonica 3 se observă ușor (fig.5.9) cum, în cazul analizat, ea nu este reprezentativă din punctual de vedere al pierderilor de putere din rețea. Din această perspectivă s-ar părea că merită a fi luate în considerare doar acele armonici a căror pondere reprezintă cel puțin 10% din fundamentală.

În cazul armonicilor superioare circulația de putere pe secvențe nu respectă întodeuna regula privind sensul de circulație dinspre consumatorul nesimetric/nesinusoidal către sursă sau alte elemente liniare din circuit, deși în ansamblu, la nivelul puterii active

P_k sau reactive Q_k corespunzătoare armonicii respective , ca sumă a puterilor aferente de pe cele trei faze, regula se respectă. În aceste condiții , la analiza circuitelor electrice în regimuri nesimetrice și nesinusoidale se poate propune următorul mod de abordare a problemei :

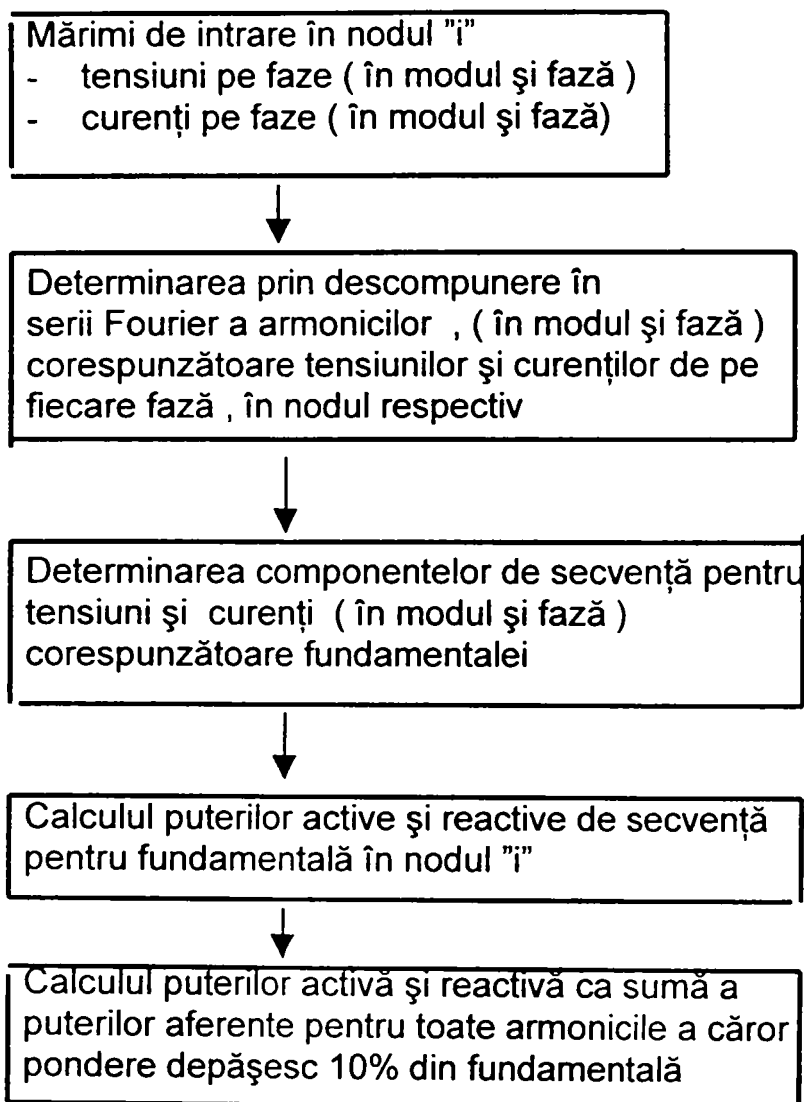


Fig.5.17. Procedură privind analiza regimurilor nesimetrice și nesinusoidale

CAPITOLUL 6

CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE

A. Lucrarea de față și-a propus ca din diversitatea de probleme pe care le prezintă analiza regimului sinusoidal nesimetric și periodic nesinusoidal , să se analizeze în principal o problemă și anume aceea referitoare la interacțiunea dintre regimuri și calitatea energiei electrice distribuite și consumate. În acest scop s-a căutat un indicator de calitate care să reunească aspecte specifice acestor probleme . Acesta nu poate fi decât *factorul de putere* , care în condițiile regimului real de funcționare , nesimetric și periodic nesinusoidal primește un conținut mult mai bogat decât în regimul ideal – simetric sinusoidal .

Departate de a soluționa complet problema definirii și caracterizării consumatorilor de energie electrică dezechilibrați și neliniari prin factorul de putere, lucrarea de față își propune să facă puțină ordine în acest domeniu și aceasta plecând de la teoria acad. A.Țugulea, care consideră că în rețelele (sistemele) cu surse de energie puternice, sursa regimului nesimetric sinusoidal o constituie consumatorii liniari dezechilibrați , iar a celui nesinusoidal consumatorii neliniari , considerând apoi o serie întreagă de criterii se obțin modele care permit definirea unui factor de putere în circuite monofazate ce funcționează în regim nesinusoidal sau în circuite trifazate nesimetrice sau nesimetrice și nesinusoidal periodice . Introducerea acestor criterii vizavi de modelele concepute pe baza conceptului de sursă a regimului perturbat nesimetric și nesinusoidal asigură o abordare sistematică a problemei și dau un caracter unitar soluțiilor propuse.

Pentru soluționarea problemelor legate de definirea factorului de putere în regimuri perturbate – nesimetric și nesinusoidal periodic, s-a considerat util a parcurge următoarele etape :

- analiza principalelor aspecte pe care le comportă regimul nesimetric : cauze, efecte , mărimi caracteristice, circulația de puteri în sisteme ce alimentează consumatori dezechilibrați, utilizarea metodei componentelor de secvență la analiza regimurilor nesimetrice, propagarea regimului nesimetric,
- prezentarea problemelor specifice regimului nesinusoidal periodic provocat (generat) de consumatorii neliniari din sistemul electroenergetic : cauze , efecte , indicatori de calitate a tensiunii și curentului în rețele poluate armonic , circulația de puteri în sistemele electrice ce alimentează consumatori neliniari, problematica impedanței armonice, preocupări și tendințe în analiza regimului nesinusoidal al rețelelor electrice,
- definirea puterilor electrice în sisteme trifazate ce funcționează în regimuri sinusoidal nesimetric și nesinusoidal periodic ,
- prezentarea problemelor legate de definirea și estimarea factorului de putere considerat ca un indicator de calitate a modului în care este consumată energia electrică : concepte generale privind calitatea energiei electrice , indicatori de calitate , tendințe manifestate în definirea și estimarea indicatorilor de calitate,

- criterii pentru definirea factorului de putere și corespunzător relații de definire a factorului de putere în regimuri nesimetric și nesinusoidal periodic,
- simulări numerice și determinări experimentale în laborator și în rețeaua de distribuție a S.A. Electrica Oradea în scopul validării concluziilor teoretice și a interpretării corecte a unor observații desprinse din lucrare sau prezentate în literatura de specialitate ,
 - formularea concluziilor generale și identificarea contribuțiilor originale;

Corespunzător etapelor mai sus menționate , în lucrare s-au stabilit următoarele concluzii :

a) privitor la regimul de funcționare sinusoidal nesimetric :

- în condițiile sistemelor electrice reale (sisteme de putere mare) sursa regimului nesimetric o constituie în principal consumatorii dezechilibrați și aceasta datorită ponderii însemnate pe care o prezintă impedanța consumatorului în totalul impedanței elementelor de transport , distribuție și consum;
- prezența regimului sinusoidal nesimetric conduce la creșterea pierderilor de putere și energie și la înrăutățirea factorului de putere , în condiții reale de exploatare aceste creșteri de pierderi , respectiv înrăutățirea valorii factorului de putere sunt de ordinul câtorva procente și doar în situații extreme poate atinge valori de 7- 10%;
- echilibrarea sarcinii pe fazele rețelei apare ca o soluție firească a unui proces de optimizare în care funcția obiectiv este tocmai pierderea de putere (sau energie) în rețea , deși modelul folosit a considerat unele ipoteze simplificatoare , (consumatori de aceeași natură) , procedura de găsire a optimului este clasică (anularea derivatelor parțiale) ;
- caracterizarea regimului nesimetric se realizează prin coeficienți și rapoarte de nesimetrie . Acestea se definesc apelând la descompunerea sistemelor de tensiuni și curenți în mărimi de secvență în cazul regimului sinusoidal nesimetric sau , în armonici , iar în cadrul fiecărei armonici în mărimi de secvență în condițiile regimului nesimetric și nesinusoidal periodic ;
- referitor la circulația puterilor în sisteme care alimentează consumatori dezechilibrați sau echilibrați neliniari s-a constatat că în regim sinusoidal (sau nesinusoidal dar pe fundamentală) , consumatorul dezechilibrat absoarbe curent (putere activă și reactivă) pe fundamentală, o parte o consumă iar alta o debitează pe secvența negativă și zero către consumatori echilibrați ai rețelei de alimentare; această constatare care validează de fapt teoria acad. Țugulea permite întocmirea unui model simplu pentru tensiunile și curenții de fază din nodurile rețelei , care apelează la tensiuni de secvență pozitivă, precum și la căderi de tensiune de secvență negativă și zero ;
- stabilirea formei matricei impedanțelor de secvență pentru elementele de rețea de formă generalizată , fără conductor neutru , cu conductor neutru , cu conductor neutru legat la pământ , permite evidențierea sensibilității impedanței de secvență zero față de configurația geometrică a elementului de rețea și cu legăturile acestuia cu exteriorul ;
- analiza propagării regimului nesimetric în sisteme ce alimentează consumatori dezechilibrați sau consumatori echilibrați și neliniari evidențiază interdependența dintre coeficienții de nesimetrie ai tensiunii și ai curentului , precum și atenuarea

- pronunțată a nesimetriei de tensiune în nodurile rețelei comparativ cu nesimetria curenților ;
- trecerea în revistă a problemelor pe care le comportă analiza regimului nesimetric evidențiază și un aspect neglijat de mulți cercetători și anume cel legat de utilitatea acestui regim ; un exemplu semnificativ este și acela legat de acordul corect al bobinei de stingere în rețele de medie tensiune ce prezintă linii aeriene;
- b) privitor la regimul de funcționare nesinusoidal periodic :
- regimul nesinusoidal periodic este determinat în primul rând de consumatorii neliniari , dar în situațiile practice și sursa de tensiune (sistemul real) poate prezenta armonici de nivel mai mare decât 1-2% ; este vorba de armonica a 3-a și a 5-a prezentă deseori în rețeaua de joasă tensiune și a 5-a în rețeaua de medie tensiune ;
 - dintre efectele regimului nesinusoidal (sau ale poluării armonice) se remarcă efectele energetice : creșterea pierderilor de putere și energie în rețele electrice , înrăutățirea factorului de putere , creșterea potențialului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor sau consumatorilor ;
 - în ceea ce privește creșterea pierderilor de putere și energie în conductoarele liniilor electrice în literatură există două tendințe : *una optimistă* în care se neglijează efectul pelicular și deci dependența rezistenței armonice a conductorului de rangul armonicii, k și *alta pesimistă* în care rezistența armonică se consideră dependentă de \sqrt{k} . O estimare mult mai corectă a rezistenței armonice cu rangul armonicii poate fi efectuată cu relații de forma : $R_1/R_k = \exp[1/(a + b/k^2)]$ sau $R_1/R_k = \exp[1/(a + b/k)]$;
 - situații deosebite pentru receptori pretențioși (cum ar fi tehnica de calcul, televizoare color, etc.) apar ca urmare a creșterii potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor sau receptoarelor . Potențialul punctului neutru depinde de raportul impedanțelor fază –neutru , iar acesta din urmă poate avea valori și caractere diferite ,dependent de regimul neutru și de condițiile normale sau de avarie în care acesta poate funcționa. O situație cu totul particulară apare în rețelele de medie tensiune tratate cu bobină de stingere prin BPN (bobină pentru formarea neutruului artificial) în condițiile apariției unei puneri la pământ ;
 - în ipoteza în care consumatorul neliniar este sursa de armonici (teoria acad.Tugulea) este posibil și în acest regim să se construiască un model matematic pentru determinarea tensiunii în nodurile rețelei ;
 - impedanta armonică este un mijloc util de analiza a regimului nesinusoidal , dar definiția acesteia data de CIGRE (ca impedanta de secvența directă) este valabilă îndeosebi pentru rețelele de transport, de înalta tensiune . Pentru rețelele de distribuție , în mod special pentru cele de alimentare a consumatori dezechilibrați apar diferențe sensibile între valorile impedanțelor armonice de secvența pozitivă și cele de secvența negativă . În plus apare semnificativă și impedanta de secvența zero;
 - propagarea poluării armonice în nodurile rețelei de distribuție este sensibil influențată de valorile impedanței armonice. Acestea depind firește de rangul armonicii, modelul adoptat pentru consumatorul liniar, gradul de compensare al

puterii reactive și puterea de scurtcircuit a sistemului. Dependent de modelul adoptat pentru consumatorul liniar, a gradului de compensare a puterii reactive și a puterii sistemului, poluarea armonică produsă de consumatorul neliniar poate fi atenuată sau amplificată. Situația cea mai pesimistă apare în condițiile adoptării unor modele complexe pentru consumatorul liniar, supracompensării puterii reactive și puterii de scurtcircuit reduse a sistemului ;

- actualmente se constată o intensificare a preocupării specialiștilor privind cercetarea fenomenelor deformante în general și a regimului nesinusoidal periodic în particular. Dintre acestea unele sunt legate nemijlocit de problemele de identificare în sens larg al teoriei sistemelor și de aplicare a tehnicilor generale de identificare / estimare a sistemelor automate la particularitățile sistemului electroenergetic ; altele dezvoltă probleme specifice electrotehnicii, menite să adâncească pe de o parte modelele matematice, pe de altă parte să surprindă și momente de timp cât mai reduse;

c) privind la definirea și estimarea factorului de putere :

- definirea factorului de putere trebuie să aibă în vedere preocupările actuale existente în legătură cu extinderea sferei indicatorilor de calitate în sensul identificării unor mărimi cât mai sintetice care să caracterizeze modul în care este consumată și distribuită energia electrică, unul dintre acestea fiind și factorul de putere ; valoarea lui trebuie să permită furnizorului de energie luarea unor măsuri prin care consumatorul să fie obligat să-și îmbunătățească din punct de vedere calitativ condițiile în care consumă energia electrică ; printre acestea se numără și reducerea circulației de putere reactivă în rețea , echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor ; ca urmare factorul de putere se conturează ca un indicator global de calitate a energiei electrice consumate ;
- tendințele care se manifestă actualmente în definirea și estimarea factorului de putere sunt legate în mod deosebit de stabilirea unor criterii cât mai adecvate care să asigure suportul teoretic și practic al definiției factorului de putere , folosirea puterilor instantanee la definirea factorului de putere , estimarea factorului de putere în timp real, asamblarea factorului de putere din termeni cu participare ponderată , fiecare din acești termeni caracterizând un aspect al calității energiei distribuite în rețeaua de alimentare și consumate , circulația puterilor reactive în rețea , dezechilibrul tensiunilor și curenților , deformarea curbilor de tensiune și curent ;
- în sistemele (circuitele) trifazate nesimetrice , factorul de putere monofazat (estimat pe fiecare fază) constituie un indicator semnificativ și util pentru aprecierea gradului de dezechilibru al sarcinii , iar la aplicarea măsurilor de îmbunătățire a valorii acestuia , valoarea sa trebuie urmărită și pe global consumator (adică un factor de putere trifazat) întrucât măsurile de îmbunătățire afectează toate cele trei faze ;
- valoarea factorului de putere (monofazat sau trifazat) nu constituie ceva semnificativ , atâta timp cât nu se indică modul de definire a acestuia ; dependent de criteriul luat în considerare la definirea factorului de putere , valorile acestuia pot înregistra variații de 50-60% . Cu cât numărul indicatorilor de calitate a energiei electrice care sunt cuprinși în expresia factorului de putere este mai mare , cu atât și valorile acestuia sunt mai pesimiste (reduse) ;

- considerarea puterii aparente echivalente , însoțita de sistemele digitale de contorizare corespunzătoare , ofera caracterul integral de estimare a factorului de putere ;
- stabilirea unor normative complete și corespunzător unor echipamente care să permita estimarea factorului de putere, domeniile preferate de valori ale acestuia , domeniul de penalizare , functionarea în domeniul capacitiv , se impun cu prisosință ;
- implicarea furnizorului de energie în a-i oferi asistența tehnică și mijloace , consumatorului pentru a-și îmbunătăți valoarea factorului de putere .

B. Contribuțiile originale

Principalele contribuții originale formulate în această lucrare sunt :

- sistematizarea problemelor legate de studiul regimului nesimetric provocat de sarcini dezechilibrate ;
- prezentarea problemei de echilibrare a sarcinii trifazate ca soluție de funcționare optimă a rețelei ;
- definirea unui coeficient de creștere a pierderilor de putere în regim nesimetric față de regimul simetric, corespunzător acelorași sarcini totale ;
- definirea unui coeficient de nesimetrie al tensiunii care are în vedere valoarea minimă respectiv maximă a tensiunii fazelor raportată la valoarea medie a acestora și a coeficienților de nesimetrie a impedanțelor ;
- evidențierea rolului impedanțelor de secvență în estimarea tensiunilor de secvență în nodurile rețelei ;
- extrapolarea tehnicii de determinare experimentale a impedanței de secvență pozitivă [M15] și la impedanța de secvență negativă ;
- prezentarea sintetică a efectelor negative ale poluării armonice asupra elementelor sistemului electroenergetic ;
- stabilirea a două expresii analitice pentru calculul rezistenței armonice a conductoarelor AI-OI folosite la linii electrice aeriene ;
- evidențierea unor aspecte particulare în problemele legate de cunoașterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni Y_0 ale transformatoarelor și consumatorilor ;
- formularea unor observații și completări privind definirea impedanței armonice dată de CIGRE în condițiile rețelelor de medie și mai ales joasă tensiune ;

- evidențierea rolului important pe care îl are modelul adoptat pentru consumatorul neliniar, puterea de scurt circuit a sistemului și gradul de compensare al puterii reactive asupra propagării regimului nesinusoidal ;
- formularea propunerii ca puterea fluctuantă rezultantă la un sistem trifazat nesimetric să fie un indicator simplu privind relevarea gradului de nesimetrie al sistemului , se arată și posibilitatea de realizare practică a unei astfel de scheme , cu generatoare Hall ;
- promovarea în analiza regimurilor sinusoidal nesimetric și periodic nesinusoidal a puterii aparente echivalente și relevarea criteriului energetic care stă la bază ;
- elaborarea unui model grafic explicativ pentru componentele puterii aparente echivalente într-un regim nesimetric ;
- relevarea unor aspecte critice asupra teoriei Czarniecki privind expresia propusă de acest cercetător pentru puterea reactivă și compensarea ei în regim nesinusoidal ;
- prezentarea interacțiunii dintre factorul de putere ca indicator al circulației de putere pe laturile rețelelor electrice și indicatorii de calitate a energiei electrice consumate ;
- sintetizarea principalelor direcții de cercetare existente în literatură în ceea ce privește definirea factorului de putere în nodurile rețelelor ce alimentează consumatori dezechilibrați și neliniari ;
- sistematizarea criteriilor și expresiilor în conformitate cu aceste criterii a relațiilor de definire a factorului de putere în sisteme trifazate funcționând în regim nesimetric și periodic nesinusoidal ;
- stabilirea expresiei factorului de putere plecând de la pierderile de putere longitudinale și transversale care apar în rețeaua de alimentare a consumatorului dezechilibrat și neliniar , rel.4.25, 4.26 , 4.27. ;
- pentru validarea rezultatelor și afirmațiilor din această teză s-au efectuat un număr relativ mare de simulări numerice PSpice , încercări experimentale în laborator și în posturi sau în stații de alimentare din cadrul S.C. Electrica S.A. – filiară Bihor.

BIBLIOGRAFIE

- [A1] - Albert, Hermina ., Pierderi de putere și energie în rețelele electrice. Determinare Măsurii de reducere. Editura tehnică ,București, 1984
- [A2] - Albert, Hermina , Mihăilescu, Anca , Pierderi de putere și energie în rețele electrice. Editura tehnică, București 1997
- [A3] - Albert, Hermina, Ionescu,S. , Unele considerații privind funcționarea rețelelor electrice. rev.Energetica, vol.35, nr.7, 1987, pg.314
- [A4] – Albert,Hermina , Golovanov, N. , Vaida, V. , Consideratii referitoare la puterea (energia) reactiva, SNRE, Iasi, 2000, vol.I, pg.306
- [A5] - Akagi, H. , Tsukamoto, Y. , Nabae, A. , Analysis and Design of an Active Power Filter Using Quad – Series Voltage – Source PWM Conwerters IEEE Transaction on Industry Applications, febr. 1990, pg.93
- [A6] - Akagi, H., Tsukamoto, Y. , Nabae, A. , Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits. IPEC Tokyo, 1983, pg.1375
- [A7] - Akagi H. ,Tsukamoto, Y. , Nabae, A. , Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.11, No.3, may/june 1984
- [A8] - Antoniu, I. S. , Bazele electrotehnicii. Editura didactică și pedagogică, București, 1974
- [A9] - Antoniu, I. S. , Chestiuni speciale de electrotehnică – Editura Academiei, 1956
- [A10]-Arie,A. ,Neguș, C. ,Golovanov,Carmen , Golovanov,N. , Poluarea cu armonici a sistemelor electroenergetice funcționând în regim permanent simetric. Editura didactică și pedagogică, București, 1981
- [A11] -Arpaia,P. , Avallone,F. , Bacciqualupi,A. , De Capua,C. , Real Time Algorithms for Active Power Measurement on PWM Based Electric Drives. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol.45, No.2, april 1996, pg.462
- [A12] - Arilaga,J. , Bradlez,D.A. ,Bodeer,P.S. , Power System Harmonic , John Miley & Sons, New York,1985
- [B1] - Budeanu, C. , Puissances réactives et fictives. Editura I.R.E. București 1927
- [B2] - Buta,A. , Transportul și distribuția energiei electrice . Universitatea Tehnică, Timisoara 1991
- [B3] - 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, Fascicola 1, 1997
- [B4] - Buta,A. , Vasilievici,A. Milea,L. , Transportul energiei electrice în curent continuu . Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1998
- [B5] - Buta, A. , Milea,L. Pană,A. , Impedanța armonică a rețelelor sistemelor electroenergetice . Ed. Tehnică, București,2000
- [B6] - Bogoevici,N. , Toader, D. , Utilizarea fazorilor de nesimetrie in analiza

- retelelor electrice trifazate nesimetrice si dezechilibrate. rev.Energetica , 41 nr.1 B, 1993 , pg.29-34
- [B7] - Buchholtz,F. , Die Drehstrom – Scheinbistung bei ungleichmessiger Belastung drei Zweige. Licht und Kraft, nr.2, ian.1922 , pg.9
- [B8] – Buta,A. , Milea,L. ,Pană,A. , Calitatea energiei electice. Editura AGIR, București, 2000
- [B9] – Buta, A. , Pană,A. , Simetrizarea sarcinii retelelor electrice de distributie. Edit. Orizonturi Universitare, Timisoara, 2000
- [C1]-Calin,S. ,Dumitrache,I. , Munteanu,F. , Iorga,V. , Nitu,N. FI.Munteanu, Reglarea numerică a proceselor tehnologice . Editura Tehnică, București, 1984
- [C2] - Chen,C. , Li Lin,E.C. , Huang,C.L. Reactive and Harmonic Current Compensation for Unbalanced Three – Phase Systems Using the Synchronous Detection Method. Electric Power System Research, vol. 26 Nr. 3, 1993
- [C3] - Chang,W.K. ,Grady,W.M. ,Minimizing Harmonic Voltage Distorsion with Multiple Current – Constrained Active Power Line Conditioners . IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.2, april 1997, pg.837
- [C4] - Cheng,T.H. , Yik,H.Y , Chos,S.C. , Design of Reactive Power Compensators for Distribution Systems with Harmonic Distorsion. Journal of the Chinese Intitute of Engineers, vol. 17, ISS. 3, 1994
- [C5] - Chiuță,I. , Conecini,i. , Compensarea regimului energetic deformant. Editura tehnică, București 1989
- [C6] - Chindriș,M. , Văclan,I. , Soluții moderne de combatere a regimului deformant în sistemul de distribuție a energiei electrice. Revista Energetica, Nr. 9, 1999
- [C7] - Conecini,I. , Imbunatatirea calitatii energiei electrice, Editura Tehnica Bucuresti, 1997
- [C8] - Conecini,I. , Calitatea energiei electrice. Teză de doctorat . Universitatea Politehnică București , 1999
- [C9] - Conecini,I , Lungu,I. , Gheorghe,St. , Costurile noncalității energiei electrice și propuneri de tarifarare a lor. Revista Energetica, Nr. 10, 1999
- [C10] -Conecini,I , Lungu,I. , Gheorghe,St., Aspecte privind calitatea energiei electrice cu referire speciala la emisiile de curenti armonici, in sistemul de distributie romanesc . Revista Energetica Nr.1, 1998, pg.27
- [C11] -Czarnecki,L.Z. , Consideration on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situation. IEEE Transaction on Instrumentation and Measuremant, Vol.1M-34 , No.3 , september 1985, pg.399-404
- [C12] -Czarnecki,L.Z. , What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and Why It Should be Abandoned , IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement , vol.1M-36, No.3, september 1987, pg.834-837
- [C13] -Czarnecki,L.Z. , Curent and Power Equations at Bidirectional Flow of Harmonic Active Power in Circuits with Rotating Machines. ETEP vol. 3. Nr. 1. ian. / febr. 1993
- [C14] -Czarnecki,L.Z. , Power Factor Improvement of Three – Phase Unbalanced Loads with Nonsinusoidal Supply Voltage , ETEP, vol. 3. Nr. 1. ian. / febr. 1993
- [C15] -Czarnecki,L.Z. , Swietlicki,T. ,Power in Nonsinusoidal Networks : Their Interpretation , Analysis and Measurement. IEEE Transaction on

Instrumentation and Measurement, Vol.39, N0.2, april 1990, pg.340-345

- [C16] -Czarnecki,L.Z. , Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry . IEEE Transaction Power Delivery, Vol .1A, No.3, july 1996, pg.1244
- [C17] -Czarnecki,L.Z. , On-Line Measurement of Equivalent of Power Distribution System and Load. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement , Vol. 45, No.2, april 1996,pg.467
- [C18] -Czarnecki,L.Z. , Power related phenomena in three-phase unbalanced systems. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement , Vol. 10, No.3, july 1995, pg. 1168-1173
- [C19] -Clarke,E. , Analiza Circuitelor Sistemelor Electro-Energetice. Editura Tehnica, Bucuresti, 1981
- [D1] - Davidovici,A , Diatcu,E. Feidzon,I.R. , Filippov,L.S. , Minicalcolatoarele și microcalculatoarele în conducerea proceselor industriale. Editura Tehnică, București, 1983
- [D2] - Dale,E. , Matica,R.I. , Matica,L.M. , Eficiența utilizării filtrelor de armonici in rețele de joasă tensiune. Simpozoinul Internațional de eficiență energetică, Cluj-Napoca , 24-26 oct, 2000, pg. 33
- [D3] - De Sabata, I. , Bazele electrotehnicii . vol. I , II , III , Institutul Politehnic Timisoara , 1976
- [D4] - Domijan,A. , Heydt,G.T. , Direction of Research on Electric Power Quality, IEEE Transaction on Power Electric Delivery, Vol.8, No.1 , january, 1993, pg.429
- [E1] - Eachern,A.Mc. , Grady,W.M. , Moncriet,W.M. , Heydi,G.T. , McGranaghram, M. , Revenue and Harmonics : An Evaluation of Some Proposed Rate Strubtures , IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 10. ian. 1999
- [E2] - Emanuel,A.E. , On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits With Sinusoidal Voltage and Currents. IEEE Transactions on Power Delivery ,Vol. 8, julie1993, pg.841
- [E3] - Emanuel,A.E. , The Buchholz – Goodhue Apparent Power Definition: the Practical Approach for Nonsinusoidal and Unbalanced Systems - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13., aprilie 1998, pg.512
- [E4] – Emanuel,A.E. , Apparent power definition for three-phase systems . IEEE Transactions on Power Delivery, vol.14, No.3, july1999, pg767
- [E5] - Enslin,J. , Measurementsand Compensation of Fictitious Power Under Nonsinusoidal Voltage and Current Conditions – IEEE Transaction on Instrumentation and measurement , sept. 1988 pg.403-408
- [E6] - Eustin,J. , Van Wyk ,J. , Measurments and Comments of Fictions Power Under Nonsinusoidal Voltage and Current Conditions , IEEE Transactions on Instrumentations , 1988, pg.403
- [F1] - Felea,I. , Dale,E. , Evaluarea pierderilor de putere și energie în transformatoarele electrice care funcționează în regim deformant. Analele Universitatii Oradea, 1995, pg75
- [F2] - Felea,I. , Dale,E. , Evaluarea pierderilor de putere și energie în transformatoarele electrice care funcționează în regim nesimetric. Analele Universitatii Oradea, 1996, pg .52

- [F3] - Felea,I. , Evaluarea pierderilor de putere si energie in conditiile functionarii transformatoarelor la abateri ale frecventei fata de valorile nominale , rev. Energetica , nr.38, 1990, pg.148
- [F4] – Felea,I. , s.a. , Stabilirea consumatorilor alimentati din reseaua S.D.Oradea care provoaca regim deformant si nesimetric , a gradului de poluare al retelei si a pierderilor suplimentare de energie provocate. Contract de cercetare nr.3350/1997
- [F5] - Fortesque,L.C. , Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Network, AIEE Trans. vol.37, part.II,1918, pg.1027
- [F6] - Fryze, S. – Wuk-Blind und Scheinleistung in Elektrische Stromkreisen mit nichtsinusformigen Verlauf von Strom und Spsnung, ETZ, Bd.vol.53, 1932, pg.596 -599
- [F7] – Ferrero,A. M. , A new approach to the definition of power components in three – phase systems under nonsinusoidal conditions. IEEE Transactions on Instrum. and Measurement , vol.40, No.3, june 1991, pg568
- [F8] – Ferrero,A. M. , Some consideration about the different possible approaches to the study of the electrical power szstems under nonsinusoidal considerations. ICHQP '98 , Athens, 1998 ,pg.14
- [F9] – Ferrero, A. , Peretto, L. , Sasdelli, R. , Resenue metering in the presence of distortion and unbalance : myths and reality. ICHOP '98, Athens, 1998, pg.42
- [F10] – Filipski,P.S. , Polyphase apparent power factor under distorted waveform conditions. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.6, no.3, july 1991, pg.1161
- [F11] - Frugone,G.P. , Regulation Model – A Business Opportunity to Increase Efficiency in Network and Profitability for the Company. Penn Well Conferences DA/DSM, Viena, 1996, pg.25
- [G1] - Godfrin,P. , Thang,W.Y. , Digital Protection and Control System of Primarz Substation Specification of an Open Arhitecture , Penn Well Conferences, Viena, 1996, pg.223
- [G2] - Gzugzi,L. , Ottos,R.A. , Puttman,T. - Principles and Applications of Static Thyristor – Controlled Shunt Compensators. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 97, 1978
- [H1] – Hochvainer,A. , Symmetrische Komponenten in Drehstromsysteme. Springer Verlag. Berlin, 1957
- [H2] – Harms,G. , Blindleistung in Energieensatz. Elektrotechnik, 61 ,H22, dec. 1979, pg.10
- [I1] - Iordache,M.. , Conecini,I. , Calitatea energiei electrice, Editura tehnica, Bucuresti, 1997
- [I2] - Iordănescu,I. , Compensarea factorului de putere și atenuarea regimului deformant, acțiuni interdependente în sistemele energetice moderne . rev. Energetica, nr. 28 ,1980
- [I3] – Ionescu,Tr.G. , Baciuc,A. , Retele electrice de distributie, Editura tehnica, Bucuresti, 1981
- [I4] - Ionescu,Tr.G. , Pop,O. - Ingineria sistemelor de distribuție a energiei electrice . Editura tehnică,Bucuresti, 1989
- [I5] - Ivan, M. , Crăciun,M. , Elefterescu,L. , Banca de date privind calitatea energiei electrice, rev. Energetica , vol.45, nr.10, 1997, pg470

- [J1] - Jacobson,L. , Impact of Distribution Automation (DA) for Utility Efficiency . International Conference on Managing Energy Distribution and Demand , Austria, octomber 1996
- [J2] - Jones,R. , The Effect on electric Industry Restructuring. International conference on managing energy distribution, Austria, oct. 1996
- [K1] - Kakimoto, H. , Development of High Voltage Distribution Line Management System , International conference on managing energy distribution and desand, Austria, 1996
- [K2] - Key,Th.S. , Lai J-S , Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distorsion in Power Systems , IEEE Transaction on Industry Applications , aug. 1993
- [K3] - Koponen,P. , Farin,J. , Problems and Posibilitie with Billing Meters and Power Quality , Penn Well, Conferences DA/DSM, Viena, 1996,pg.279
- [K4] - Knowhon,A.E. , Reactive Pover Concepts in Need of Clarification . Transactions AIEE, sept. 1953
- [K5] - Kusters N.L.,Moore W.J.M. , On the Definition of Reactive Power Nonsinusoidal Conditions. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, nr. 5, sept. 1980, pg.1845-1853
- [K6] - Koval,D.O. , Leonard,J. , Licsko,Z. , Power Quality of Small Rural Industries . IEEE Transaction on Industry Application , Vol.29,No.4, july/august 1994, pg.696
- [L1] - Lang,Th. , Insight of RF Fixed network Infrastructure Applied to AMR and DSM , Penn Well, Conferences DA/DSM, Viena, 1996, pg.103
- [L2] - Lauronen,J. , The Effects of and Material Management on the Quality of Supply . Penn Well, Conferences DA/DSM, Viena, 1996, pg.577
- [L3] - LaWhite,N. Ilie,M.D. , Vector Space Decomposition of Reactive Power for Periodic Nonsinusoidal Signals . IEEE Transaction on Circuits and Systems, april, 1997, pg.338
- [L4] - Lamedica,R. ,Prudenzi,A. , Tironi, E. Zaninelli,D. , A model of large load ereas for harmonic studies in distribution network, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.12, no.1, 1997 pg.418
- [M1] - MacLaren,R. , Management and Delivery of Distribution Automation . Penn Well, Conferences DA/DSM, Viena, 1996, vol.II, pg.13
- [M2] - Manea,Fl. , The power of unsymmetrical und unbalanced systems. Studii si cercetari in energetica , vol.4, 1960, pg.770
- [M3] - Matica,L.M. , Numerical Algorithm for Measuring the Quality Factor. Analele Universității din Oradea , Fascicola Electrotehnică, Oradea, 1997, pg.56-60
- [M4] - Matica,L.M. , Programme for Compute Power Transfer Quality in Nonsinusoidal Situation. Analele Universității din Oradea , Fascicola Electrotehnică, Oradea, 1998, pg.72-76
- [M5] -Matica,L.M. , Abrudan,A. , Method of implementing numerical filtering algorithms, Analele Universității din Oradea , Fascicola Electrotehnică, Oradea, 1998, pg.76-82
- [M6] - Matica,L.M. , Elements of Artificial Intelligence for Optimization in Energetics, Analele Universității din Oradea , Fascicola Electrotehnică, Oradea, 1999, pg.58-64
- [M7] - Matica,L.M. , Matica,R.I. , About the Relevance of the Power Transfer

- Quality Factor in Nonsinusoidal Situations . Proceedings of the Third International Power System Conference, vol. II. Timișoara, 1999, pg.9-11
- [M8] - Matica,L.M. , Matica,R.I. - Consideration about Analyze methods for Apparent Power in Nonsinusoidal Situations. Proceedings of the Third International Power System Conference. vol. II. Timișoara, 1999, pg.12-15
- [M9] - Matica,L.M., Matica,R.I. , Componente ale puterii aparente în regim nesimetric și nesinusoidal. S.N.R.E., Iași , 1999, pg.402
- [M10] -Matica,L.M., Matica,R.I. , Factorul de putere in regim nesimetric si nesinusoidal. S.N.R.E., Iași , 1999, pg. 409
- [M11] -Matica,L.M., Matica,R.I. , Puterea si factorul de putere in regim nesimetric. S.R.E., Baia-Mare, 2000 , pg .317
- [M12] -Matica,L.M., Matica,R.I. , Regimul nesinusoidal, procedee de filtrare. S.S.N.M.N., Cluj, 2000, pg.138
- [M13] -Matica,L.M., Matica,R.I. , Control Strategy of Butterworth Active Power Filters in Nonsinusoidal Situation . Simpozion Theta, Cluj, 2000, pg.201
- [M14] - Matica,L.M., Matica,R.I. , Consideration About Power and Power Flows in Electrical Systems with Unbalanced Loads. Rev. World Energy System , nr.4, 2000
- [M15] - Mărieș,M. , Popescu,M. , Compensarea puterii reactive în condițiile regimului deformant . rev. Energetica, 30, nr. 2, 1982
- [M16] - Meynaud,Y, s.a. , Harmoniques, paramètres, caractéristiques, méthodes, d'étude, estimation des valeurs existantes in réseau, Electra, 77, iulie 1981
- [M17] – Milea,L. , Buta,A. , Analysis of non-synusoidal operating conditions of power networks by means of the capacitive values. Buletinul Stiintific al Universitatii "Politehnica" din Timisoara , seria Electrotehnica, pg109
- [M18] -Mureșan,T. Schlett,Z. , Buta,A. , Moldovan,L. , Popescu,L. ,Aparate și instalații pentru reducerea consumurilor de energie electrică în industrie . Editura Facla, Timișoara, 1994
- [N1] - Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețele electrice . P.E. 143 / 1994
- [N2] - Nemoianu,C. , O metoda de determinare a puterilor de simetrie si a celor de nesimetrie . Lucr. celui de al doilea seminar national de electrotehnica, aprl.1996, catedra de Electrotehnica, Univ.Politehnica Bucuresti, pg. 1-14
- [O1] - .Ortmeyer,N. Chakravarthi,R.R. , Mahmoud,A.A. , The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads - Trans. Power App. Syst. , 1985, vol. 1. Pas – 104, pp. 2555
- [P1] - Pană,A. , Optimizarea funcționării rețelelor electrice de distribuție . Universitatea "Politehnica" din Timișoara, teză de doctorat , 1998
- [P2] -.Pană,A. , Mecanismul energetic al echilibrării al echilibrării sarcinii prin compensare reactivă transversală în rețele electrice cu trei conductoare. ,Buletinul Stiintific al Universității Politehnica , Timișoara, fascicola 2, 1999
- [P3] - Pană,A. , Elemente de calcul pentru compensarea dezechilibrelor sarcinii în rețele electrice trifazate cu trei conductoare, Buletinul Stiintific al Universității Politehnica , Timișoara, Fascicola 2,1999

- [P4] - Peter,H.C. , Buta,A. , The Power Estimation for a Particular Case: Electric Railway Traction , Proceedings of the Third International Power System Conference, vol. II. Timișoara ,1999, pg. 19
- [P5] - Page,C.H. , Reactive Power in Nonsinusoidal Situation . IEEE Trans. Instrum. and Measur., Vol.IM-29, dec. 1980, pg.420
- [P6] - Peng,F-Z. , Akagi,H. , Nabae,A. , A Study of Active Power Filters Using Quad – Series Voltage – Source PWM Conwerters for Harmonic Compensation. IEEE Transaction on Power Electronics, jan. 1990, pg.9
- [P7] - Peng,F-Z. , Lai, J. S. , Application Considerations and Compensation Characteristics of Shunt Active and Series Active Filtres in Power Systems , ICHQP, 1996
- [P8] - Pitrone,N. , Decentralized On – Live Management of Distribution System. Penn Well, Conferences DA/DISM, Viena, 1996, pg.487
- [P9] - Poată,Al. , Arie,A. , Crișan,O. , Eremia,M. , Buta,A. Alexandrescu,I. Transportul și distribuția energiei electrice. Editura didactică și pedagogică, București, 1981 .
- [P10] - Pușcașu,S. , Marcovici,J. Mărimi și regimuri electrice nesinusoidale , Editura didactică și pedagogică, București, 1975
- [P11] - Preda,I. , Caba,A. Tălmăciu,P. , Influența sarcinilor nesimetrice asupra pierderilor de energie electrică în instalații electrice trifazate cu patru conductoare . rev. Energetica , nr.10, 1981, pg.441
- [P12] - Pană,A. , Elemente de calcul pentru compensarea dezechilibrelor sarcinii în rețele electrice trifazate cu trei conductoare. Buletin Științific al Univ.din Timișoara ,Tom 44, fascicola 2, 1999
- [P13] - Pană,A. , Mecanismul energetic al echilibrării sarcinii prin compensare reactivă transversală în rețele electrice cu trei conductoare. Buletin Științific al Univ.din Timișoara ,Tom 44, fascicola 2, 1999
- [P14] – Peter,H. , Buta,A. , Milea,: , Pana,A. , Estimarea factorului de putere în rețele cu consumatori dezechilibrați și neliniari. S.N.R.E. Iași , 2000, pg. 372
- [P15] - Potolea,E. , Sănduleac,M. , Popa,R. , Analiza sistemelor dezechilibrate și nesinusoidale – o nouă abordare pornind de la teoria Budeanu. Regimul deformant și nesimetric în rețele electrice. Lucrările mesei rotunde, Slănic-Moldova, 19-20 iunie, 1997
- [P16] – Pires, Francisca, A.C.Apparent Power and Power Factor Evaluation . Proposition under Nonsinusoidal Conditions. ICHQP,Athens-Grecce,14-16 oct. 2000, pg.20-23
- [R1] - Răduleț,R. , Bazele electrotehnicii. Probleme. vol. II. , Editura scrisul românesc, Craiova 1974
- [R2] - Rădășanu,D. , Georgescu,Gh. , Tehnici noi de estimare a pierderilor de putere în rețele electrice folosind inteligența artificială. Rev. Energetica,nr. 10 , oct. 1998
- [R3] - Robert,A. , Deflandre,T., Group de travail, CC02, Guide pour l'evaloution de l'impedance harmonigie du reseau, rev. Electra, No.167,1996,pg96
- [S1] - Sharon,D. - Power Factor Definitions and Power Transfer Quality in Nonsinusoidal Situations. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, no. 3. iunie 1996, pg.728-733
- [S2] - Sora, C-tin , Bazele electrotehnicii . Editura didactică și pedagogică,

- București, 1982
- [S3] - Sheperd, W. , Zand, P. , Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits. London, Cambridge Univ. Press, 1979
- [T1] – Tăranu, Violeta, Contribuții la studiul calității energiei electrice, teză de doctorat. Universitatea Tehnică, Gh Asachi , Iași 1994
- [T2] – Toader, D. , Contributii privind stadiul defectelor de tipul conductor intrerupt si cazut la pamant , in retele electrice de medie tensiune. Teza de doctorat, Institutul Politehnic Timisoara, 1986
- [T3] - Trung H. Lang - Insight of RF Fixed network Infrastructure Applied to AMR and DA/DSM , International Conference on Managing Energy Distribution, Austria, 1996
- [T4] - Țugulea, A. , Consideratii privind efectele energetice în regimuri armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate. Rev.Energetica 1986, nr. 3, pg.121
- [T5] - Țugulea, A. , The Electromagnetic Pseudo-Power Conservation . A Generalization of Tellegen's Theorem for Electromagnetic Field Quantities, Rev. Sci.Techn. – Electrochn. et Energ. Vol.31 nr.3, 1986, pg.247
- [T6] - Țugulea, A. , Considerații referitoare la definirea factorului de putere pentru sisteme trifazate dezechilibrate. rev. Energetica, nr.4, ian.1986, pg.164-167
- [T7] - Țugulea, A. , Factorul de putere în regim deformant . rev. Energetica nr.9, sept.1986, pg.407-413
- [T8] - Țugulea, A. , Considerații privind efectele energetice ale regimului deformant. rev. Energetica, nr.1, ian.1986, pg.27
- [T9] - Țugulea, A. , Golovanov, C. , The Energetic Effects in the Distorting and Unbalanced Steady-States of the Electrical Power Systems. Possibilities of Measurement. Edit. Tehn., Bucuresti, 1987
- [T10] – Țugulea, A. , Luca, D. , Almost –Periodic Distorting Steady-States of Power Systems. rev. Roum. Sci.Techn., Electrotechn. et Energ. Vol.35 no.2, 1990, pg.187
- [T11] - Țugulea, A. , Criteria for the definition of the Electric Power Quality and its Measurement System . ETEP , vol.6, nr.5, sept./oct. , 1996, pg.357-363
- [T12] - Țugulea, A. , Nemoianu, C. , Țugulea, Alex. , Caracterisation des regimes triphases asymetrique a l'aide des certains parametres des composantes symetriques. rev.Roum.Sci.Tech-Electrotehn. et Energ. 36 , nr.4 , 1991 , București
- [T13] - Țugulea, A. , Ionescu, T.G. , Marinescu, A. , Evaluarea pierderilor suplimentare de putere și de energie electrică introduse de consumatorii industriali care prezintă un regim de funcționare nesimetric și deformant în rețele electrice de transport ale F.R.E. Suceava , S.N.R.E. Suceava , 1994 , vol.1 , pg.34
- [U1] - Ungureanu, M. , Toader, C. , Ioan, S. , Perturbații electromagnetice produse de consumatorii racordați la rețele de joasă tensiune. Efectul utilizării tehnologiei moderne la consumatori, rev.Energetica, vol.44, nr.23, 1966, pg.77
- [W1] - IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situation , Practical Definitions

for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion. IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 11. no. 1. jan. 1998, pg.79-85

[V1] - Valcarcel,M. , Mayordomo,J.G. ,Harmonic Power Flow for Unbalanced System. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.8, octomber 1993, pg.2052

ANEXA 1

REGIMUL R I

- fișier PSPICE**
- fișe de calcul**

**** 04/04/101 09:51:20 ***** Evaluation PSpice (Jan 1993) *****

reg.nesimetric RI

**** CIRCUIT DESCRIPTION

```
v1 110 4 ac 240 0.0
v2 120 4 ac 240v -120
v3 130 4 ac 240v 120
rst1 111 1 0.072
rst2 122 2 0.072
rst3 133 3 0.072
lt100 110 111 0.1mh
lt200 120 122 0.1mh
lt300 130 133 0.1mh
rnp 4 0 4
```

```
lr1 100 101 0.0198mh
ls1 200 102 0.0198mh
lt1 300 103 0.0198mh
rr1 11 101 0.015
rs1 12 102 0.015
rt1 13 103 0.015
rn1 400 401 0.019
ln1 401 14 0.02mh
rp2 14 0 4
```

```
lr2 1 97 0.0375mh
ls2 2 98 0.0375mh
lt2 3 99 0.0375mh
rr2 97 100 0.0196
rs2 98 200 0.0196
rt2 99 300 0.0196
rn2 4 399 0.03
ln2 399 400 0.0396mh
rp1 400 0 4
```

```
lr3 1 27 0.0396mh
ls3 2 28 0.0396mh
lt3 3 29 0.0396mh
rr3 31 27 0.03
rs3 32 28 0.03
rt3 33 29 0.03
rn3 4 25 0.04
ln3 25 34 0.041mh
rp3 34 0 4
```

```
lcr3 31 310 0.011h
lcs3 32 320 0.011h
lct3 33 330 0.011h
rcr3 310 50 3.39
rcs3 320 50 3.39
rct3 330 50 3.39
rcp3 50 0 10k
```

```
rccr 11 4001 3.74
rccs 12 4002 3.74
rcct 13 4003 3.74
lccr 4001 40 0.008h
lccs 4002 40 0.008h
```

```
lcct 4003 40 0.008h
rccn 40 0 10k
```

```
rcor 100 5001 2
rcos 200 5002 1.082
rcot 300 5003 3
lcor 5001 400 13mh
lcos 5002 400 8mh
lcot 5003 400 1.05mh
```

```
.ac lin 1 50hz 50hz
```

```
.print ac v(1,4) vr(1,4) vi(1,4) vp(1,4)
.print ac v(2,4) vr(2,4) vi(2,4) vp(2,4)
.print ac v(3,4) vr(3,4) vi(3,4) vp(3,4)
.print ac v(100,400) vr(100,400) vi(100,400) vp(100,400)
.print ac v(200,400) vr(200,400) vi(200,400) vp(200,400)
.print ac v(300,400) vr(300,400) vi(300,400) vp(300,400)
.print ac v(4) vp(4)
.print ac v(400) vp(400)
.print ac v(14) vp(14)
.print ac v(34) vp(34)
```

```
.print ac i(lr1) ir(lr1) ii(lr1) ip(lr1)
.print ac i(ls1) ir(ls1) ii(ls1) ip(ls1)
.print ac i(lt1) ir(lt1) ii(lt1) ip(lt1)
.print ac i(ln1) ir(ln1) ii(ln1) ip(ln1)
```

```
.print ac i(lr2) ir(lr2) ii(lr2) ip(lr2)
.print ac i(ls2) ir(ls2) ii(ls2) ip(ls2)
.print ac i(lt2) ir(lt2) ii(lt2) ip(lt2)
.print ac i(ln2) ir(ln2) ii(ln2) ip(ln2)
```

```
.print ac i(lr3) ir(lr3) ii(lr3) ip(lr3)
.print ac i(ls3) ir(ls3) ii(ls3) ip(ls3)
.print ac i(lt3) ir(lt3) ii(lt3) ip(lt3)
.print ac i(ln3) ir(ln3) ii(ln3) ip(ln3)
```

```
.print ac i(rst1) ip(rst1)
.print ac i(rst2) ip(rst2)
.print ac i(rst3) ip(rst3)
.print ac i(rnp) ip(rnp)
```

```
.print ac i(rcor) ip(rcor)
.print ac i(rcos) ip(rcos)
.print ac i(rcot) ip(rcot)
```

```
.print ac v(31,34) vr(31,34) vi(31,34) vp(31,34)
.print ac v(32,34) vr(32,34) vi(32,34) vp(32,34)
.print ac v(33,34) vr(33,34) vi(33,34) vp(33,34)
```

```
.print ac v(11,14) vr(11,14) vi(11,14) vp(11,14)
.print ac v(12,14) vr(12,14) vi(12,14) vp(12,14)
.print ac v(13,14) vr(13,14) vi(13,14) vp(13,14)
```

```
.end
```

```
**** 04/04/101 09:51:20 ***** Evaluation PSpice (Jan 1993) *****
```

```
reg.nesimetric RI
```

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
```

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. A
 REGIM I
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U			φ [°]
	[V]	[°]	[A]	
R	229.7	1.1	143.5	-46.67
S	227.9	-118.50	174.0	-170.20
T	227.1	120.10	163.8	94.94
N	1.47	3.70	91.1	-18.7
R	228.2	0.9	157.4	-40.6
S	228.2	-119.1	157.4	-160.6
T	228.2	120.9	157.4	79.4
R	1.1	-35.2	14.2	-235.2
S	1.1	-155.2	14.2	-355.2
T	1.1	84.8	14.2	-115.2
R	2.3	4.9	30.6	-198.5
S	2.3	4.9	30.6	-198.5
T	2.3	4.9	30.6	-198.5

	modul			faza			{Re}	{Im}
R	71.9	-193.6	-69.9	16.9	16.9			
S	71.9	-193.6	-69.9	16.9	16.9			
T	71.9	-193.6	-69.9	16.9	16.9			
R	3233.9	-234.3	-1888.3	2625.4				
S	3233.9	-474.3	-1329.5	-2948.0				
T	3233.9	5.7	3217.8	322.6				
R	168.6	-75.9	41.2	-163.5				
S	168.6	-315.9	121.0	117.4				
T	168.6	164.1	-162.2	46.1				
R	3133.6	-232.3	-1917.0	2478.8				
S	3090.4	65.6	-1278.4	-2813.6				
T	3010.5	7.4	2985.7	385.6				
							-209.7	
							50.8	

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
22154.0	24406.8	32962.0			
24577.1	31120.0	39654.6			
33669.7	15815.1	37199.0	80400.8	71341.8	107489.3
26880.5	23814.4	35912.2			
26880.5	23814.4	35912.2	80641.5	71443.2	107736.7
-14.3	-5.2	15.2			
-14.3	-5.2	15.2			
-14.3	-5.2	15.2	-42.8	-15.5	45.6
-66.0	-28.6	71.9			
-66.0	-28.6	71.9			
-66.0	-28.6	71.9	-197.9	-85.6	215.7
			80400.8	71341.8	107489.3

Ue= 228.2 V Ue'= 228.2 V
 Ie= 173.6 A Ie'= 173.8 A
 Se= 118857.1 VA Se'= 118987.7 VA

k_{os}= 0.748506 k_{pr}= 0.672108
 k_{sn}= 0.905444 k_{ps}= 0.619779
 k_p= 0.67773 k_{pl}= 0.905124
 k_{pr(4.14)}}= 0.746271 k_{om}= 0.732337
 k_{pr(4.39)}}= 0.519402
 k₁= 0.7 Pf= 9234.5
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. B
 REGIM I
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U			I			φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[A]	[°]	[°]	
R	229.7	1.1	96.9	-47.79	48.9		
S	227.9	-118.50	127.2	-172.30	53.8		
T	227.1	120.10	120.8	102.5	17.6		
N	1.47	3.70	91.1	-18.7			
d	228.2	0.9	110.6	-39.0	39.9		
S	228.2	-119.1	110.6	-159.0	39.9		
T	228.2	120.9	110.6	81.0	39.9		
i	1.1	-35.2	14.4	-235.7	200.5		
S	1.1	-155.2	14.4	-355.7	200.5		
T	1.1	84.8	14.4	-115.7	200.5		
h	2.3	4.9	30.6	-198.5	203.4		
S	2.3	4.9	30.6	-198.5	203.4		
T	2.3	4.9	30.6	-198.5	203.4		

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
14634.7	16770.2	22257.9			
17121.0	23392.9	28988.9			
26149.5	8295.1	27433.7	57905.3	48458.2	75506.4
19382.2	16186.7	25252.3			
19382.2	16186.7	25252.3			
19382.2	16186.7	25252.3	58146.6	48560.1	75756.9
-14.4	-5.4	15.4			
-14.4	-5.4	15.4			
-14.4	-5.4	15.4	-43.3	-16.2	46.3
-66.0	-28.6	71.9			
-66.0	-28.6	71.9			
-66.0	-28.6	71.9	-198.0	-85.7	215.7
			57905.3	48458.2	75506.4

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	71.9	-193.6	-69.9	16.9
S	71.9	-193.6	-69.9	16.9
T	71.9	-193.6	-69.9	16.9
R	3285.4	-234.8	-1891.5	2686.2
S	3285.4	-474.8	-1380.5	-2981.2
T	3285.4	5.2	3272.1	295.0
R	118.6	-74.2	32.3	-114.1
S	118.6	-314.2	82.6	85.0
T	118.6	165.8	-115.0	29.1
R	3228.7	-233.3	-1929.1	2589.0
S	3187.7	64.6	-1367.8	-2879.3
T	3106.0	6.3	3087.2	341.0
			-209.7	50.6

U_e= 228.2 V U_{e'}= 228.2 V
 I_e= 132.7 A I_{e'}= 133.0 A
 S_e= 90889.2 VA S_{e'}= 91059.4 VA

k_{ρS}= 0.767542 k_{ρ'}= 0.657507
 k_{ρN}= 0.83195 k_{ρs'}= 0.590606
 k_ρ= 0.638557 k_{ρ'}= 0.953191
 k_{ρ(4.14)}}= 0.764357 k_{ρm'}= 0.733768
 k_{ρ(4.39)}}= 0.528135

k₁= 0.7
 k₂= 0.1 P_f= 9522.4
 k₃= 0.2

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001

PC.MAS. C

REGIM I

k= 1.33 (R_N/R)

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	229.7	1.1	46.7	-44.34	45.4
S	227.9	-118.50	47.1	-164.40	45.9
T	227.1	120.10	46.8	75.23	44.9
N	1.47	3.70	0.4	3.7	
R	228.2	0.9	46.9	-44.5	45.4
S	228.2	-119.1	46.9	-164.5	45.4
T	228.2	120.9	46.9	75.5	45.4
R	1.1	-35.2	0.2	-266.4	231.2
S	1.1	-155.2	0.2	-386.4	231.2
T	1.1	84.8	0.2	-146.4	231.2
R	2.3	4.9	0.0	-123.0	127.9
S	2.3	4.9	0.0	-123.0	127.9
T	2.3	4.9	0.0	-123.0	127.9

	modul		faza		{Im}
	{Re}	{Im}	{Re}	{Im}	
R	0.0	-118.1	0.0	0.0	0.0
S	0.0	-118.1	0.0	0.0	0.0
T	0.0	-118.1	0.0	0.0	0.0
R	52.4	-265.5	-4.1	52.2	
S	52.4	-505.5	-43.2	-29.6	
T	52.4	-25.5	47.2	-22.6	
R	50.2	-79.7	9.0	-49.4	
S	50.2	-319.7	38.3	32.5	
T	50.2	160.3	-47.3	16.9	
R	5.6	-150.6	4.8	2.7	
S	5.6	-29.8	-4.9	2.8	
T	5.6	89.5	-0.1	-5.6	
			-0.1	-0.1	

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
7526.7	7643.2	10727.0			
7470.0	7708.4	10734.1			
7532.4	7498.3	10628.3	22529.0	22849.8	32088.5
7509.5	7616.4	10695.9			
7509.5	7616.4	10695.9			
7509.5	7616.4	10695.9	22528.6	22849.2	32087.7
-0.2	-0.2	0.2			
-0.2	-0.2	0.2			
-0.2	-0.2	0.2	-0.5	-0.6	0.7
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.1

22528.1 22848.7 32087.0

Ue= 228.2 V Ue'= 228.2 V
 Ie= 46.9 A Ie'= 46.9 A
 Se= 32091.0 VA Se'= 32088.1 VA

k_{GS}= 0.702095 k_{GT}= 0.701656
 k_{GN}= 0.999988 k_{GS}= 0.695913
 k_G= 0.702086 k_{GT}= 0.708709
 k_{G(4,14)}= 0.702069 k_{Gm}= 0.702093
 k_{G(4,39)}= 0.491457

k₁= 0.7
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2
 Pf= 16.8

: CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. D
 REGIM I
 (R/R)

k= 1.53

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	230.5	1.31	96.9	-47.79	49.1
S	223.6	-117.50	127.2	-172.30	54.8
T	223.2	119.20	120.8	102.5	16.7
N	1.48	-176.20	91.1	-18.7	
R	225.7	1.0	110.6	-39.0	40.0
S	225.7	-119.0	110.6	-159.0	40.0
T	225.7	121.0	110.6	81.0	40.0
R	1.5	-28.1	14.4	-235.7	207.6
S	1.5	-148.1	14.4	-355.7	207.6
T	1.5	91.9	14.4	-115.7	207.6
R	6.1	5.5	30.6	-198.5	204.0
S	6.1	5.5	30.6	-198.5	204.0
T	6.1	5.5	30.6	-198.5	204.0

	modul		faza		{Re}		{Im}	
R	187.6	-193.0	-182.8	42.1	-182.8	42.1		
S	187.6	-193.0	-182.8	42.1	-182.8	42.1		
T	187.6	-193.0	-182.8	42.1	-182.8	42.1		
R	3249.1	-234.7	-1875.6	2653.1	-1875.6	2653.1		
S	3249.1	-474.7	-1359.8	-2950.9	-1359.8	-2950.9		
T	3249.1	5.3	3235.4	297.8	3235.4	297.8		
R	166.8	-67.1	64.9	-153.6	64.9	-153.6		
S	166.8	-307.1	100.6	133.1	100.6	133.1		
T	166.8	172.9	-165.5	20.6	-165.5	20.6		
R	3230.1	-231.9	-1993.5	2541.5	-1993.5	2541.5		
S	3128.0	62.5	-1442.1	-2775.7	-1442.1	-2775.7		
T	2909.5	7.1	2887.1	360.4	2887.1	360.4		
					-548.5	126.3		

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
14623.9	16882.3	22335.5			
16394.8	23241.2	28441.9			
25825.3	7748.0	26962.6	56844.1	47871.5	74316.4
19138.7	16043.6	24973.7			
19138.7	16043.6	24973.7			
19138.7	16043.6	24973.7	57416.0	48130.7	74921.0
-19.2	-10.1	21.7			
-19.2	-10.1	21.7			
-19.2	-10.1	21.7	-57.7	-30.2	65.1
-171.4	-76.4	187.6			
-171.4	-76.4	187.6			
-171.4	-76.4	187.6	-514.2	-229.1	562.9

56844.1 47871.5 74316.4

Ue= 225.8 V Ue'= 225.7 V
 Ie= 132.7 A Ie'= 133.0 A
 Se= 89915.8 VA Se'= 90054.7 VA

k_{ps} = 0.766353 k_{pr} = 0.654741
 k_{pN} = 0.83195 k_{ps} = 0.576432
 k_p = 0.637568 k_{pl} = 0.957822
 $k_{p(4.14)}$ = 0.75872 $k_{p(4.39)}$ = 0.52727
 $k_{p(4.39)}$ = 0.52727 $k_{p(4.39)}$ = 0.729665

k_1 = 0.7 Pf= 9267.5
 k_2 = 0.1
 k_3 = 0.2

. CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. E
 REGIM I
 (R_N/R)
 k= 1.33

	U		I [A]	φ [°]
	[V]	[°]		
R	228.3	1.25	46.7	-44.34
S	226.5	-118.30	47.1	-164.40
T	225.7	120.20	46.8	75.23
N	1.47	3.70	0.4	3.7
R	226.8	1.1	46.9	-44.5
S	226.8	-118.9	46.9	-164.5
T	226.8	121.1	46.9	75.5
R	1.2	-32.0	0.2	-266.4
S	1.2	-152.0	0.2	-386.4
T	1.2	88.0	0.2	-146.4
R	2.5	4.8	0.0	-123.0
S	2.5	4.8	0.0	-123.0
T	2.5	4.8	0.0	-123.0

P [W]	Q [VAR]	S [VA]
7460.9	7616.1	10661.6
7397.3	7686.9	10668.2
7472.9	7465.1	10562.8
7443.6	7589.1	10630.2
7443.6	7589.1	10630.2
7443.6	7589.1	10630.2
-0.2	-0.2	0.3
-0.2	-0.2	0.3
-0.2	-0.2	0.3
0.0	0.0	0.1
0.0	0.0	0.1
0.0	0.0	0.1

ΣP ΣQ ΣS

22331.1 22768.2 31891.5

22330.7 22767.4 31890.7

-0.5 -0.6 0.8

-0.1 0.1 0.2

22330.2 22766.9 31889.9

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.1	-118.2	0.0	0.0
S	0.1	-118.2	0.0	0.0
T	0.1	-118.2	0.0	0.0
R	52.0	-265.4	-4.2	51.9
S	52.0	-505.4	-42.8	-29.6
T	52.0	-25.4	47.0	-22.3
R	54.1	-76.5	12.7	-52.6
S	54.1	-316.5	39.2	37.3
T	54.1	163.5	-51.9	15.3
R	8.5	-185.6	8.5	-0.8
S	8.5	-65.0	-3.6	7.7
T	8.6	54.8	-4.9	-7.0
			-0.1	-0.1

Ue= 226.8 V Ue'= 226.8 V
 Ie= 46.9 A Ie'= 46.9 A
 Se= 31894.2 VA Se'= 31891.1 VA

k_{os}= 0.700227 k_{or}= 0.699788
 k_{oN}= 0.999988 k_{os}= 0.693402
 k_o= 0.700219 k_{oi}= 0.707477
 k_{o(4.14)}= 0.700201 k_{oim}= 0.700222
 k_{o(4.39)}= 0.490149

k₁= 0.7 Pf= 25.5
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. F
 REGIM I
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U		I	φ [°]
	[V]	[°]		
R	230.5	1.31	50.7	-62.6
S	223.6	-117.50	81.7	175.80
T	223.2	119.20	73.9	113
N	1.48	-176.20	81.1	-18.7
R	225.7	1.0	61.2	-44.0
S	225.7	-119.0	61.2	-164.0
T	225.7	121.0	61.2	76.0
R	1.5	-28.1	14.7	-235.8
S	1.5	-148.1	14.7	-355.8
T	1.5	91.9	14.7	-115.8
R	6.1	5.5	30.6	-198.4
S	6.1	5.5	30.6	-198.4
T	6.1	5.5	30.6	-198.4

P	Q	S
[W]	[VAR]	[VA]
5139.5	10495.6	11686.4
7225.9	16778.3	18268.1
16398.0	1781.4	16494.5
9778.7	9771.5	13824.0
9778.7	9771.5	13824.0
9778.7	9771.5	13824.0
-19.6	-10.3	22.2
-19.6	-10.3	22.2
-19.6	-10.3	22.2
-171.3	-76.1	187.4
-171.3	-76.1	187.4
-171.3	-76.1	187.4

ΣP 28763.3 ΣQ 29055.2 ΣS 40884.4

	faza		{Re}		{Im}	
	modul					
R	187.4	-192.9	-182.7	41.9	41.9	
S	187.4	-192.9	-182.7	41.9	41.9	
T	187.4	-192.9	-182.7	41.9	41.9	
R	3316.6	-234.8	-1912.3	2709.8		
S	3316.6	-474.8	-1390.6	-3011.0		
T	3316.6	5.2	3302.9	301.2		
R	92.3	-72.1	28.4	-87.9		
S	92.3	-312.1	61.9	68.5		
T	92.3	167.9	-90.3	19.4		
R	3371.4	-232.2	-2066.6	2663.7		
S	3270.7	62.5	-1511.4	-2900.6		
T	3051.5	6.8	3029.9	362.4		
			-548.0	125.6		

Ue= 225.8 V Ue'= 225.7 V
 Ie= 95.6 A Ie'= 95.9 A
 Se= 64741.5 VA Se'= 64922.4 VA

k_{ps}= 0.707368 k_{pf}= 0.439782
 k_{pn}= 0.638795 k_{ps}= 0.395546
 k_p= 0.451862 k_{pf}= 0.994151
 k_{pf(1.4)}= 0.693559 k_{pfm}= 0.609826
 k_{pf(3.9)}= 0.46649
 k₁= 0.7 Pf= 9693.6
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2

· CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. G
 REGIM I
 k= 1.27 (Rw/R)

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	230.5	1.31	49.6	-32.6	33.9
S	223.6	-117.50	50.2	-152.70	35.2
T	223.2	119.20	49.9	86.78	32.4
N	1.48	-176.20	0.4	-176.3	
d	225.7	1.0	49.9	-32.8	33.8
S	225.7	-119.0	49.9	-152.8	33.8
T	225.7	121.0	49.9	87.2	33.8
i	1.5	-28.1	0.3	-247.0	218.9
S	1.5	-148.1	0.3	-367.0	218.9
T	1.5	91.9	0.3	-127.0	218.9
h	6.1	5.5	0.0	-254.8	260.4
S	6.1	5.5	0.0	-254.8	260.4
T	6.1	5.5	0.0	-254.8	260.4

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.2	-249.3	-0.1	0.1
S	0.2	-249.3	-0.1	0.1
T	0.2	-249.3	-0.1	0.1
R	76.6	-246.0	-31.1	70.0
S	76.6	-486.0	-45.1	-62.0
T	76.6	-6.0	76.2	-8.0
R	75.2	-61.0	36.5	-65.8
S	75.2	-301.0	38.7	64.5
T	75.2	179.0	-75.2	1.3
R	6.9	-140.3	5.3	4.4
S	7.0	-22.5	-6.4	2.7
T	6.7	-81.8	1.0	-6.6
			-0.2	0.4

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
9488.3	6378.2	11432.8			
9172.2	6470.3	11224.7			
9401.8	5971.1	11137.7	28062.2	18819.7	33788.6
9353.7	6273.1	11262.5			
9353.7	6273.1	11262.5	28061.1	18819.2	33787.4
-0.4	-0.3	0.5			
-0.4	-0.3	0.5			
-0.4	-0.3	0.5	-1.2	-1.0	1.5
0.0	-0.2	0.2			
0.0	-0.2	0.2			
0.0	-0.2	0.2	-0.1	-0.5	0.5

28059.9 18817.8 33785.5

Ue= 225.8 V Ue'= 225.7 V
 Ie= 49.9 A Ie'= 49.9 A
 Se= 33802.2 VA Se'= 33788.2 VA

k_{ps} = 0.83052 k_{ps} '= 0.829915
 k_{pt} = 0.999976 k_{pt} '= 0.817145
 k_p = 0.830501 k_{pt} '= 0.844141
 $k_{p(4.14)}$ = 0.830463 $k_{p(4.14)}$ '= 0.8304
 $k_{p(4.39)}$ = 0.581321

k_1 = 0.7 Pf= 20.6
 k_2 = 0.1
 k_3 = 0.2

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. H
 REGIM I
 k= 1.27 (R_N/R)

	U		I	φ [°]	
	[V]	[°]			[A]
R	229.7	1.35	49.6	-32.6	34.0
S	222.8	-117.50	50.2	-152.70	35.2
T	222.4	119.30	49.9	86.78	32.5
N	1.47	-176.30	0.4	-176.3	
R	224.9	1.1	49.9	-32.8	33.9
S	224.9	-118.9	49.9	-152.8	33.9
T	224.9	121.1	49.9	87.2	33.9
R	1.4	-30.0	0.3	-247.0	217.0
S	1.4	-150.0	0.3	-367.0	217.0
T	1.4	90.0	0.3	-127.0	217.0
R	6.0	5.5	0.0	-254.8	260.4
S	6.0	5.5	0.0	-254.8	260.4
T	6.0	5.5	0.0	-254.8	260.4

P	Q	S
[W]	[VAR]	[VA]
9450.9	6362.7	11393.1
9139.4	6447.1	11184.6
9357.7	5966.1	11097.8
9315.6	6258.5	11222.7
9315.6	6258.5	11222.7
9315.6	6258.5	11222.7
-0.4	-0.3	0.5
-0.4	-0.3	0.5
-0.4	-0.3	0.5
0.0	-0.2	0.2
0.0	-0.2	0.2
0.0	-0.2	0.2

ΣP 27945.7 ΣQ 18774.2 ΣS 33666.5

	faza		Im)
	{Re}	{Im}	
R	0.2	-249.3	-0.1
S	0.2	-249.3	-0.1
T	0.2	-249.3	-0.1
R	76.4	-246.0	-31.1
S	76.4	-486.0	-44.9
T	76.4	-6.0	76.0
R	69.5	-62.8	31.7
S	69.5	-302.8	37.7
T	69.5	177.2	-69.4
R	8.1	-94.2	0.6
S	8.0	24.2	-7.3
T	7.8	-34.0	6.5

Ue= 225.0 V Ue'= 224.9 V
 Ie= 49.9 A Ie'= 49.9 A
 Se= 33682.4 VA Se'= 33669.0 VA

k_{ps}= 0.830067 k_{pr}= 0.829525
 k_{pn}= 0.999976 k_{ps}= 0.817145
 k_p= 0.830048 k_{pr}= 0.843204
 k_{p(1.14)}= 0.830031 k_{pm}= 0.829958
 k_{p(1.39)}= 0.581005

k₁= 0.7 Pf= 23.9
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2

ANEXA 2

REGIMUL R II

- fișier PSPICE**
- fișe de calcul**

**** 04/04/101 11:09:01 ***** Evaluation PSpice (Jan 1993) *****

reg.nesimetric RII

**** CIRCUIT DESCRIPTION

```
v1 110 4 ac 240 0.0
v2 120 4 ac 240v -120
v3 130 4 ac 240v 120
rst1 111 1 0.072
rst2 122 2 0.072
rst3 133 3 0.072
lt100 110 111 0.1mh
lt200 120 122 0.1mh
lt300 130 133 0.1mh
rnp 4 0 4
```

```
lr1 100 101 0.0198mh
ls1 200 102 0.0198mh
lt1 300 103 0.0198mh
rr1 11 101 0.015
rs1 12 102 0.015
rt1 13 103 0.015
rn1 400 401 0.019
ln1 401 14 0.02mh
rp2 14 0 4
```

```
lr2 1 97 0.0375mh
ls2 2 98 0.0375mh
lt2 3 99 0.0375mh
rr2 97 100 0.0196
rs2 98 200 0.0196
rt2 99 300 0.0196
rn2 4 399 0.03
ln2 399 400 0.0396mh
rp1 400 0 4
```

```
lr3 1 27 0.0396mh
ls3 2 28 0.0396mh
lt3 3 29 0.0396mh
rr3 31 27 0.03
rs3 32 28 0.03
rt3 33 29 0.03
rn3 4 25 0.04
ln3 25 34 0.041mh
rp3 34 0 4
```

```
lcr3 31 310 0.011h
lcs3 32 320 0.011h
lct3 33 330 0.011h
rcr3 310 50 3.39
rcs3 320 50 3.39
rct3 330 50 3.39
rcp3 50 0 10k
```

```
rccr 11 4001 3.74
rccs 12 4002 3.74
rccr 13 4003 3.74
lccr 4001 40 0.008h
lccs 4002 40 0.008h
```

```
lcct 4003 40 0.008h
rccn 40 0 10k
```

```
rcor 100 5001 0.8
rcos 200 5002 2.8
rcot 300 5003 3.5
lcor 5001 400 3.5mh
lcos 5002 400 10mh
lcot 5003 400 15mh
```

```
.ac lin 1 50hz 50hz
```

```
.print ac v(1,4) vr(1,4) vi(1,4) vp(1,4)
.print ac v(2,4) vr(2,4) vi(2,4) vp(2,4)
.print ac v(3,4) vr(3,4) vi(3,4) vp(3,4)
.print ac v(100,400) vr(100,400) vi(100,400) vp(100,400)
.print ac v(200,400) vr(200,400) vi(200,400) vp(200,400)
.print ac v(300,400) vr(300,400) vi(300,400) vp(300,400)
.print ac v(4) vp(4)
.print ac v(400) vp(400)
.print ac v(14) vp(14)
.print ac v(34) vp(34)
```

```
.print ac i(lr1) ir(lr1) ii(lr1) ip(lr1)
.print ac i(ls1) ir(ls1) ii(ls1) ip(ls1)
.print ac i(lt1) ir(lt1) ii(lt1) ip(lt1)
.print ac i(ln1) ir(ln1) ii(ln1) ip(ln1)
```

```
.print ac i(lr2) ir(lr2) ii(lr2) ip(lr2)
.print ac i(ls2) ir(ls2) ii(ls2) ip(ls2)
.print ac I(lt2) ir(lt2) ii(lt2) ip(lt2)
.print ac i(ln2) ir(ln2) ii(ln2) ip(ln2)
```

```
.print ac i(lr3) ir(lr3) ii(lr3) ip(lr3)
.print ac i(ls3) ir(ls3) ii(ls3) ip(ls3)
.print ac i(lt3) ir(lt3) ii(lt3) ip(lt3)
.print ac i(ln3) ir(ln3) ii(ln3) ip(ln3)
```

```
.print ac i(rst1) ip(rst1)
.print ac i(rst2) ip(rst2)
.print ac i(rst3) ip(rst3)
.print ac i(rnp) ip(rnp)
```

```
.print ac i(rcor) ip(rcor)
.print ac i(rcos) ip(rcos)
.print ac i(rcot) ip(rcot)
```

```
.print ac v(31,34) vr(31,34) vi(31,34) vp(31,34)
.print ac v(32,34) vr(32,34) vi(32,34) vp(32,34)
.print ac v(33,34) vr(33,34) vi(33,34) vp(33,34)
```

```
.print ac v(11,14) vr(11,14) vi(11,14) vp(11,14)
.print ac v(12,14) vr(12,14) vi(12,14) vp(12,14)
.print ac v(13,14) vr(13,14) vi(13,14) vp(13,14)
```

```
.end
```

```
**** 04/04/101 11:09:01 ***** Evaluation Pspice (Jan 1993) *****
```

```
reg.nesimetric RII
```

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
```

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001

PC.MAS. A

REGIM II

k= 1.53 (R_N/R)

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	221.9	1.95	250.6	-46.11	48.1
S	228.8	-119.10	149.8	-161.40	42.3
T	230	120.90	134.6	77.26	43.6
N	1.85	144.70	114.1	122.1	
R	226.9	1.2	178.2	-43.9	45.2
S	226.9	-118.8	178.2	-163.9	45.2
T	226.9	121.2	178.2	76.1	45.2
R	2.7	-21.0	35.0	-224.6	203.6
S	2.7	-141.0	35.0	-344.6	203.6
T	2.7	99.0	35.0	-104.6	203.6
R	3.0	-33.2	38.3	-237.7	204.5
S	3.0	-33.2	38.3	-237.7	204.5
T	3.0	-33.2	38.3	-237.7	204.5

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	116.2	-270.9	1.8	116.2
S	116.2	-270.9	1.8	116.2
T	116.2	-270.9	1.8	116.2
R	7941.7	-223.3	-5777.1	5449.5
S	7941.7	-463.3	-1830.8	-7727.8
T	7941.7	16.7	7607.9	2278.4
R	482.5	-64.9	204.5	-437.0
S	482.5	-304.9	276.2	395.6
T	482.5	175.1	-480.7	41.4
R	7572.1	-222.6	-5570.8	5128.6
S	7381.2	77.9	-1552.8	-7216.0
T	7533.7	18.9	7129.0	2436.0
			5.4	348.6

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]
	37165.8	41363.8	55608.1
	25350.3	23067.0	34274.2
	22404.0	21364.9	30958.0
	28499.3	28684.6	40435.4
	28499.3	28684.6	40435.4
	28499.3	28684.6	40435.4
	-86.8	-37.9	94.8
	-86.8	-37.9	94.8
	-86.8	-37.9	94.8
	-105.8	-48.1	116.2
	-105.8	-48.1	116.2
	-105.8	-48.1	116.2
	84920.1	85795.7	120715.9
	85498.0	86053.9	121306.2
	-260.5	-113.8	284.3
	-317.4	-144.4	348.7
	84920.1	85795.7	120715.9

U_e= 226.9 V U_{e'}= 226.9 V
 I_e= 202.7 A I_{e'}= 202.9 A
 S_e= 138005.4 VA S_{e'}= 138138.0 VA

k_{GS}= 0.704812 k_{GP}= 0.668352
 k_{GN}= 0.878152 k_{GN}= 0.739631
 k_P= 0.618932 k_P= 0.72369
 k_{PR(4.14)}= 0.700048 k_{PR(4.39)}= 0.710558
 k_{PR(4.39)}= 0.485048 k_{PR(4.39)}= 0.710558

k₁= 0.7 k₂= 0.1 k₃= 0.2
 Pf= 22486.9

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. B
 REGIM II
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U		I	φ [°]	
	[V]	[°]			[A]
R	221.9	1.95	204.6	-46.6	48.6
S	228.8	-119.10	102.8	-160.30	41.2
T	230	120.90	87.9	78.38	42.5
N	1.85	144.70	114.1	122.1	
R	226.9	1.2	131.6	-43.9	45.1
S	226.9	-118.8	131.6	-163.9	45.1
T	226.9	121.2	131.6	76.1	45.1
R	2.7	-21.0	35.5	-224.9	203.9
S	2.7	-141.0	35.5	-344.9	203.9
T	2.7	99.0	35.5	-104.9	203.9
R	3.0	-33.2	38.3	-237.7	204.5
S	3.0	-33.2	38.3	-237.7	204.5
T	3.0	-33.2	38.3	-237.7	204.5

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	116.4	-270.9	1.8	116.3
S	116.4	-270.9	1.8	116.3
T	116.4	-270.9	1.8	116.3
R	8063.2	-223.6	-5835.4	5564.5
S	8063.2	-463.6	-1901.3	-7835.8
T	8063.2	16.4	7736.7	2271.3
R	356.3	-64.8	151.5	-322.5
S	356.3	-304.8	203.5	292.5
T	356.3	175.2	-355.0	30.0
R	7810.1	-223.3	-5682.1	5358.4
S	7618.2	77.1	-1696.0	-7427.0
T	7769.2	18.1	7383.5	2417.7
			5.4	349.0

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	ΣP	ΣQ	ΣS
	30053.8	34029.4	45400.7			
	17697.3	15492.8	23520.6			
	14900.8	13663.6	20217.0	62651.8	63185.6	88981.4
	21077.8	21149.1	29859.0			
	21077.8	21149.1	29859.0			
	21077.8	21149.1	29859.0	63233.4	63447.3	89576.9
	-88.0	-39.0	96.2			
	-88.0	-39.0	96.2			
	-88.0	-39.0	96.2	-263.9	-116.9	288.7
	-105.9	-48.2	116.4			
	-105.9	-48.2	116.4			
	-105.9	-48.2	116.4	-317.7	-144.6	349.1
				62651.8	63185.6	88981.4

Ue= 226.9 V Ue'= 226.9 V
 Ie= 163.4 A Ie'= 163.7 A
 Se= 111225.0 VA Se'= 111432.0 VA

k_{es}= 0.705912 k_{pr}= 0.661966
 k_{en}= 0.803871 k_{ps}= 0.752415
 k_p= 0.567462 k_{pt}= 0.737041
 k_{pr(1.4)}}= 0.699419 k_{pm}= 0.717141
 k_{pr(4.39)}}= 0.478918

k₁= 0.7 Pf= 23197.5
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. D
 REGIM II
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U		I	φ [°]
	[V]	[°]		
R	214.6	2.92	204.6	-46.6
S	226.1	-119.90	102.8	-160.30
T	231.5	121.30	87.9	78.38
N	1.85	-35.40	114.1	122.1
R	224.0	1.4	131.6	-43.9
S	224.0	-118.6	131.6	-163.9
T	224.0	121.4	131.6	76.1
R	3.6	-18.8	35.5	-224.9
S	3.6	-138.8	35.5	-344.9
T	3.6	101.2	35.5	-104.9
R	7.5	-34.3	38.3	-237.7
S	7.5	-34.3	38.3	-237.7
T	7.5	-34.3	38.3	-237.7

	faza		{Re}	{Im}
	modul			
R	288.7	-272.0	10.1	288.5
S	288.7	-272.0	10.1	288.5
T	288.7	-272.0	10.1	288.5
R	7961.2	-223.5	-5778.0	5476.9
S	7961.2	-463.5	-1854.1	-7742.3
T	7961.2	16.5	7632.1	2265.4
R	474.6	-62.6	218.1	-421.5
S	474.6	-302.6	255.9	399.6
T	474.6	177.4	-474.1	21.8
R	7704.4	-223.9	-5549.8	5343.9
S	7230.7	77.3	-1588.1	-7054.2
T	7616.9	19.8	7168.1	2575.8
			30.2	865.6

P	Q	S
[W]	[VAR]	[VA]
28503.8	33397.2	43907.2
17700.5	15064.3	23243.1
14901.6	13857.1	20348.9
20748.7	20943.7	29481.3
20748.7	20943.7	29481.3
20748.7	20943.7	29481.3
-115.1	-56.4	128.2
-115.1	-56.4	128.2
-115.1	-56.4	128.2
-265.0	-114.5	288.7
-265.0	-114.5	288.7
-265.0	-114.5	288.7

ΣP 61105.8 ΣQ 62318.6 ΣS 87278.5

Ue= 224.2 V Ue'= 224.0 V
 Ie= 163.4 A Ie'= 163.7 A
 Se= 109876.9 VA Se'= 110022.6 VA

k_{cos}= 0.703792 k_{cos}'= 0.649183
 k_{cosN}= 0.803871 k_{cos}'= 0.761538
 k_p= 0.565758 k_p'= 0.732305
 k_{p(4.14)}= 0.690898 k_{cosm}'= 0.714342
 k_{p(4.39)}= 0.477381
 k₁= 0.7
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2
 Pf= 22552.0

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF5.OUT 04/04/2001
 PC.MAS. H
 REGIM II
 k= 1.27 (R_N/R)

	U		I	φ [°]	
	[V]	[°]			[A]
R	213.8	2.97	48.8	-32.1	35.1
S	225.3	-119.90	50.2	-151.90	32.0
T	230.7	121.40	49.7	86.7	34.7
N	1.84	-35.40	0.5	-35.45	
d	223.2	1.5	49.6	-32.4	33.9
S	223.2	-118.5	49.6	-152.4	33.9
T	223.2	121.5	49.6	87.6	33.9
i	3.5	-19.2	0.8	-233.8	214.6
S	3.5	-139.2	0.8	-353.8	214.6
T	3.5	100.8	0.8	-113.8	214.6
h	7.6	-33.7	0.0	-206.2	172.5
S	7.6	-33.7	0.0	-206.2	172.5
T	7.6	-33.7	0.0	-206.2	172.5

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.2	-240.0	-0.1	0.2
S	0.2	-240.0	-0.1	0.2
T	0.2	-240.0	-0.1	0.2
R	176.0	-232.3	-107.5	139.3
S	176.0	-472.3	-68.9	-162.8
T	176.0	7.7	174.4	23.4
R	173.4	-51.6	107.7	-135.9
S	173.4	-291.6	63.8	161.2
T	173.4	188.4	-171.5	-25.3
R	3.7	-90.8	0.1	3.7
S	3.5	23.4	-3.2	-1.4
T	3.3	-30.9	2.8	-1.7
			-0.3	0.6

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]
	8539.3	5994.8	10433.4
	9591.5	5993.4	11310.1
	9426.5	6527.2	11465.8
	9183.3	6170.3	11063.7
	9183.3	6170.3	11063.7
	9183.3	6170.3	11063.7
	-2.3	-1.6	2.8
	-2.3	-1.6	2.8
	-2.3	-1.6	2.8
	-0.2	0.0	0.2
	-0.2	0.0	0.2
	-0.2	0.0	0.2

ΣP 27542.3 ΣQ 18506.2 ΣS 33182.2

Ue= 223.4 V Ue'= 223.2 V
 Ie= 49.6 A Ie'= 49.6 A
 Se= 33219.8 VA Se'= 33195.2 VA

k_{ps}= 0.830038 k_{pr}= 0.818451
 k_{pt}= 0.999873 k_{ps'}= 0.848048
 k_p= 0.829932 k_{pr'}= 0.822144
 k_{pr(14)}= 0.829812 k_{pr'}= 0.829548
 k_{pr(39)}= 0.580931

k₁= 0.7 Pf= 10.4
 k₂= 0.1
 k₃= 0.2

ANEXA 3

REGIM NESIMETRIC ȘI NESINUSOIDAL

**** 04/06/101 10:49:20 ***** Evaluation PSpice (Jan 1993) *****

reg.nesimetric nesinusoidal

**** CIRCUIT DESCRIPTION

```
v1 110 4 sin(0v 239.40v 50hz 0 0 0.0)
v2 120 4 sin(0v 239.40v 50hz 0 0 -120)
v3 130 4 sin(0v 239.40v 50hz 0 0 120)
rst1 111 1 0.072
rst2 122 2 0.072
rst3 133 3 0.072
lt100 110 111 0.1mh
lt200 120 122 0.1mh
lt300 130 133 0.1mh
rnp 4 0 4
```

```
lr1 100 101 0.0198mh
ls1 200 102 0.0198mh
lt1 300 103 0.0198mh
rr1 11 101 0.015
rs1 12 102 0.015
rt1 13 103 0.015
rn1 400 401 0.019
ln1 401 14 0.02mh
rp2 14 0 4
```

```
lr2 1 97 0.0375mh
ls2 2 98 0.0375mh
lt2 3 99 0.0375mh
rr2 97 100 0.0196
rs2 98 200 0.0196
rt2 99 300 0.0196
rn2 4 399 0.03
ln2 399 400 0.0396mh
rp1 400 0 4
```

```
lr3 1 27 0.0396mh
ls3 2 28 0.0396mh
lt3 3 29 0.0396mh
rr3 31 27 0.03
rs3 32 28 0.03
rt3 33 29 0.03
rn3 4 25 0.04
ln3 25 34 0.041mh
rp3 34 0 4
```

```
lcr3 31 310 0.011h
lcs3 32 320 0.011h
lct3 33 330 0.011h
rcr3 310 50 3.39
rcs3 320 50 3.39
rct3 330 50 3.39
rcp3 50 0 10k
```

```
rcor 100 5001 0.8
rcos 200 5002 2.8
rcot 300 5003 3.5
lcor 5001 400 3.5mh
lcos 5002 400 10mh
```

lcot 5003 400 15mh

d11 11 8888 dint
d13 12 8888 dint
d15 13 8888 dint
d12 9999 11 dint
d14 9999 12 dint
d16 9999 13 dint
rc11 8888 8800 4
lc11 8800 9999 1mh

```
.model dint d
.ac lin 25 50hz 1250hz
.tran 0.05us 50ms
.four 50hz 7 i(lr1),i(ls1),i(lt1),i(ln1),v(11,14),v(12,14),v(13,14),v(14),
+v(100,400),v(200,400),v(300,400),v(400),i(rcor),i(rcos),i(rcot),i(lr2),i(ls2),i(
lt2),i(ln2),v(1,4),v(2,4),v(3,4),v(4)
.probe
.options acct reltol=0.1
.end
```

**** 04/06/101 10:49:20 ***** Evaluation PSpice (Jan 1993) *****

reg.nesimetric nesinusoidal

**** Diode MODEL PARAMETERS

IS dint
 10.000000E-15

**** 04/06/101 10:49:20 ***** Evaluation PSpice (Jan 1993) *****

reg.nesimetric nesinusoidal

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	0.0000	(2)	0.0000	(3)	0.0000	(4)	0.0000
(11)	0.0000	(12)	0.0000	(13)	0.0000	(14)	0.0000
(25)	0.0000	(27)	0.0000	(28)	0.0000	(29)	0.0000
(31)	0.0000	(32)	0.0000	(33)	0.0000	(34)	0.0000
(50)	0.0000	(97)	0.0000	(98)	0.0000	(99)	0.0000

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. B
 FUNDAMENTALA
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U)			φ [°]
	[V]	[°]	[A]	
R	218	-178.7	226.0	146.7
S	223.6	60.08	134.6	42.24
T	224.7	-59.64	125.0	-74.69
N	1.78	-36.19	108.9	-59.35
R	222.1	0.6	160.1	-24.2
S	222.1	-119.4	160.1	-144.2
T	222.1	120.6	160.1	95.8
R	2.0	-30.8	36.3	-228.3
S	2.0	-150.8	36.3	-348.3
T	2.0	89.2	36.3	-108.3
R	2.9	-35.1	36.5	-239.1
S	2.9	-35.1	36.5	-239.1
T	2.9	-35.1	36.5	-239.1

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	106.5	-274.2	7.8	106.2
S	106.5	-274.2	7.8	106.2
T	106.5	-274.2	7.8	106.2
R	8067.4	-227.8	-5423.4	5972.4
S	8067.4	-467.8	-2460.5	-7683.0
T	8067.4	12.2	7883.9	1710.6
R	326.3	-55.0	187.0	-267.4
S	326.3	-295.0	138.1	295.7
T	326.3	185.0	-325.1	-28.2
R	7817.1	-228.0	-5228.5	5811.2
S	7640.2	72.4	-2314.6	-7281.1
T	7775.2	13.3	7566.7	1788.5
			23.5	318.6

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
40554.3	27976.5	49268.0			
28649.4	9220.4	30096.6			
27124.1	7293.3	28087.5	96327.8	44490.2	106105.7
32277.2	14895.6	35548.5			
32277.2	14895.6	35548.5	96831.5	44686.8	106645.4
-70.6	-22.3	74.1			
-70.6	-22.3	74.1			
-70.6	-22.3	74.1	-211.9	-66.8	222.2
-97.3	-43.3	106.5			
-97.3	-43.3	106.5			
-97.3	-43.3	106.5	-291.8	-129.9	319.4
			96327.8	44490.2	106105.7

Ue= 222.1 V
 Ie= 185.3 A
 Se= 123433.0 VA

Pf= 23232.4

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. B
 ARMONICA 3
 k= 1.53 (Rn/R)

	U			φ [°]
	[V]	[°]	[A]	
R	1.69	60.95	2.6	102.9
S	0.54	-175.20	4.4	-8.93
T	1.52	-101.60	4.0	-156.3
N	0.02	-118.30	0.2	-118.5
R	0.7	-89.8	3.6	-80.8
S	0.7	-209.8	3.6	-200.8
T	0.7	30.2	3.6	39.2
R	1.2	44.5	1.1	-92.1
S	1.2	-75.5	1.1	-212.1
T	1.2	164.5	1.1	27.9
R	0.0	67.8	0.1	-113.0
S	0.0	67.8	0.1	-113.0
T	0.0	67.8	0.1	-113.0

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-45.2	0.0	0.0
S	0.0	-45.2	0.0	0.0
T	0.0	-45.2	0.0	0.0
R	0.7	-181.9	-0.7	0.0
S	0.7	-421.9	0.3	-0.7
T	0.7	58.1	0.4	0.6
R	4.2	-36.3	3.4	-2.5
S	4.2	-276.3	0.5	4.1
T	4.2	203.7	-3.8	-1.7
R	3.6	-223.0	2.6	-2.4
S	3.6	77.0	0.8	3.5
T	3.6	17.0	-3.4	-1.0
			0.0	0.0

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	ΣP	ΣQ	ΣS
	3.3	-2.9	4.4			
	-2.3	-0.6	2.4			
	3.5	5.0	6.1	4.5	1.5	4.7
	2.4	-0.4	2.4			
	2.4	-0.4	2.4			
	2.4	-0.4	2.4	7.2	-1.1	7.3
	-0.9	0.9	1.3			
	-0.9	0.9	1.3			
	-0.9	0.9	1.3	-2.8	2.6	3.6
	0.0	0.0	0.0			
	0.0	0.0	0.0			
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
				4.5	1.5	4.7

Ue= 0.7 V
 Ie= 3.7 A
 Se= 7.7 VA

Pf= 10.8

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. B
 ARMONICA 5
 k= 1.53 (R_N/R)

	U		I	φ [°]
	[V]	[°]		
R	4.41	-116.2	16.1	-13.45
S	4.62	-15.98	18.0	111.10
T	5.88	114.60	16.0	-126.5
N	0.02	62.70	0.4	-22.32
R	0.9	-0.6	1.2	56.7
S	0.9	-120.6	1.2	-63.3
T	0.9	119.4	1.2	176.7
R	4.9	54.0	16.7	-189.6
S	4.9	-66.0	16.7	-309.6
T	4.9	174.0	16.7	-69.6
R	0.0	68.3	0.1	-208.9
S	0.0	68.3	0.1	-208.9
T	0.0	68.3	0.1	-208.9

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
-15.7	-69.3	71.0			
-50.1	-66.3	83.2			
-45.5	-82.4	94.1	-111.3	-216.0	244.7
0.6	-1.0	1.1			
0.6	-1.0	1.1			
0.6	-1.0	1.1	1.9	-2.9	3.4
-36.5	-73.6	82.1			
-36.5	-73.6	82.1			
-36.5	-73.6	82.1	-109.4	-220.6	246.4
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			-107.6	-223.7	248.2

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-140.5	0.0	0.0
S	0.0	-140.5	0.0	0.0
T	0.0	-140.5	0.0	0.0
R	15.5	-190.2	-15.3	2.7
S	15.5	-430.2	5.3	-14.6
T	15.5	49.8	10.0	11.8
R	6.1	110.7	-2.1	5.7
S	6.1	-129.3	-3.8	-4.7
T	6.1	350.7	6.0	-1.0
R	19.3	-205.7	-17.4	8.4
S	19.3	-85.8	1.4	-19.3
T	19.3	34.2	16.0	10.9
			0.0	0.0

Ue= 0.9 V
 Ie= 16.7 A
 Se= 46.6 VA

Pf= 58.0

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. B
 ARMONICA 7
 k= 1.53 (Rw/R)

	U		I	φ [°]
	[V]	[°]		
R	4.7	-167	7.6	-29.33
S	1.78	112.90	4.1	-98.95
T	5.45	-5.98	10.0	128
N	0.03	4.82	0.3	-43.4
R	3.7	37.9	6.8	-2.4
S	3.7	-82.1	6.8	-122.4
T	3.7	157.9	6.8	117.6
R	2.1	-36.3	3.5	-91.7
S	2.1	-156.3	3.5	-211.7
T	2.1	83.7	3.5	28.3
R	0.0	5.6	0.1	-212.4
S	0.0	5.6	0.1	-212.4
T	0.0	5.6	0.1	-212.4

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
-26.4	-24.1	35.7			
-6.2	-3.9	7.3			
-37.8	-39.2	54.5	-70.5	-67.1	97.3
19.4	16.4	25.4			
19.4	16.4	25.4			
19.4	16.4	25.4	58.1	49.3	76.2
4.1	6.0	7.2			
4.1	6.0	7.2			
4.1	6.0	7.2	12.3	17.9	21.7
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			70.4	67.1	97.3

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-206.8	0.0	0.0
S	0.0	-206.8	0.0	0.0
T	0.0	-206.8	0.0	0.0
R	13.0	-53.8	7.7	-10.5
S	13.0	-293.8	5.2	11.9
T	13.0	186.2	-12.9	-1.4
R	14.1	-38.7	11.0	-8.8
S	14.1	-278.7	2.2	14.0
T	14.1	201.3	-13.2	-5.1
R	26.9	-226.0	18.7	-19.3
S	26.9	74.0	7.4	25.9
T	26.9	14.0	-26.1	-6.5
			0.0	0.0

Ue= 3.7 V
 Ie= 7.6 A
 Se= 85.6 VA

Pf= 80.7

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. D
 D FUNDAMENTALA
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U		I	φ [°]	
	[V]	[°]			
R	210.6	-178	226.0	146.7	-324.7
S	220.2	58.97	134.6	42.24	16.7
T	225.3	-59.33	125.0	-74.69	15.4
N	178	143.80	108.9	-59.35	
R	218.6	0.5	160.1	-24.2	24.7
S	218.6	-119.5	160.1	-144.2	24.7
T	218.6	120.5	160.1	95.8	24.7
R	2.5	-28.7	36.3	-228.3	199.7
S	2.5	-148.7	36.3	-348.3	199.7
T	2.5	91.3	36.3	-108.3	199.7
R	7.3	-34.7	36.5	-239.1	204.4
S	7.3	-34.7	36.5	-239.1	204.4
T	7.3	-34.7	36.5	-239.1	204.4

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	266.0	-273.8	17.7	265.4
S	266.0	-273.8	17.7	265.4
T	266.0	-273.8	17.7	265.4
R	7942.3	-227.8	-5334.5	5884.2
S	7942.3	-467.8	-2428.7	-7561.9
T	7942.3	12.2	7763.1	1677.7
R	397.9	-52.9	240.2	-317.2
S	397.9	-292.9	154.6	366.6
T	397.9	187.1	-394.8	-49.4
R	7732.3	-229.0	-5076.5	5832.4
S	7288.0	72.0	-2256.3	-6929.9
T	7625.0	14.4	7386.1	1893.6
			53.2	796.1

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	ΣP	ΣQ	ΣS
R	38844.6	27503.5	47595.6			
S	28384.4	8531.9	29638.9			
T	27156.6	7459.8	28162.5	94385.5	43495.2	103925.2
N	31789.1	14638.6	34997.6			
R	31789.1	14638.6	34997.6			
S	31789.1	14638.6	34997.6	95367.2	43915.8	104992.9
T	-85.0	-30.4	90.3			
R	-85.0	-30.4	90.3			
S	-85.0	-30.4	90.3	-255.1	-91.2	270.9
T	-242.2	-109.8	266.0			
R	-242.2	-109.8	266.0			
S	-242.2	-109.8	266.0	-726.7	-329.5	797.9
T						
				94385.5	43495.2	103925.2

Ue= 218.6 V
 Ie= 185.3 A
 Se= 121520.4 VA

Pf= 22645.2

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. D
 ARMONICA 3
 k= 1.53 (Rv/R)

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	2.32	61.26	2.6	102.9	-41.6
S	0.74	-168.60	4.4	-8.93	-159.7
T	2.07	-102.90	4.0	-156.3	53.4
N	0.02	61.45	0.2	-118.5	
R	1.0	88.2	3.6	-80.8	169.0
S	1.0	-31.8	3.6	-200.8	169.0
T	1.0	208.2	3.6	39.2	169.0
R	1.6	45.1	1.1	-92.1	137.3
S	1.6	-74.9	1.1	-212.1	137.3
T	1.6	165.1	1.1	27.9	137.3
R	0.0	61.0	0.1	-120.2	181.2
S	0.0	61.0	0.1	-120.2	181.2
T	0.0	61.0	0.1	-120.2	181.2

	faza		modul	
	{Re}	{Im}	{Re}	{Im}
R	0.0	-59.3	0.0	0.0
S	0.0	-59.3	0.0	0.0
T	0.0	-59.3	0.0	0.0
R	1.1	-3.9	1.0	-0.1
S	1.1	-243.9	-0.5	0.9
T	1.1	236.1	-0.6	-0.9
R	5.6	-35.7	4.5	-3.3
S	5.6	-275.7	0.6	5.6
T	5.6	204.3	-5.1	-2.3
R	6.5	-210.8	5.6	-3.3
S	6.5	89.2	0.1	6.5
T	6.5	29.3	-5.7	-3.2
			0.0	0.0

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
4.4	-3.9	5.9			
-3.0	-1.1	3.2			
4.9	6.6	8.2	6.3	1.5	6.5
-3.4	0.7	3.4			
-3.4	0.7	3.4			
-3.4	0.7	3.4	-10.1	2.0	10.3
-1.3	1.2	1.7			
-1.3	1.2	1.7			
-1.3	1.2	1.7	-3.8	3.5	5.2
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			-13.9	5.5	14.9

Ue= 1.0 V
 Ie= 3.7 A
 Se= 10.8 VA

Pf= 19.5

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. D
 ARMONICA 5
 k= 1.53 (Rw/R)

	U		I	φ [°]	
	[V]	[°]			[A]
R	6	-115.1	16.1	-13.45	-101.7
S	6.33	-15.07	18.0	111.10	-126.2
T	8.12	114.90	16.0	-126.5	241.4
N	0.02	-117.80	0.4	-22.32	
R	1.3	-0.6	1.2	56.0	-56.6
S	1.3	-120.6	1.2	-64.0	-56.6
T	1.3	119.4	1.2	176.0	-56.6
R	6.8	54.7	16.7	-189.6	244.3
S	6.8	-65.3	16.7	-309.6	244.3
T	6.8	174.7	16.7	-69.6	244.3
R	0.1	62.6	0.1	-201.0	263.6
S	0.1	62.6	0.1	-201.0	263.6
T	0.1	62.6	0.1	-201.0	263.6

	faza		{Re}		{Im}	
	modul					
R	0.0	-138.4	0.0	0.0	0.0	0.0
S	0.0	-138.4	0.0	0.0	0.0	0.0
T	0.0	-138.4	0.0	0.0	0.0	0.0
R	21.7	-190.2	-21.4	3.8		
S	21.7	-430.2	7.4	-20.4		
T	21.7	49.8	14.0	16.6		
R	8.2	110.8	-2.9	7.7		
S	8.2	-129.2	-5.2	-6.4		
T	8.2	350.8	8.1	-1.3		
R	26.9	-205.3	-24.3	11.5		
S	26.9	-85.4	2.2	-26.8		
T	26.9	34.7	22.1	15.3		
			0.0	0.0		

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VA]	[VA]			
-19.5	-94.4	96.4			
-67.1	-91.8	113.7			
-62.3	-114.2	130.1	-148.8	-300.4	335.3
0.9	-1.3	1.6			
0.9	-1.3	1.6			
0.9	-1.3	1.6	2.6	-4.0	4.8
-48.7	-101.4	112.5			
-48.7	-101.4	112.5			
-48.7	-101.4	112.5	-146.2	-304.3	337.6
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			-143.6	-308.4	340.2

Ue= 1.3 V
 Ie= 16.7 A
 Se= 65.4 VA

Pf= 80.7

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. D
 ARMONICA 7
 k= 1.53 (R_N/R)

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	6.4	-166.7	7.6	-29.33	-137.4
S	2.36	112.30	4.1	-98.95	211.3
T	7.51	-5.13	10.0	128	-133.1
N	0.03	-175.60	0.3	-43.4	
R	5.1	38.3	6.8	-2.4	40.7
S	5.1	-81.7	6.8	-122.4	40.7
T	5.1	158.3	6.8	117.6	40.7
R	2.9	-35.5	3.5	-91.7	56.2
S	2.9	-155.5	3.5	-211.7	56.2
T	2.9	84.5	3.5	28.3	56.2
R	0.1	6.4	0.1	-222.4	228.7
S	0.1	6.4	0.1	-222.4	228.7
T	0.1	6.4	0.1	-222.4	228.7

	faza		{Re}		{Im}	
	modul					
R	0.0	-216.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S	0.0	-216.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T	0.0	-216.0	0.0	0.0	0.0	0.0
R	17.7	-53.4	10.6	-14.2		
S	17.7	-293.4	7.0	16.3		
T	17.7	186.6	-17.6	-2.1		
R	19.5	-37.9	15.4	-12.0		
S	19.5	-277.9	2.7	19.3		
T	19.5	202.1	-18.1	-7.3		
R	36.9	-225.3	26.0	-26.2		
S	36.9	74.8	9.7	35.6		
T	36.9	14.7	-35.7	-9.4		
			0.0	0.0		

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
-35.6	-32.8	48.4			
-8.2	-5.0	9.6			
-51.4	-54.9	75.2	-95.2	-92.6	132.8
26.1	22.5	34.5			
26.1	22.5	34.5			
26.1	22.5	34.5	78.4	67.5	103.5
5.6	8.3	10.0			
5.6	8.3	10.0			
5.6	8.3	10.0	16.8	25.0	30.1
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			95.1	92.5	132.7

Ue= 5.1 V
 Ie= 7.6 A
 Se= 116.4 VA

Pf= 110.8

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/08/2001
 PC.MAS. F
 FUNDAMENTALA
 k= 1.53 (R_N/R)

	U		i	φ [°]
	[V]	[°]		
R	210.6	-178	150.8	127.5
S	220.2	58.97	51.6	9.87
T	225.3	-59.33	37.4	-113.9
N	178	143.80	108.9	-59.35
R	218.6	0.5	79.9	-52.2
S	218.6	-119.5	79.9	-172.2
T	218.5	120.5	79.9	67.8
R	2.5	-28.7	34.8	-226.1
S	2.5	-148.7	34.8	-346.1
T	2.5	91.3	34.8	-106.1
R	7.3	-34.7	36.6	-239.2
S	7.3	-34.7	36.6	-239.2
T	7.3	-34.7	36.6	-239.2

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
18442.2	25855.1	31758.5			
7437.9	8586.6	11360.1			
4888.7	6871.4	8433.0	30768.8	41313.1	51512.0
10581.1	13907.4	17475.0			
10581.1	13907.4	17475.0			
10581.1	13907.4	17475.0	31743.4	41722.2	52425.1
-82.5	-25.9	86.4			
-82.5	-25.9	86.4			
-82.5	-25.9	86.4	-247.4	-77.7	259.3
-242.4	-110.5	266.4			
-242.4	-110.5	266.4			
-242.4	-110.5	266.4	-727.2	-331.5	799.2
			30768.8	41313.1	51512.0

	faza		{Re}	{Im}
	modul			
R	266.4	-273.9	18.3	265.8
S	266.4	-273.9	18.3	265.8
T	266.4	-273.9	18.3	265.8
R	7603.7	-225.6	-5322.3	5430.4
S	7603.7	-465.6	-2041.7	-7324.5
T	7603.7	14.4	7364.1	1894.1
R	198.7	-80.9	31.5	-196.2
S	198.7	-320.9	154.1	125.4
T	198.7	159.1	-185.6	70.8
R	7619.1	-226.2	-5272.5	5500.0
S	7180.9	74.9	-1869.3	-6933.4
T	7534.5	17.2	7196.7	2230.6
			54.9	797.3

Ue= 218.6 V
 Ie= 122.4 A
 Se= 80290.3 VA

Pf= 22334.5

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. F
 ARMONICA 3
 k= 1.53 (Rn/R)

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	2.32	61.26	2.6	102.9	-41.6
S	0.74	-168.60	4.4	-8.90	-159.7
T	2.07	-102.90	4.0	-156.3	53.4
N	0.02	61.45	0.2	-118.5	
R	1.0	88.2	3.6	-80.8	169.0
S	1.0	-31.8	3.6	-200.8	169.0
T	1.0	208.2	3.6	39.2	169.0
R	1.6	45.1	1.1	-92.0	137.2
S	1.6	-74.9	1.1	-212.0	137.2
T	1.6	165.1	1.1	28.0	137.2
R	0.0	61.0	0.1	-119.3	180.3
S	0.0	61.0	0.1	-119.3	180.3
T	0.0	61.0	0.1	-119.3	180.3

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]
	4.4	-3.9	5.9
	-3.0	-1.1	3.2
	4.9	6.6	8.2
	-3.4	0.7	3.4
	-3.4	0.7	3.4
	-3.4	0.7	3.4
	-1.3	1.2	1.7
	-1.3	1.2	1.7
	-1.3	1.2	1.7
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	-13.9	5.5	14.9

ΣP ΣQ ΣS

Ue= 1.0 V
 Ie= 3.7 A
 Se= 10.8 VA

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-58.4	0.0	0.0
S	0.0	-58.4	0.0	0.0
T	0.0	-58.4	0.0	0.0
R	1.1	-3.8	1.1	-0.1
S	1.1	-243.8	-0.5	0.9
T	1.1	236.2	-0.6	-0.9
R	5.6	-35.6	4.5	-3.3
S	5.6	-275.6	0.6	5.6
T	5.6	204.4	-5.1	-2.3
R	6.5	-210.8	5.6	-3.3
S	6.5	89.2	0.1	6.5
T	6.5	29.3	-5.7	-3.2
			0.0	0.0

Pf= 19.5

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. F
 ARMONICA 5
 k= 1.53 (R_N/R)

	U		I	φ [°]
	[V]	[°]		
R	6	-115.1	0.6	150.6
S	6.33	-15.07	0.2	-84.47
T	8.12	114.90	0.2	36.6
N	0.02	-117.80	0.4	-22.32
R	1.3	-0.6	0.1	-43.2
S	1.3	-120.6	0.1	-163.2
T	1.3	119.4	0.1	76.8
R	6.8	54.7	0.3	-207.3
S	6.8	-65.3	0.3	-327.3
T	6.8	174.7	0.3	-87.3
R	0.1	62.6	0.1	-200.5
S	0.1	62.6	0.1	-200.5
T	0.1	62.6	0.1	-200.5

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
-0.3	3.5	3.5			
0.5	1.4	1.5			
0.2	1.2	1.2	0.5	6.1	6.1
0.1	0.1	0.2			
0.1	0.1	0.2			
0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5
-0.3	-2.2	2.2			
-0.3	-2.2	2.2			
-0.3	-2.2	2.2	-0.9	-6.5	6.5
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			-0.5	-6.2	6.2

	faza		modul	
	{Re}	{Im}	{Re}	{Im}
R	0.0	-137.9	0.0	0.0
S	0.0	-137.9	0.0	0.0
T	0.0	-137.9	0.0	0.0
R	0.4	-207.8	-0.4	0.2
S	0.4	-447.8	0.0	-0.4
T	0.4	32.2	0.4	0.2
R	0.9	11.5	0.9	0.2
S	0.9	-228.5	-0.6	0.7
T	0.9	251.5	-0.3	-0.9
R	0.6	-143.8	0.5	0.4
S	0.6	-22.6	-0.6	0.2
T	0.6	-84.7	0.1	-0.6
			0.0	0.0

Ue= 1.3 V
 Ie= 0.5 A
 Se= 1.8 VA

Pf= 1.9

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. F
 ARMONICA 7
 (R_N/R)
 k= 1.53

	U		I	φ [°]
	[V]	[°]		
R	6.4	-168.7	0.3	143.7
S	2.36	112.30	0.1	83.86
T	7.51	-5.13	0.1	-60.69
N	0.03	-175.60	0.3	-43.4
R	5.1	38.3	0.2	-20.0
S	5.1	-81.7	0.2	-140.0
T	5.1	158.3	0.2	100.0
R	2.9	-35.5	0.1	-240.1
S	2.9	-155.5	0.1	-360.1
T	2.9	84.5	0.1	-120.1
R	0.1	6.4	0.1	-220.4
S	0.1	6.4	0.1	-220.4
T	0.1	6.4	0.1	-220.4

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-214.1	0.0	0.0
S	0.0	-214.1	0.0	0.0
T	0.0	-214.1	0.0	0.0
R	0.5	-201.7	-0.5	0.2
S	0.5	-441.7	0.1	-0.5
T	0.5	38.3	0.4	0.3
R	0.5	-55.5	0.3	-0.4
S	0.5	-295.5	0.2	0.4
T	0.5	184.5	-0.5	0.0
R	0.3	-135.7	-0.2	-0.2
S	0.3	-12.8	0.3	-0.1
T	0.3	-72.3	-0.1	0.3
			0.0	0.0

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
1.4	1.7	2.2			
0.2	0.1	0.2			
0.5	0.7	0.9	2.1	2.5	3.2
0.4	0.7	0.8			
0.4	0.7	0.8			
0.4	0.7	0.8	1.3	2.2	2.5
-0.3	-0.1	0.3			
-0.3	-0.1	0.3			
-0.3	-0.1	0.3	-0.6	-0.4	0.9
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0			

0.5 1.8 1.9

Ue= 5.1 V
 Ie= 0.3 A
 Se= 4.3 VA

Pf= 0.9

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. H
 FUNDAMENTALA
 k= 1.27 (R_{N/R})

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	209.4	-178.1	97.1	177.2	-355.3
S	218.8	58.82	95.1	59.12	-0.3
T	223.8	-59.39	98.8	-60.85	1.5
N	1.773	143.70	0.4	143.7	
R	217.3	0.4	97.0	-1.5	1.9
S	217.3	-119.6	97.0	-121.5	1.9
T	217.3	120.4	97.0	118.5	1.9
R	2.3	-31.2	2.2	-90.1	58.9
S	2.3	-151.2	2.2	-210.1	58.9
T	2.3	88.8	2.2	29.9	58.9
R	7.3	-34.6	0.0	-90.2	55.6
S	7.3	-34.6	0.0	-90.2	55.6
T	7.3	-34.6	0.0	-90.2	55.6

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
20256.0	1665.3	20324.4			
20807.6	-108.9	20807.9			
22108.7	563.5	22115.9	63172.4	2119.9	63207.9
21060.2	711.1	21072.2			
21060.2	711.1	21072.2			
21060.2	711.1	21072.2	63180.5	2133.3	63216.5
2.6	4.4	5.1			
2.6	4.4	5.1			
2.6	4.4	5.1	7.9	13.1	15.2
0.1	0.1	0.1			
0.1	0.1	0.1			
0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
			63188.6	2146.7	63225.0

	faza		modul	
	{Re}	{Im}	{Re}	{Im}
R	0.1	-124.7	-0.1	-0.1
S	0.1	-124.7	-0.1	-0.1
T	0.1	-124.7	-0.1	-0.1
R	470.8	-89.7	2.8	-470.8
S	470.8	-329.7	406.3	237.8
T	470.8	150.3	-409.1	233.0
R	227.5	-32.7	191.4	-122.9
S	227.5	-272.7	10.7	227.2
T	227.5	207.3	-202.2	-104.3
R	624.7	-251.9	194.1	-593.8
S	624.5	48.1	417.0	464.9
T	624.7	-11.9	-611.3	128.5
			-0.2	-0.3

Ue= 217.3 V
 Ie= 97.0 A
 Se= 63232.5 VA

Pf= 1874.0

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. H
 ARMONICA 3
 k= 1.27 (R_N/R)

	U		I		φ[°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	2.679	61.19	2.3	109.2	-48.0
S	0.859	-167.50	4.5	-7.87	-159.6
T	2.353	-102.80	4.0	-156.9	54.1
N	0.01	60.86	0.0	60.86	
R	1.1	87.5	3.5	-79.2	166.7
S	1.1	-32.5	3.5	-199.2	166.7
T	1.1	207.5	3.5	40.8	166.7
R	1.8	45.5	1.3	-94.9	140.3
S	1.8	-74.5	1.3	-214.9	140.3
T	1.8	165.5	1.3	25.1	140.3
R	0.0	62.6	0.0	-134.6	197.2
S	0.0	62.6	0.0	-134.6	197.2
T	0.0	62.6	0.0	-134.6	197.2

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-72.0	0.0	0.0
S	0.0	-72.0	0.0	0.0
T	0.0	-72.0	0.0	0.0
R	1.4	-7.4	1.4	-0.2
S	1.4	-247.4	-0.5	1.3
T	1.4	232.6	-0.8	-1.1
R	6.3	-33.7	5.3	-3.5
S	6.3	-273.7	0.4	6.3
T	6.3	206.3	-5.7	-2.8
R	7.6	-209.0	6.6	-3.7
S	7.6	-89.0	-0.1	7.6
T	7.6	31.0	-6.5	-3.9
			0.0	0.0

P	Q	S	ΣP	ΣQ	ΣS
[W]	[VAR]	[VA]			
4.2	-4.6	6.2			
-3.6	-1.3	3.9			
5.5	7.6	9.4	6.1	1.7	6.3
-3.8	0.9	3.9			
-3.8	0.9	3.9			
-3.8	0.9	3.9	-11.3	2.7	11.6
-1.7	1.4	2.3			
-1.7	1.4	2.3			
-1.7	1.4	2.3	-5.2	4.3	6.8
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			-16.5	7.0	18.0

Ue= 1.1 V
 Ie= 3.7 A
 Se= 12.3 VA

Pf= 22.8

	U		I		φ [°]
	[V]	[°]	[A]	[°]	
R	6.921	-115.4	16.6	-14.01	-101.4
S	7.28	-15.51	18.2	110.90	-126.4
T	9.34	114.70	16.2	-126.7	241.4
N	0.02	-118.90	0.0	-118.9	
R	1.5	-0.8	1.2	62.4	-63.2
S	1.5	-120.8	1.2	-57.6	-63.2
T	1.5	119.2	1.2	182.4	-63.2
R	7.8	54.5	17.0	-189.9	244.4
S	7.8	-65.5	17.0	-309.9	244.4
T	7.8	174.5	17.0	-69.9	244.4
R	0.1	63.4	0.0	-180.5	244.0
S	0.1	63.4	0.0	-180.5	244.0
T	0.1	63.4	0.0	-180.5	244.0

	faza		modul	
	{Re}	{Im}		
R	0.0	-117.1	0.0	0.0
S	0.0	-117.1	0.0	0.0
T	0.0	-117.1	0.0	0.0
R	25.5	-190.8	-25.1	4.8
S	25.5	-430.8	8.4	-24.1
T	25.5	49.2	16.7	19.3
R	9.6	116.8	-4.3	8.6
S	9.6	-123.2	-5.3	-8.1
T	9.6	356.8	9.6	-0.5
R	32.3	-204.4	-29.4	13.4
S	32.3	-84.4	3.1	-32.2
T	32.3	35.6	26.3	18.8

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	ΣP	ΣQ	ΣS
R	-22.7	-112.9	115.2			
S	-78.6	-106.6	132.4			
T	-72.3	-132.6	151.0			
N	0.8	-1.7	1.9	-173.6	-352.1	392.6
R	0.8	-1.7	1.9			
S	0.8	-1.7	1.9	2.5	-5.0	5.6
T	-57.0	-119.0	132.0			
R	-57.0	-119.0	132.0			
S	-57.0	-119.0	132.0	-171.1	-357.1	395.9
T	0.0	0.0	0.0			
R	0.0	0.0	0.0			
S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T	0.0	0.0	0.0			
N				-168.6	-362.0	399.4

$U_e = 1.5 \text{ V}$
 $I_e = 17.0 \text{ A}$
 $S_e = 76.8 \text{ VA}$

Pf= 97.0

CALCULUL PUTERILOR

FISIER: DEF6.OUT 04/06/2001
 PC.MAS. H
 ARMONICA 7
 k= 1.27 (R_N/R)

	U			I	φ [°]
	[V]	[°]	[A]		
R	7.37	-166.8	7.9	-29.63	-137.2
S	2.7	112.50	4.1	-98.90	211.4
T	8.6	-5.12	10.1	127.9	-133.0
N	0.02	-176.30	0.0	-176.3	
d	5.8	38.3	6.9	-2.8	41.1
S	5.8	-81.7	6.9	-122.8	41.1
T	5.8	158.3	6.9	117.2	41.1
R	3.3	-35.4	3.6	-90.9	55.5
S	3.3	-155.4	3.6	-210.9	55.5
T	3.3	84.6	3.6	29.1	55.5
R	0.1	7.0	0.0	-246.2	253.3
S	0.1	7.0	0.0	-246.2	253.3
T	0.1	7.0	0.0	-246.2	253.3

	modul	faza	{Re}	{Im}
R	0.0	-239.2	0.0	0.0
S	0.0	-239.2	0.0	0.0
T	0.0	-239.2	0.0	0.0
R	20.9	-52.6	12.7	-16.6
S	20.9	-292.6	8.0	19.2
T	20.9	187.4	-20.7	-2.7
R	23.0	-38.2	18.1	-14.2
S	23.0	-278.2	3.3	22.8
T	23.0	201.8	-21.4	-8.5
R	43.5	-225.1	30.7	-30.8
S	43.5	74.9	11.3	42.0
T	43.5	14.9	-42.0	-11.2
			0.0	0.0

	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	ΣP	ΣQ	ΣS
	-42.7	-39.6	58.2			
	-9.5	-5.8	11.2			
	-59.5	-63.8	87.2	-111.7	-109.2	156.2
	30.5	26.6	40.5			
	30.5	26.6	40.5			
	30.5	26.6	40.5	91.6	79.9	121.6
	6.7	9.8	11.8			
	6.7	9.8	11.8			
	6.7	9.8	11.8	20.1	29.3	35.5
	0.0	0.0	0.0			
	0.0	0.0	0.0			
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
				111.7	109.2	156.2

Ue= 5.8 V
 Ie= 7.8 A
 Se= 136.7 VA

Pf= 130.5

ANEXA 4

MĂSURĂTORI ÎN INSTALAȚII

Harmonic Measurements Summary

The following is a summary of the harmonic measurements that were taken:

Line 1 Voltage

Order	Minimum	Maximum	Average	Data at THD Peak: 07/08/99 12:56:15		
				% fundam.	Phase	RMS
RMS	276.4 V	285.9 V	282.4 V			276.8 V
THD	4.355 %	12.19 %	6.129 %	12.19 %		
DC	0.180 %	0.580 %	0.341 %	0.270 %		0.742 V
1st	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	0.000 °	274.8 V
2nd	0.000 %	0.270 %	0.051 %	0.070 %	153.4 °	0.192 V
3rd	3.480 %	4.660 %	3.972 %	4.660 %	66.00 °	12.81 V
4th	0.000 %	0.240 %	0.049 %	0.030 %	198.4 °	0.082 V
5th	0.910 %	5.610 %	1.846 %	5.610 %	38.90 °	15.42 V
6th	1.560 %	1.900 %	1.704 %	1.680 %	109.9 °	4.616 V
7th	0.420 %	5.920 %	1.829 %	5.920 %	3.800 °	16.27 V
8th	0.000 %	0.230 %	0.034 %	0.050 %	211.6 °	0.137 V
9th	0.670 %	1.360 %	0.986 %	1.360 %	143.1 °	3.737 V
10th	0.000 %	0.250 %	0.026 %	0.040 %	239.3 °	0.110 V
11th	0.090 %	4.290 %	1.329 %	4.290 %	141.0 °	11.79 V
12th	0.350 %	0.660 %	0.517 %	0.500 %	158.6 °	1.374 V
13th	0.060 %	3.420 %	1.200 %	3.420 %	108.3 °	9.398 V
14th	0.000 %	0.260 %	0.033 %	0.030 %	262.1 °	0.082 V
15th	0.120 %	0.780 %	0.487 %	0.780 %	198.6 °	2.143 V
16th	0.000 %	0.260 %	0.021 %	0.050 %	278.5 °	0.137 V
17th	0.040 %	2.150 %	1.023 %	2.120 %	231.2 °	5.825 V
18th	0.140 %	0.510 %	0.266 %	0.510 %	218.7 °	1.401 V
19th	0.010 %	1.760 %	0.852 %	1.570 %	188.8 °	4.314 V
20th	0.000 %	0.210 %	0.017 %	0.050 %	350.3 °	0.137 V
21st	0.120 %	0.810 %	0.297 %	0.810 %	274.9 °	2.226 V
22nd	0.000 %	0.260 %	0.018 %	0.040 %	348.1 °	0.110 V
23rd	0.010 %	1.560 %	0.794 %	1.560 %	289.5 °	4.287 V
24th	0.090 %	0.450 %	0.193 %	0.450 %	297.8 °	1.237 V
25th	0.000 %	1.270 %	0.675 %	1.270 %	241.2 °	3.490 V
26th	0.000 %	0.210 %	0.020 %	0.050 %	45.80 °	0.137 V
27th	0.030 %	0.720 %	0.249 %	0.720 %	354.6 °	1.978 V
28th	0.000 %	0.260 %	0.022 %	0.050 %	57.20 °	0.137 V
29th	0.000 %	1.570 %	0.636 %	1.570 %	4.500 °	4.314 V
30th	0.030 %	0.350 %	0.168 %	0.320 %	3.700 °	0.879 V
31st	0.010 %	1.140 %	0.487 %	1.140 %	320.7 °	3.133 V
32nd	0.000 %	0.230 %	0.022 %	0.070 %	117.3 °	0.192 V
33rd	0.030 %	0.670 %	0.232 %	0.670 %	65.40 °	1.841 V
34th	0.000 %	0.280 %	0.023 %	0.060 %	113.1 °	0.165 V
35th	0.000 %	1.300 %	0.530 %	1.300 %	78.80 °	3.572 V
36th	0.040 %	0.330 %	0.152 %	0.290 %	65.20 °	0.797 V
37th	0.010 %	1.000 %	0.397 %	0.810 %	36.80 °	2.226 V
38th	0.000 %	0.260 %	0.029 %	0.100 %	182.6 °	0.275 V
39th	0.000 %	0.750 %	0.227 %	0.750 %	135.6 °	2.061 V
40th	0.000 %	0.280 %	0.026 %	0.040 %	173.8 °	0.110 V
41st	0.020 %	1.190 %	0.496 %	1.190 %	140.8 °	3.270 V
42nd	0.010 %	0.320 %	0.137 %	0.290 %	140.4 °	0.797 V
43rd	0.010 %	0.840 %	0.345 %	0.690 %	100.6 °	1.896 V
44th	0.000 %	0.320 %	0.039 %	0.110 %	258.3 °	0.302 V
45th	0.000 %	0.890 %	0.254 %	0.890 %	207.3 °	2.446 V
46th	0.000 %	0.310 %	0.027 %	0.050 %	264.3 °	0.137 V
47th	0.020 %	1.300 %	0.472 %	1.300 %	210.2 °	3.572 V
48th	0.010 %	0.300 %	0.126 %	0.250 %	197.8 °	0.687 V
49th	0.020 %	0.810 %	0.310 %	0.540 %	181.3 °	1.484 V
50th	0.000 %	0.320 %	0.057 %	0.150 %	305.7 °	0.412 V

Recording from: 07/08/99 12:40:01 To: 07/08/99 13:10:00

Line 1 Current

Data at THD Peak: 07/08/99 12:54:04						
Order	Minimum	Maximum	Average	% fundam.	Phase	RMS
RMS	0.000 A	682.8 A	160.2 A			72.78 A
THD	0.000 %	52.15 %	24.12 %	52.15 %		
DC	0.000 %	61.88 %	12.64 %	9.530 %		6.128 A
1st	0.000 %	100.0 %	86.99 %	100.0 %	5.100 °	64.30 A
2nd	0.000 %	30.85 %	0.932 %	30.85 %	199.3 °	19.84 A
3rd	0.000 %	20.67 %	0.958 %	20.67 %	261.2 °	13.29 A
4th	0.000 %	11.14 %	0.388 %	11.14 %	329.6 °	7.163 A
5th	0.000 %	25.36 %	17.80 %	25.36 %	143.1 °	16.31 A
6th	0.000 %	11.91 %	0.356 %	5.160 %	279.7 °	3.318 A
7th	0.000 %	15.60 %	10.83 %	8.720 %	152.9 °	5.607 A
8th	0.000 %	7.260 %	0.194 %	7.260 %	12.10 °	4.668 A
9th	0.000 %	5.330 %	0.541 %	5.330 %	78.90 °	3.427 A
10th	0.000 %	2.670 %	0.171 %	2.580 %	149.3 °	1.659 A
11th	0.000 %	12.11 %	7.246 %	12.11 %	304.2 °	7.787 A
12th	0.000 %	4.520 %	0.195 %	4.520 %	73.90 °	2.906 A
13th	0.000 %	8.730 %	5.352 %	4.360 %	271.1 °	2.803 A
14th	0.000 %	3.390 %	0.148 %	3.390 %	186.6 °	2.180 A
15th	0.000 %	2.350 %	0.441 %	1.610 %	247.7 °	1.035 A
16th	0.000 %	3.080 %	0.149 %	0.320 %	14.40 °	0.206 A
17th	0.000 %	7.790 %	4.162 %	7.260 %	105.3 °	4.668 A
18th	0.000 %	3.870 %	0.146 %	3.870 %	235.4 °	2.488 A
19th	0.000 %	6.500 %	3.129 %	3.550 %	37.50 °	2.283 A
20th	0.000 %	2.710 %	0.141 %	1.610 %	13.30 °	1.035 A
21st	0.000 %	2.560 %	0.409 %	0.320 %	198.9 °	0.206 A
22nd	0.000 %	2.480 %	0.150 %	1.290 %	287.8 °	0.829 A
23rd	0.000 %	6.700 %	2.621 %	4.030 %	260.6 °	2.591 A
24th	0.000 %	2.900 %	0.142 %	2.900 %	40.80 °	1.865 A
25th	0.000 %	5.380 %	2.002 %	3.870 %	187.3 °	2.488 A
26th	0.000 %	2.120 %	0.148 %	0.480 %	224.4 °	0.309 A
27th	0.000 %	2.380 %	0.354 %	0.800 %	18.50 °	0.514 A
28th	0.000 %	2.350 %	0.144 %	1.930 %	103.1 °	1.241 A
29th	0.000 %	5.480 %	1.779 %	1.770 %	47.60 °	1.138 A
30th	0.000 %	2.970 %	0.149 %	1.610 %	210.2 °	1.035 A
31st	0.000 %	4.650 %	1.339 %	3.060 %	346.5 °	1.968 A
32nd	0.000 %	2.380 %	0.145 %	0.640 %	100.3 °	0.412 A
33rd	0.000 %	2.710 %	0.362 %	1.450 %	196.5 °	0.932 A
34th	0.000 %	2.700 %	0.171 %	2.100 %	272.9 °	1.350 A
35th	0.000 %	6.000 %	1.342 %	0.640 %	223.5 °	0.412 A
36th	0.000 %	3.300 %	0.202 %	0.640 %	57.10 °	0.412 A
37th	0.000 %	4.520 %	0.972 %	2.740 %	144.3 °	1.762 A
38th	0.000 %	3.600 %	0.157 %	1.290 %	306.3 °	0.829 A
39th	0.000 %	4.200 %	0.388 %	1.290 %	22.50 °	0.829 A
40th	0.000 %	3.550 %	0.173 %	1.610 %	77.40 °	1.035 A
41st	0.000 %	5.570 %	1.102 %	1.290 %	249.3 °	0.829 A
42nd	0.000 %	3.190 %	0.174 %	0.480 %	262.8 °	0.309 A
43rd	0.000 %	4.140 %	0.746 %	1.290 %	306.4 °	0.829 A
44th	0.000 %	2.900 %	0.168 %	1.770 %	112.1 °	1.138 A
45th	0.000 %	3.370 %	0.417 %	1.770 %	190.3 °	1.138 A
46th	0.000 %	3.140 %	0.168 %	0.960 %	245.3 °	0.617 A
47th	0.000 %	4.800 %	0.942 %	1.930 %	48.40 °	1.241 A
48th	0.000 %	2.570 %	0.155 %	0.800 %	126.0 °	0.514 A
49th	0.000 %	3.720 %	0.609 %	0.000 %	224.1 °	0.000 A
50th	0.000 %	2.600 %	0.192 %	1.450 %	304.1 °	0.932 A

Recording from: 07/08/99 12:40:01 To: 07/08/99 13:10:00

Line 2 Voltage

Data at THD Peak: 07/08/99 12:56:16						
Order	Minimum	Maximum	Average	% fundam.	Phase	RMS
RMS	267.2 V	277.1 V	274.0 V			268.9 V
THD	4.126 %	11.86 %	5.865 %	11.86 %		
DC	0.260 %	0.660 %	0.458 %	0.510 %		1.362 V
1st	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	238.1 °	267.0 V
2nd	0.000 %	0.310 %	0.053 %	0.030 %	270.7 °	0.080 V
3rd	3.330 %	4.340 %	3.768 %	4.330 %	58.30 °	11.56 V
4th	0.000 %	0.350 %	0.049 %	0.030 %	109.0 °	0.080 V
5th	0.770 %	6.250 %	1.898 %	6.250 %	145.7 °	16.69 V
6th	1.600 %	2.020 %	1.750 %	1.720 %	108.3 °	4.592 V
7th	0.370 %	5.270 %	1.638 %	5.270 %	248.0 °	14.07 V
8th	0.000 %	0.210 %	0.033 %	0.060 %	245.9 °	0.160 V
9th	0.620 %	1.030 %	0.859 %	0.820 %	133.6 °	2.189 V
10th	0.000 %	0.180 %	0.032 %	0.000 %	38.00 °	0.000 V
11th	0.130 %	4.080 %	1.339 %	4.080 %	244.7 °	10.89 V
12th	0.330 %	0.750 %	0.518 %	0.510 %	154.0 °	1.362 V
13th	0.020 %	3.180 %	1.068 %	3.180 %	355.7 °	8.490 V
14th	0.000 %	0.180 %	0.027 %	0.030 %	333.0 °	0.080 V
15th	0.180 %	0.690 %	0.309 %	0.690 %	152.6 °	1.842 V
16th	0.000 %	0.200 %	0.014 %	0.050 %	212.3 °	0.133 V
17th	0.000 %	1.930 %	0.965 %	1.900 %	331.7 °	5.073 V
18th	0.140 %	0.500 %	0.259 %	0.500 %	210.2 °	1.335 V
19th	0.020 %	1.780 %	0.877 %	1.700 %	78.10 °	4.539 V
20th	0.000 %	0.180 %	0.021 %	0.000 %	346.0 °	0.000 V
21st	0.070 %	0.640 %	0.198 %	0.640 %	239.3 °	1.709 V
22nd	0.000 %	0.220 %	0.015 %	0.030 %	342.6 °	0.080 V
23rd	0.000 %	1.350 %	0.701 %	1.350 %	25.40 °	3.604 V
24th	0.090 %	0.440 %	0.197 %	0.420 %	289.8 °	1.121 V
25th	0.010 %	1.510 %	0.697 %	1.510 %	135.2 °	4.032 V
26th	0.000 %	0.210 %	0.021 %	0.060 %	77.20 °	0.160 V
27th	0.020 %	0.440 %	0.192 %	0.420 %	298.5 °	1.121 V
28th	0.000 %	0.210 %	0.020 %	0.030 %	76.70 °	0.080 V
29th	0.000 %	1.240 %	0.517 %	1.240 %	100.2 °	3.311 V
30th	0.020 %	0.420 %	0.170 %	0.320 %	350.3 °	0.854 V
31st	0.000 %	1.520 %	0.553 %	1.520 %	214.4 °	4.058 V
32nd	0.000 %	0.250 %	0.024 %	0.080 %	143.2 °	0.214 V
33rd	0.000 %	0.490 %	0.175 %	0.490 %	354.1 °	1.308 V
34th	0.000 %	0.230 %	0.019 %	0.020 %	101.7 °	0.053 V
35th	0.010 %	0.890 %	0.407 %	0.890 %	172.9 °	2.376 V
36th	0.020 %	0.430 %	0.154 %	0.310 %	63.50 °	0.828 V
37th	0.000 %	1.270 %	0.482 %	1.270 %	284.3 °	3.391 V
38th	0.000 %	0.270 %	0.029 %	0.070 %	201.6 °	0.187 V
39th	0.000 %	0.470 %	0.152 %	0.470 %	70.30 °	1.255 V
40th	0.000 %	0.260 %	0.021 %	0.040 %	172.2 °	0.107 V
41st	0.020 %	0.800 %	0.353 %	0.760 %	231.4 °	2.029 V
42nd	0.010 %	0.420 %	0.139 %	0.290 %	132.8 °	0.774 V
43rd	0.020 %	1.300 %	0.445 %	1.300 %	350.7 °	3.471 V
44th	0.000 %	0.340 %	0.039 %	0.130 %	275.6 °	0.347 V
45th	0.000 %	0.510 %	0.154 %	0.510 %	131.9 °	1.362 V
46th	0.000 %	0.280 %	0.022 %	0.040 %	227.3 °	0.107 V
47th	0.000 %	0.820 %	0.316 %	0.820 %	305.4 °	2.189 V
48th	0.000 %	0.470 %	0.128 %	0.280 %	196.2 °	0.748 V
49th	0.010 %	1.450 %	0.434 %	1.450 %	64.80 °	3.871 V
50th	0.000 %	0.390 %	0.060 %	0.170 %	321.2 °	0.454 V

Recording from: 07/08/99 12:40:01 To: 07/08/99 13:10:00

Line 2 Current

Order	Minimum	Maximum	Average	Data at THD Peak: 07/08/99 12:43:19		
				% fundam.	Phase	RMS
RMS	0.000 A	685.9 A	162.6 A			103.9 A
THD	0.000 %	40.17 %	24.39 %	40.17 %		
DC	0.000 %	88.66 %	18.91 %	37.09 %		33.82 A
1st	0.000 %	100.0 %	88.44 %	100.0 %	238.3 °	91.17 A
2nd	0.000 %	13.62 %	1.187 %	13.62 %	166.1 °	12.42 A
3rd	0.000 %	11.07 %	1.139 %	11.07 %	305.5 °	10.09 A
4th	0.000 %	7.080 %	0.495 %	7.080 %	87.50 °	6.455 A
5th	0.000 %	28.23 %	17.78 %	28.23 %	261.5 °	25.74 A
6th	0.000 %	4.360 %	0.283 %	4.310 %	47.10 °	3.929 A
7th	0.000 %	16.41 %	11.49 %	11.07 %	20.40 °	10.09 A
8th	0.000 %	3.210 %	0.265 %	3.210 %	338.1 °	2.927 A
9th	0.000 %	2.990 %	0.561 %	2.990 %	128.3 °	2.726 A
10th	0.000 %	2.290 %	0.218 %	1.550 %	297.2 °	1.413 A
11th	0.000 %	10.29 %	6.880 %	10.29 %	56.80 °	9.381 A
12th	0.000 %	2.270 %	0.185 %	1.990 %	260.3 °	1.814 A
13th	0.000 %	9.580 %	5.848 %	7.640 %	146.6 °	6.965 A
14th	0.000 %	2.160 %	0.173 %	1.210 %	209.5 °	1.103 A
15th	0.000 %	3.120 %	0.469 %	1.100 %	347.9 °	1.003 A
16th	0.000 %	2.780 %	0.181 %	1.550 %	176.6 °	1.413 A
17th	0.000 %	7.210 %	3.777 %	4.540 %	201.0 °	4.139 A
18th	0.000 %	2.170 %	0.150 %	1.430 %	107.4 °	1.304 A
19th	0.000 %	7.190 %	3.496 %	6.310 %	294.8 °	5.753 A
20th	0.000 %	2.900 %	0.161 %	1.100 %	89.90 °	1.003 A
21st	0.000 %	3.220 %	0.386 %	0.770 %	260.7 °	0.702 A
22nd	0.000 %	2.580 %	0.165 %	1.210 %	33.40 °	1.103 A
23rd	0.000 %	5.610 %	2.275 %	2.430 %	313.0 °	2.215 A
24th	0.000 %	2.000 %	0.155 %	0.660 %	342.1 °	0.602 A
25th	0.000 %	5.830 %	2.294 %	4.090 %	88.40 °	3.729 A
26th	0.000 %	2.600 %	0.152 %	0.880 %	298.8 °	0.802 A
27th	0.000 %	2.920 %	0.307 %	0.880 %	100.9 °	0.802 A
28th	0.000 %	2.630 %	0.137 %	0.550 %	240.4 °	0.501 A
29th	0.000 %	4.540 %	1.414 %	2.870 %	90.50 °	2.617 A
30th	0.000 %	2.250 %	0.147 %	0.880 %	195.4 °	0.802 A
31st	0.000 %	5.630 %	1.595 %	1.770 %	221.2 °	1.614 A
32nd	0.000 %	2.760 %	0.136 %	0.770 %	164.6 °	0.702 A
33rd	0.000 %	2.790 %	0.276 %	1.100 %	318.0 °	1.003 A
34th	0.000 %	2.480 %	0.153 %	0.550 %	119.2 °	0.501 A
35th	0.000 %	5.100 %	0.994 %	2.100 %	250.4 °	1.915 A
36th	0.000 %	1.980 %	0.191 %	0.990 %	58.50 °	0.903 A
37th	0.000 %	4.950 %	1.206 %	1.550 %	306.1 °	1.413 A
38th	0.000 %	2.180 %	0.151 %	0.550 %	13.20 °	0.501 A
39th	0.000 %	3.630 %	0.259 %	0.880 %	142.3 °	0.802 A
40th	0.000 %	1.870 %	0.141 %	0.660 %	335.4 °	0.602 A
41st	0.000 %	4.020 %	0.738 %	0.660 %	64.60 °	0.602 A
42nd	0.000 %	2.830 %	0.167 %	0.660 %	263.7 °	0.602 A
43rd	0.000 %	5.090 %	0.986 %	1.550 %	91.40 °	1.413 A
44th	0.000 %	2.400 %	0.167 %	0.660 %	237.9 °	0.602 A
45th	0.000 %	2.740 %	0.238 %	0.550 %	36.10 °	0.501 A
46th	0.000 %	2.160 %	0.153 %	0.770 %	211.4 °	0.702 A
47th	0.000 %	3.370 %	0.571 %	0.770 %	42.70 °	0.702 A
48th	0.000 %	2.760 %	0.145 %	0.550 %	160.8 °	0.501 A
49th	0.000 %	3.540 %	0.799 %	1.320 %	252.6 °	1.203 A
50th	0.000 %	2.500 %	0.190 %	0.880 %	100.3 °	0.802 A

Recording from: 07/08/99 12:40:01 To: 07/08/99 13:10:00

Line 3 Voltage

Order	Data at THD Peak: 07/08/99 12:56:16					
	Minimum	Maximum	Average	% fundam.	Phase	RMS
RMS	280.3 V	291.3 V	287.8 V			282.0 V
THD	4.180 %	10.31 %	5.569 %	10.31 %		
DC	0.330 %	0.650 %	0.488 %	0.510 %		1.431 V
1st	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	116.8 °	280.5 V
2nd	0.000 %	0.420 %	0.065 %	0.100 %	171.6 °	0.281 V
3rd	3.450 %	4.520 %	3.864 %	4.520 %	65.10 °	12.68 V
4th	0.000 %	0.230 %	0.058 %	0.030 %	204.8 °	0.084 V
5th	0.600 %	5.090 %	1.520 %	5.090 %	262.5 °	14.28 V
6th	1.680 %	2.020 %	1.831 %	1.800 %	110.0 °	5.050 V
7th	0.370 %	5.000 %	1.585 %	5.000 %	112.3 °	14.03 V
8th	0.000 %	0.260 %	0.023 %	0.020 %	237.1 °	0.056 V
9th	0.650 %	1.160 %	0.945 %	1.100 %	136.5 °	3.086 V
10th	0.000 %	0.220 %	0.028 %	0.030 %	234.8 °	0.084 V
11th	0.090 %	3.010 %	1.023 %	3.010 %	3.100 °	8.444 V
12th	0.360 %	0.670 %	0.535 %	0.510 %	157.8 °	1.431 V
13th	0.040 %	2.740 %	0.958 %	2.740 %	215.2 °	7.687 V
14th	0.000 %	0.240 %	0.035 %	0.020 %	348.6 °	0.056 V
15th	0.260 %	0.700 %	0.415 %	0.700 %	172.4 °	1.964 V
16th	0.000 %	0.190 %	0.018 %	0.040 %	268.5 °	0.112 V
17th	0.010 %	1.430 %	0.723 %	1.320 %	91.10 °	3.703 V
18th	0.150 %	0.520 %	0.270 %	0.520 %	216.0 °	1.459 V
19th	0.000 %	1.450 %	0.704 %	1.350 %	296.4 °	3.787 V
20th	0.000 %	0.230 %	0.016 %	0.050 %	17.60 °	0.140 V
21st	0.090 %	0.690 %	0.235 %	0.690 %	249.6 °	1.936 V
22nd	0.000 %	0.150 %	0.014 %	0.050 %	353.5 °	0.140 V
23rd	0.010 %	0.950 %	0.512 %	0.950 %	143.0 °	2.665 V
24th	0.070 %	0.450 %	0.198 %	0.450 %	300.5 °	1.262 V
25th	0.000 %	1.100 %	0.552 %	1.100 %	352.8 °	3.086 V
26th	0.000 %	0.210 %	0.020 %	0.030 %	108.3 °	0.084 V
27th	0.060 %	0.510 %	0.209 %	0.510 %	323.8 °	1.431 V
28th	0.000 %	0.170 %	0.019 %	0.050 %	76.90 °	0.140 V
29th	0.000 %	0.910 %	0.391 %	0.910 %	211.2 °	2.553 V
30th	0.030 %	0.370 %	0.173 %	0.300 %	9.100 °	0.842 V
31st	0.000 %	1.060 %	0.432 %	1.060 %	70.00 °	2.974 V
32nd	0.000 %	0.220 %	0.025 %	0.050 %	150.7 °	0.140 V
33rd	0.010 %	0.450 %	0.188 %	0.450 %	18.30 °	1.262 V
34th	0.000 %	0.160 %	0.020 %	0.050 %	120.9 °	0.140 V
35th	0.000 %	0.720 %	0.309 %	0.670 %	283.2 °	1.880 V
36th	0.020 %	0.320 %	0.157 %	0.320 %	73.70 °	0.898 V
37th	0.020 %	0.920 %	0.368 %	0.810 %	145.4 °	2.272 V
38th	0.000 %	0.220 %	0.030 %	0.070 %	234.6 °	0.196 V
39th	0.000 %	0.430 %	0.167 %	0.430 %	89.30 °	1.206 V
40th	0.000 %	0.150 %	0.021 %	0.080 %	220.0 °	0.224 V
41st	0.000 %	0.610 %	0.274 %	0.610 %	334.8 °	1.711 V
42nd	0.000 %	0.300 %	0.140 %	0.260 %	153.9 °	0.729 V
43rd	0.010 %	0.890 %	0.342 %	0.790 %	218.6 °	2.216 V
44th	0.000 %	0.250 %	0.043 %	0.100 %	320.6 °	0.281 V
45th	0.000 %	0.450 %	0.156 %	0.440 %	163.9 °	1.234 V
46th	0.000 %	0.170 %	0.025 %	0.080 %	276.6 °	0.224 V
47th	0.000 %	0.620 %	0.252 %	0.620 %	46.00 °	1.739 V
48th	0.000 %	0.310 %	0.129 %	0.250 %	223.3 °	0.701 V
49th	0.020 %	0.920 %	0.332 %	0.890 %	290.8 °	2.497 V
50th	0.000 %	0.290 %	0.064 %	0.140 %	24.90 °	0.393 V

Recording from: 07/08/99 12:40:01 To: 07/08/99 13:10:00

Line 3 Current

Order	Minimum	Maximum	Average	Data at THD Peak: 07/08/99 12:51:20		
				% fundam.	Phase	RMS
RMS	0.000 A	683.9 A	164.2 A			66.12 A
THD	0.000 %	44.98 %	25.71 %	44.98 %		
DC	0.000 %	108.2 %	18.61 %	108.2 %		46.44 A
1st	0.000 %	100.0 %	91.55 %	100.0 %	116.6 °	42.92 A
2nd	0.000 %	30.04 %	1.382 %	30.04 %	311.1 °	12.89 A
3rd	0.000 %	13.32 %	0.809 %	1.461 %	106.9 °	0.627 A
4th	0.000 %	14.07 %	0.539 %	14.07 %	181.2 °	6.037 A
5th	0.000 %	23.88 %	18.86 %	20.80 %	26.60 °	8.926 A
6th	0.000 %	3.420 %	0.304 %	2.521 %	173.1 °	1.082 A
7th	0.000 %	16.05 %	11.75 %	12.61 %	265.9 °	5.410 A
8th	0.000 %	6.719 %	0.357 %	6.719 %	88.40 °	2.884 A
9th	0.000 %	3.500 %	0.357 %	1.461 %	199.9 °	0.627 A
10th	0.000 %	5.670 %	0.269 %	5.670 %	322.0 °	2.433 A
11th	0.000 %	11.02 %	7.398 %	7.769 %	172.4 °	3.334 A
12th	0.000 %	2.380 %	0.235 %	0.411 %	308.9 °	0.176 A
13th	0.000 %	9.800 %	5.957 %	6.297 %	42.60 °	2.703 A
14th	0.000 %	3.776 %	0.211 %	3.776 %	227.8 °	1.621 A
15th	0.000 %	3.360 %	0.229 %	0.628 %	325.9 °	0.269 A
16th	0.000 %	3.354 %	0.200 %	3.354 %	93.60 °	1.440 A
17th	0.000 %	7.380 %	4.176 %	4.826 %	321.2 °	2.071 A
18th	0.000 %	2.670 %	0.213 %	0.000 %	351.0 °	0.000 A
19th	0.000 %	7.140 %	3.530 %	4.620 %	196.8 °	1.983 A
20th	0.000 %	2.521 %	0.190 %	2.521 %	359.2 °	1.082 A
21st	0.000 %	2.430 %	0.225 %	0.206 %	116.3 °	0.088 A
22nd	0.000 %	2.521 %	0.194 %	2.521 %	247.4 °	1.082 A
23rd	0.000 %	5.950 %	2.610 %	3.354 %	109.2 °	1.440 A
24th	0.000 %	2.930 %	0.198 %	0.411 %	152.0 °	0.176 A
25th	0.000 %	5.530 %	2.298 %	2.932 %	335.5 °	1.259 A
26th	0.000 %	2.290 %	0.180 %	1.677 %	147.9 °	0.720 A
27th	0.000 %	2.670 %	0.227 %	0.411 %	241.2 °	0.176 A
28th	0.000 %	3.170 %	0.196 %	1.883 %	3.800 °	0.808 A
29th	0.000 %	5.050 %	1.688 %	2.099 %	236.3 °	0.901 A
30th	0.000 %	2.870 %	0.214 %	0.411 %	287.0 °	0.176 A
31st	0.000 %	5.390 %	1.565 %	2.305 %	105.4 °	0.989 A
32nd	0.000 %	3.950 %	0.226 %	1.255 %	288.3 °	0.539 A
33rd	0.000 %	2.990 %	0.275 %	0.000 %	208.5 °	0.000 A
34th	0.000 %	3.200 %	0.278 %	1.883 %	159.3 °	0.808 A
35th	0.000 %	5.700 %	1.210 %	2.521 %	40.10 °	1.082 A
36th	0.000 %	4.100 %	0.313 %	0.206 %	108.8 °	0.088 A
37th	0.000 %	5.970 %	1.183 %	1.255 %	243.9 °	0.539 A
38th	0.000 %	3.480 %	0.257 %	1.255 %	51.70 °	0.539 A
39th	0.000 %	3.780 %	0.323 %	0.628 %	109.7 °	0.269 A
40th	0.000 %	4.100 %	0.288 %	1.677 %	274.6 °	0.720 A
41st	0.000 %	5.060 %	0.941 %	0.628 %	128.5 °	0.269 A
42nd	0.000 %	3.860 %	0.273 %	0.206 %	258.4 °	0.088 A
43rd	0.000 %	4.740 %	0.935 %	0.411 %	293.4 °	0.176 A
44th	0.000 %	3.420 %	0.267 %	1.255 %	178.2 °	0.539 A
45th	0.000 %	3.300 %	0.292 %	0.628 %	107.7 °	0.269 A
46th	0.000 %	3.740 %	0.248 %	0.628 %	42.50 °	0.269 A
47th	0.000 %	4.920 %	0.749 %	1.050 %	297.8 °	0.450 A
48th	0.000 %	3.400 %	0.250 %	0.000 %	66.00 °	0.000 A
49th	0.000 %	5.600 %	0.809 %	0.411 %	170.7 °	0.176 A
50th	0.000 %	3.780 %	0.290 %	1.255 %	355.5 °	0.539 A

Recording from: 07/08/99 12:40:01 To: 07/08/99 13:10:00

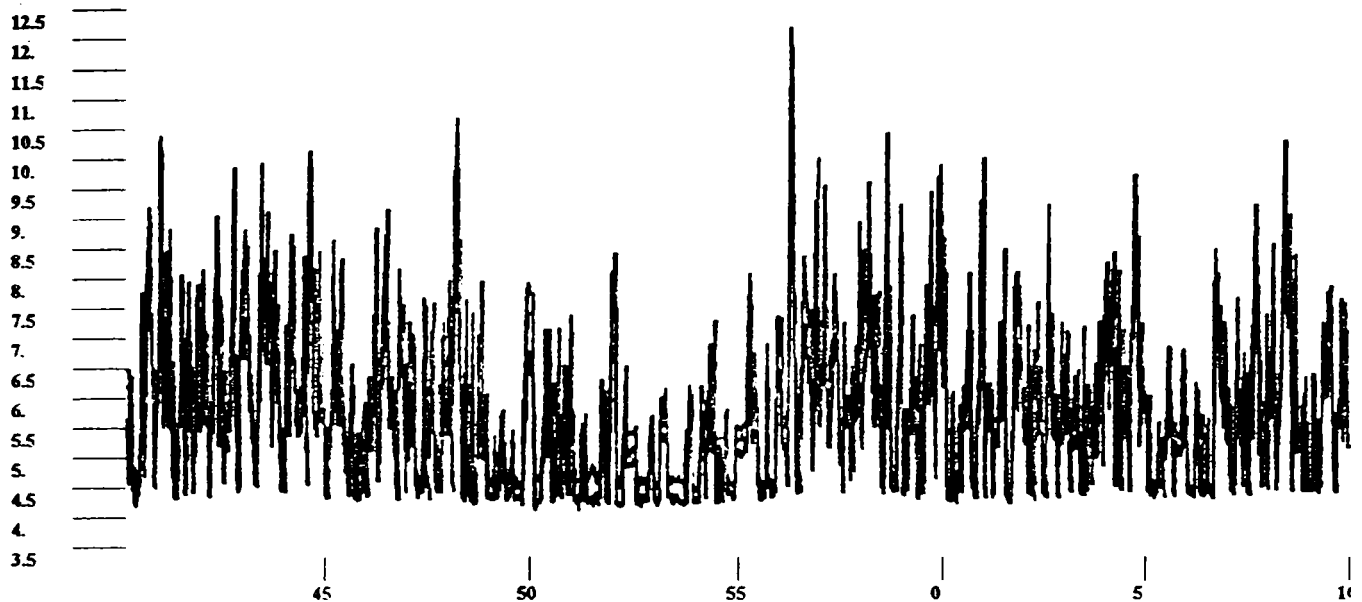
THD Graphs

This is the campaign summary on THD of all channels measured by the instrument:

Voltage:

File: K:\COMUNEMILVREDR2.HMS
Type: Harmonic Analyzer Measures

ACE 2000 - © CPM Leading-Edge Technology Inc.



Start:07/08/99 12:40:01
Stop:07/08/99 13:10:00
Records: 1800

Time: minutes
Scale:
L1-V THD % fund. (%)

■ L1-V THD % fund. ▨ none
■ L2-V THD % fund. ▩ none
■ L3-V THD % fund. ▧ none

Current:

File: K:\COMUNEMILVREDR2.HMS
Type: Harmonic Analyzer Measures

ACE 2000 - © CPM Leading-Edge Technology Inc.



Start:07/08/99 12:40:01
Stop:07/08/99 13:10:00
Records: 1800

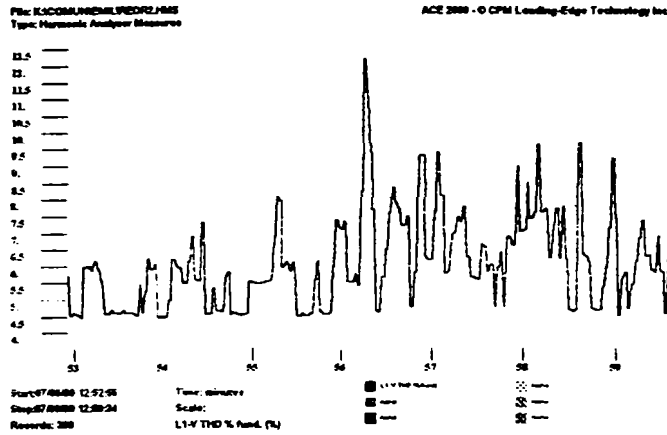
Time: minutes
Scale:
L1-I THD % fund. (%)

■ L1-I THD % fund. ▨ none
■ L2-I THD % fund. ▩ none
■ L3-I THD % fund. ▧ none

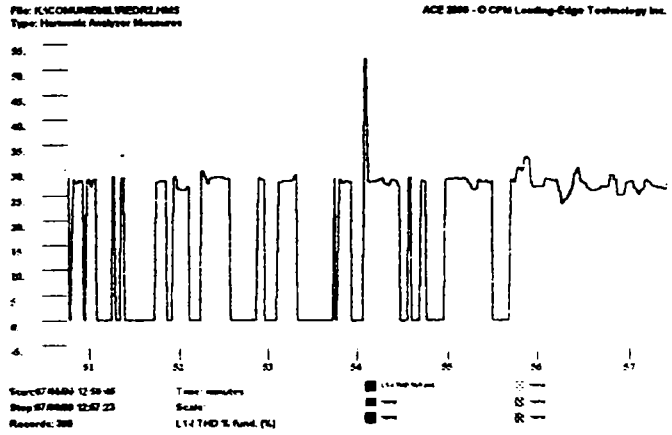
This is a magnification around the points of maximum :

Maximum Line 1 Voltage THD: 12.19 % at: 07/08/99 12:56:15
Maximum Line 1 Current THD: 52.15 % at: 07/08/99 12:54:04

Maximum Voltage:

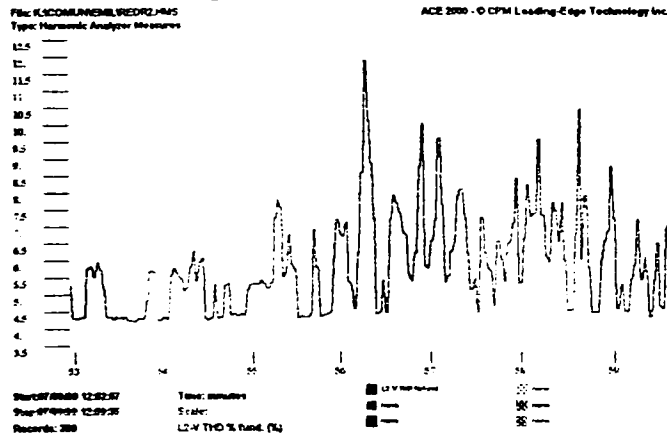


Maximum Current:

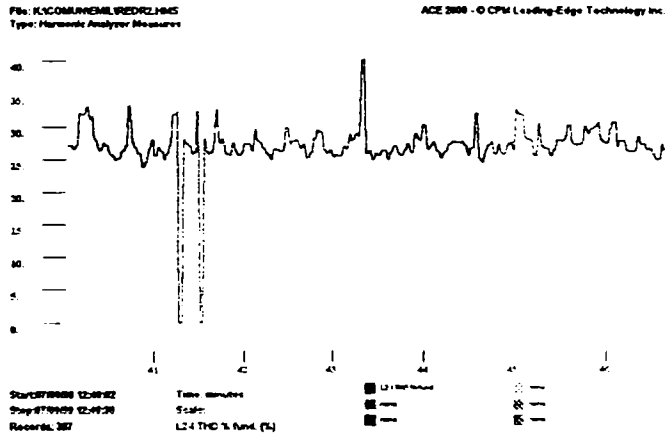


Maximum Line 2 Voltage THD: 11.86 % at: 07/08/99 12:56:16
Maximum Line 2 Current THD: 40.17 % at: 07/08/99 12:43:19

Maximum Voltage:

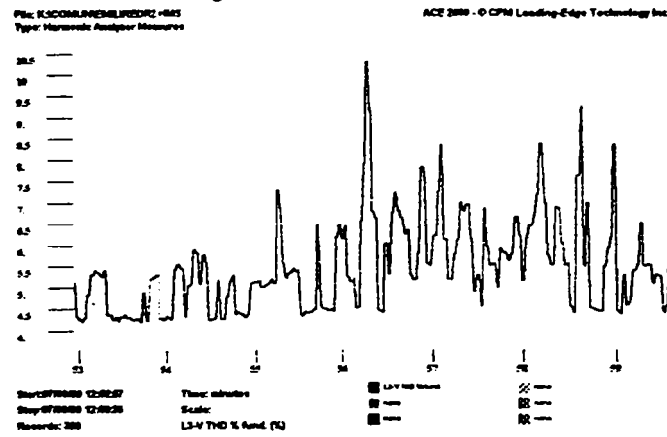


Maximum Current:

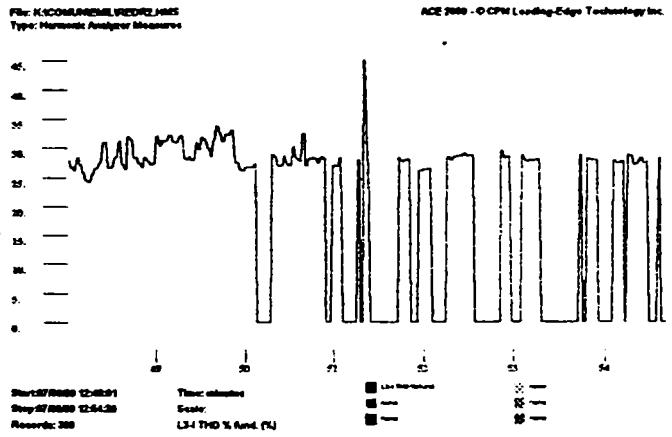


Maximum Line 3 Voltage THD: 10.31 % at: 07/08/99 12:56:16
Maximum Line 3 Current THD: 44.98 % at: 07/08/99 12:51:20

Maximum Voltage:



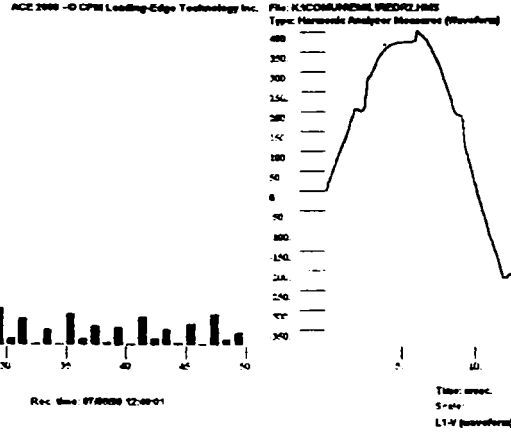
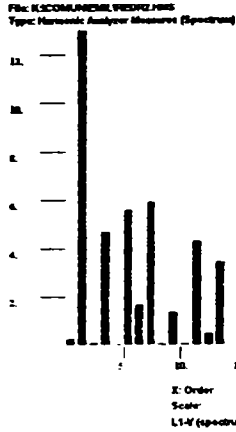
Maximum Current:



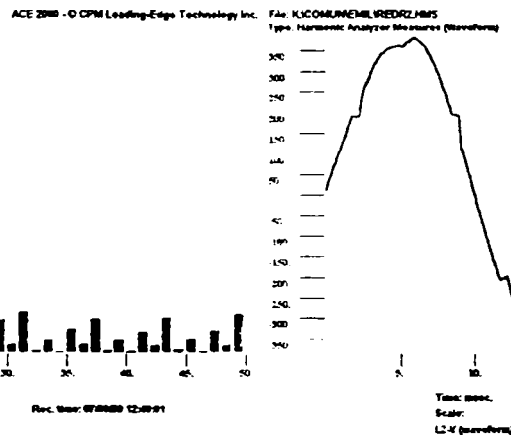
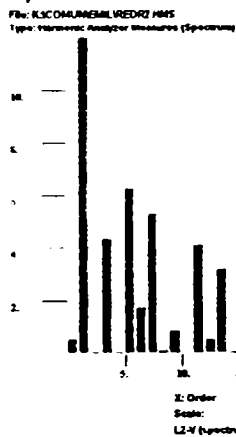
Spectrum and Waveform graphs

These are the spectrum and waveform when the maximum THD has been reached for each voltage channel:

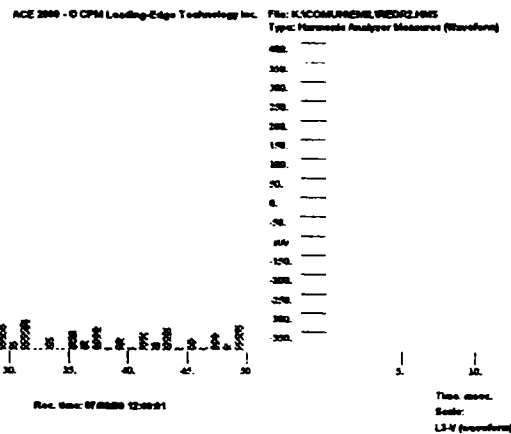
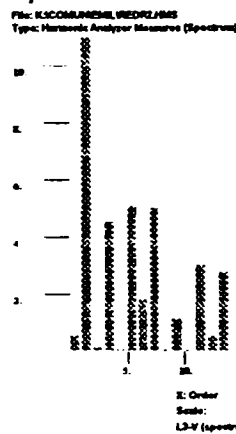
Line 1 Voltage: THD:12.19% RMS: 276.8 V 3rd:4.66% 5th:5.61%



Line 2 Voltage: THD:11.86% RMS: 268.9 V 3rd:4.33% 5th:6.25%

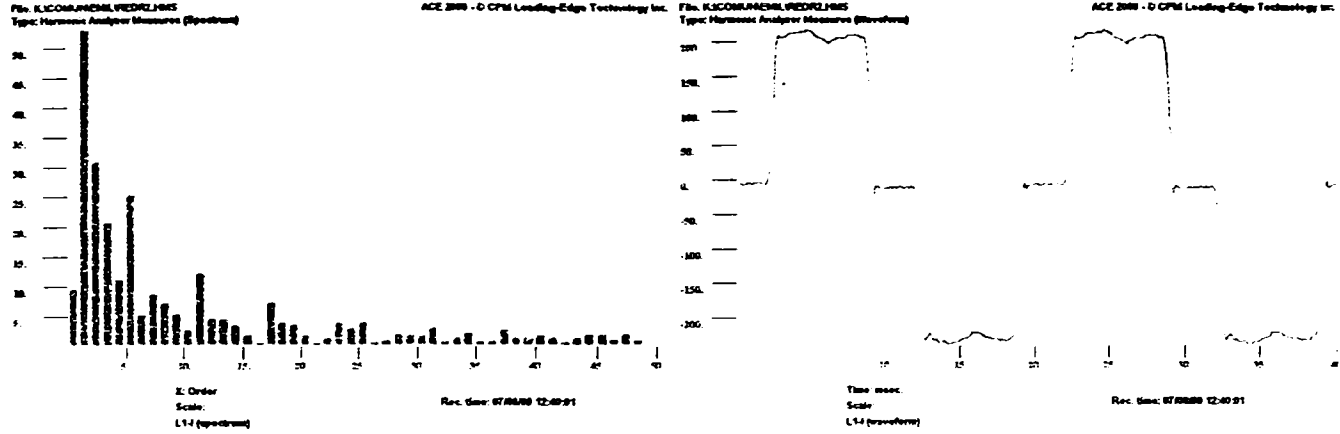


Line 2 Voltage: THD:11.86% RMS: 268.9 V 3rd:4.33% 5th:6.25%

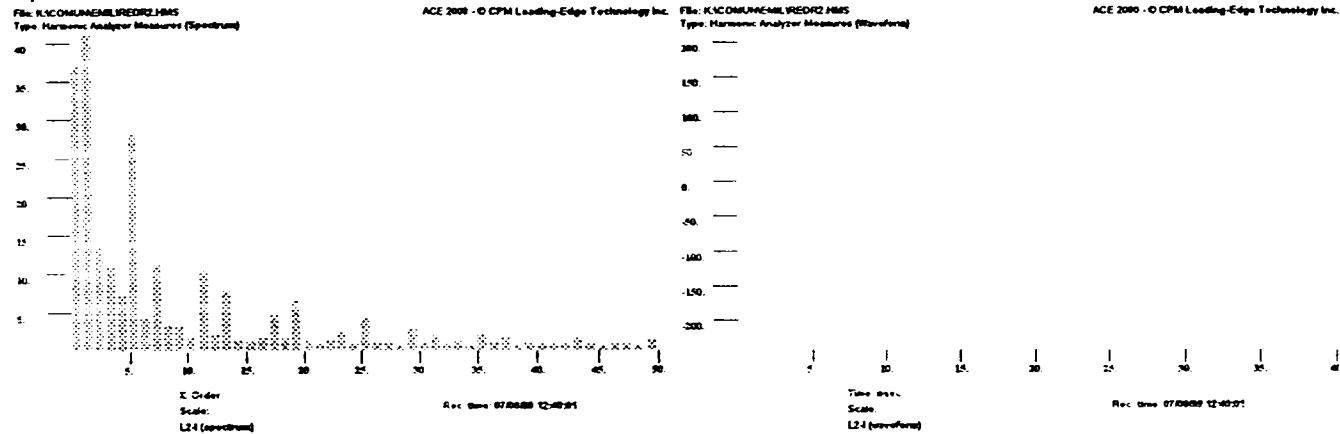


These are the spectrum and waveform when the maximum THD has been reached for each current channel:

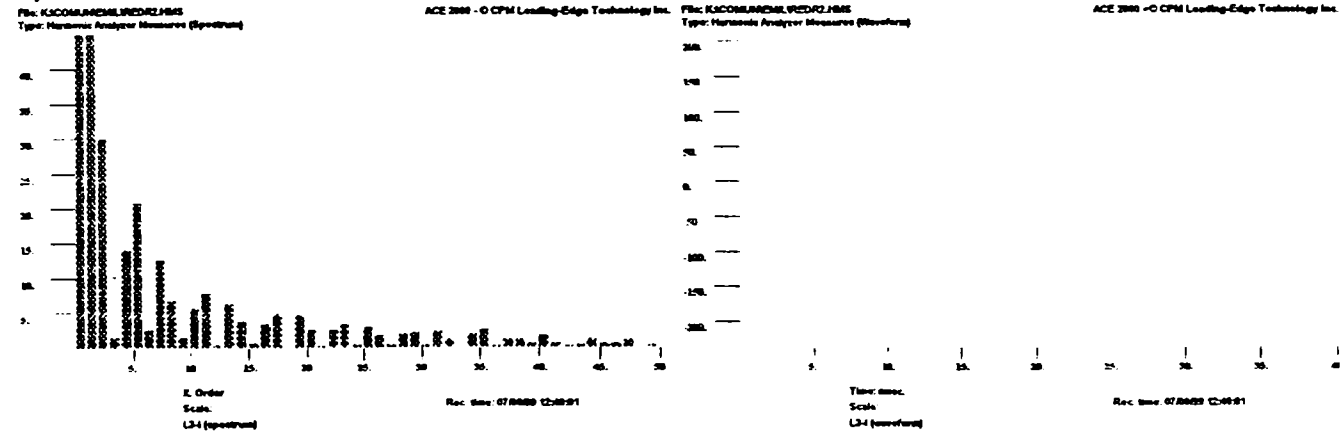
Line 1 Current: THD:52.15% RMS: 72.78 A 3rd:20.67% 5th:25.36%



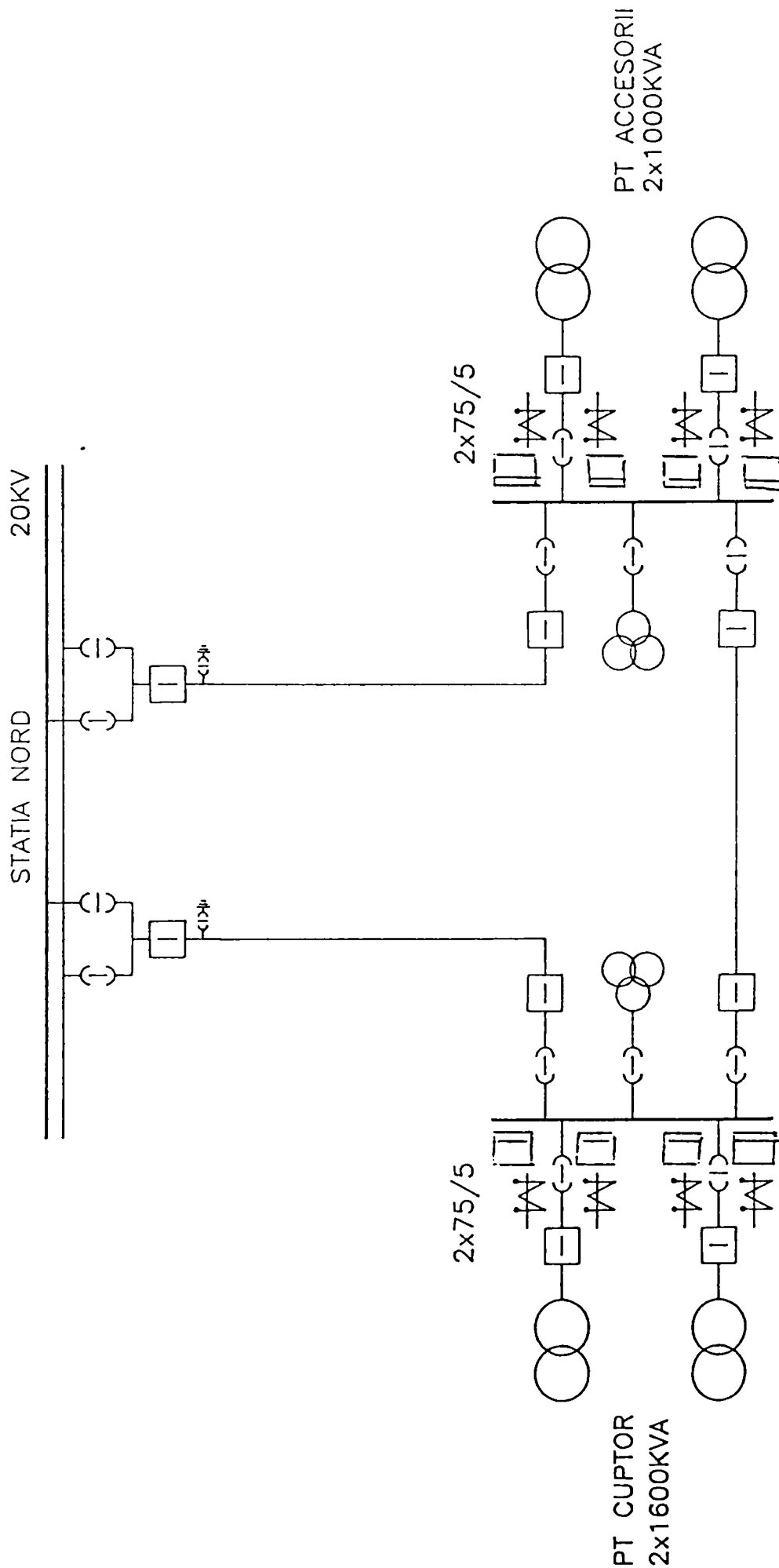
Line 2 Current: THD:40.17% RMS: 103.9 A 3rd:11.07% 5th:28.23%



Line 3 Current: THD:44.98% RMS: 66.12 A 3rd:1.46% 5th:20.80%



SC METALICA SA



INSTALATII APARTINAND LA FRE ORADEA
INSTALATII APARTINAND CONSUMATORULUI

FRE ORADEA		SC METALI A SA	
.....
Intocmit		Funcție	Semnatura
Verificat			Anul
Actat			si perioada
Aprobat			
P.C.T.			
			25.01.95

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:11 Min:48

LINE IDENTIFIER-> PT CUPTOARE (Metalica) Freq: 50.00 Hz

***** Voltage informations *****

U_{ef}(R)= 11.69 kV U_{ef}(S)= 11.60 kV U_{ef}(T)= 11.70 kV U_{ef}(H)= 0.0 V

U_l: kns2= 6.3 m kns0= 1.4 m kns= 7.7 m rns=0.992 rnsd= 8.3 m

δUR= 0.98% δUS= 1.12% δUT= 1.11% Arm1 [V]; Arm2..23 -> %:

Arm. | U_R . U_S . U_T | U_N | U_d . U_i . U_h

Arm.	U _R	U _S	U _T	U _N	U _d	U _i	U _h
1	11.69 k	11.60 k	11.70 k	0.0	11.66 k	73.93	16.13
2	0.10 %	0.05 %	0.12 %	%	4.002	8.901	4.457
3	0.43 %	0.64 %	0.64 %	%	5.619	11.64	66.23
4	0.03 %	0.03 %	0.11 %	%	5.969	2.943	4.141
5	0.57 %	0.67 %	0.63 %	%	1.831	72.41	6.380
6	0.01 %	0.02 %	0.06 %	%	2.694	1.795	2.525
7	0.21 %	0.22 %	0.17 %	%	21.37	6.252	8.151
8	0.03 %	0.02 %	0.05 %	%	2.275	1.599	3.177
9	0.17 %	0.15 %	0.17 %	%	4.866	5.254	17.69
10	0.01 %	0.04 %	0.03 %	%	1.984	2.756	1.001
11	0.47 %	0.39 %	0.46 %	%	2.962	50.90	7.178
12	0.01 %	0.02 %	0.02 %	%	1.673	1.251	1.301
13	0.19 %	0.21 %	0.18 %	%	21.04	6.705	5.470
14	0.01 %	0.01 %	0.03 %	%	1.442	1.356	1.071
15	0.15 %	0.15 %	0.08 %	%	5.322	1.272	14.30
16	0.01 %	0.01 %	0.02 %	%	1.649	0.53	0.63
17	0.07 %	0.11 %	0.06 %	%	7.055	4.546	4.712
18	0.01 %	0.02 %	0.04 %	%	1.721	1.800	1.661
19	0.08 %	0.08 %	0.09 %	%	6.874	2.770	5.901
20	0.02 %	0.01 %	0.08 %	%	3.214	2.801	3.066
21	0.06 %	0.14 %	0.11 %	%	3.490	8.256	8.911
22	0.01 %	0.02 %	0.08 %	%	2.980	3.572	3.271
23	0.15 %	0.13 %	0.08 %	%	9.077	9.743	6.080
24	0.02 %	0.04 %	0.10 %	%	4.629	2.066	5.152
25	0.14 %	0.03 %	0.07 %	%	6.748	4.443	7.308

***** Current informations *****

I_{ef}(R)= 12.07 A I_{ef}(S)= 12.47 A I_{ef}(T)= 11.17 A I_{ef}(H)= 0.0 A

I_l: kns2= 0.065 kns0= 5.0 m kns= 0.070 rns=0.899 rnsd= 0.11

δIR= 10.40% δIS= 9.10% δIT= 10.54% Arm1 [A]; Arm2..23 -> %:

Arm. | I_R . I_S . I_T | I_N | I_d . I_i . I_h

Arm.	I _R	I _S	I _T	I _N	I _d	I _i	I _h
1	11.94	12.35	11.10	0.0	11.78	0.76	0.059
2	0.07 %	0.21 %	0.29 %	%	0.022	8.4 m	7.1 m
3	4.14 %	1.45 %	3.07 %	%	0.066	0.13	0.33
4	1.12 %	0.86 %	0.81 %	%	0.11	3.2 m	0.029
5	2.58 %	2.25 %	2.65 %	%	0.019	0.29	0.034
6	0.21 %	0.25 %	0.32 %	%	0.012	0.015	0.024
7	6.40 %	5.96 %	6.78 %	%	0.74	0.10	0.094
8	0.43 %	0.39 %	0.72 %	%	3.7 m	0.056	0.024
9	4.31 %	4.13 %	4.55 %	%	0.042	0.046	0.51
10	0.34 %	0.31 %	0.33 %	%	0.016	0.019	0.030
11	2.84 %	2.83 %	3.09 %	%	0.070	0.33	0.059
12	0.62 %	0.34 %	0.41 %	%	0.016	7.6 m	0.053
13	0.26 %	0.27 %	0.09 %	%	7.5 m	0.022	0.014
14	0.99 %	0.19 %	0.71 %	%	0.018	0.064	0.051
15	0.25 %	0.42 %	0.22 %	%	0.026	0.025	0.012
16	0.50 %	0.27 %	0.67 %	%	0.051	0.027	6.8 m
17	1.96 %	2.00 %	2.18 %	%	0.066	0.22	0.066
18	0.44 %	0.32 %	0.52 %	%	0.026	0.010	0.042
19	0.36 %	0.24 %	0.19 %	%	0.030	0.011	5.3 m
20	0.38 %	0.15 %	0.42 %	%	0.018	0.025	0.024
21	0.33 %	0.75 %	0.39 %	%	4.4 m	0.046	0.044
22	0.55 %	0.44 %	0.54 %	%	0.049	0.030	0.016

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:11 Min:56

LINE IDENTIFIER-> PT CUPTOARE (Metalica) Freq: 50.01 Hz

***** Voltage informations *****

U_ef(R)= 11.69 kV U_ef(S)= 11.60 kV U_ef(T)= 11.70 kV U_ef(H)= 0.0

U1: kns2= 6.3 m kns0= 1.4 m kns= 7.7 m rns=0.992 rnsd= 8.3 m

δUR= 0.98% δUS= 1.12% δUT= 1.11% Arm1 [V]; Arm2..23 -> %:

Arm.	U_R	U_S	U_T	U_N	U_d	U_i	U_h
1	11.69 k	11.60 k	11.70 k	0.0	11.66 k	73.93	16.13
2	0.10 %	0.05 %	0.12 %	%	4.002	8.901	4.457
3	0.43 %	0.64 %	0.64 %	%	5.619	11.64	66.23
4	0.03 %	0.03 %	0.11 %	%	5.969	2.943	4.141
5	0.57 %	0.67 %	0.63 %	%	1.831	72.41	6.380
6	0.01 %	0.02 %	0.06 %	%	2.694	1.795	2.525
7	0.21 %	0.22 %	0.17 %	%	21.37	6.252	8.151
8	0.03 %	0.02 %	0.05 %	%	2.275	1.599	3.177
9	0.17 %	0.15 %	0.17 %	%	4.866	5.254	17.69
10	0.01 %	0.04 %	0.03 %	%	1.984	2.756	1.001
11	0.47 %	0.39 %	0.46 %	%	2.962	50.90	7.178
12	0.01 %	0.02 %	0.02 %	%	1.673	1.251	1.301
13	0.19 %	0.21 %	0.18 %	%	21.04	6.705	5.470
14	0.01 %	0.01 %	0.03 %	%	1.442	1.356	1.071
15	0.15 %	0.15 %	0.08 %	%	5.322	1.272	14.30
16	0.01 %	0.01 %	0.02 %	%	1.649	0.53	0.63
17	0.07 %	0.11 %	0.06 %	%	7.055	4.546	4.712
18	0.01 %	0.02 %	0.04 %	%	1.721	1.800	1.661
19	0.08 %	0.08 %	0.09 %	%	6.874	2.770	5.901
20	0.02 %	0.01 %	0.08 %	%	3.214	2.801	3.066
21	0.06 %	0.14 %	0.11 %	%	3.490	8.256	8.911
22	0.01 %	0.02 %	0.08 %	%	2.980	3.572	3.271
23	0.15 %	0.13 %	0.08 %	%	9.077	9.743	6.080
24	0.02 %	0.04 %	0.10 %	%	4.629	2.066	5.152
25	0.14 %	0.03 %	0.07 %	%	6.748	4.443	7.308

***** Current informations *****

I_ef(R)= 12.07 A I_ef(S)= 12.47 A I_ef(T)= 11.17 A I_ef(H)= 0.0 A

I1: kns2= 0.065 kns0= 5.0 m kns= 0.070 rns=0.899 rnsd= 0.11

δIR= 10.40% δIS= 9.10% δIT= 10.54% Arm1 [A]; Arm2..23 -> %:

Arm.	I_R	I_S	I_T	I_N	I_d	I_i	I_h
1	11.94	12.35	11.10	0.0	11.78	0.76	0.059
2	0.07 %	0.21 %	0.29 %	%	0.022	8.4 m	7.1 n
3	4.14 %	1.45 %	3.07 %	%	0.066	0.13	0.33
4	1.12 %	0.86 %	0.81 %	%	0.11	3.2 m	0.029
5	2.58 %	2.25 %	2.65 %	%	0.019	0.29	0.034
6	0.21 %	0.25 %	0.32 %	%	0.012	0.015	0.024
7	6.40 %	5.96 %	6.78 %	%	0.74	0.10	0.094
8	0.43 %	0.39 %	0.72 %	%	3.7 m	0.056	0.024
9	4.31 %	4.13 %	4.55 %	%	0.042	0.046	0.51
10	0.34 %	0.31 %	0.33 %	%	0.016	0.019	0.030
11	2.84 %	2.83 %	3.09 %	%	0.070	0.33	0.059
12	0.62 %	0.34 %	0.41 %	%	0.016	7.6 m	0.053
13	0.26 %	0.27 %	0.09 %	%	7.5 m	0.022	0.014
14	0.99 %	0.19 %	0.71 %	%	0.018	0.064	0.051
15	0.25 %	0.42 %	0.22 %	%	0.026	0.025	0.012
16	0.50 %	0.27 %	0.67 %	%	0.051	0.027	6.8 n
17	1.96 %	2.00 %	2.18 %	%	0.066	0.22	0.066
18	0.44 %	0.32 %	0.52 %	%	0.026	0.010	0.042
19	0.36 %	0.24 %	0.19 %	%	0.030	0.011	5.3 n
20	0.38 %	0.15 %	0.42 %	%	0.018	0.025	0.024
21	0.33 %	0.75 %	0.39 %	%	4.4 m	0.046	0.044
22	0.55 %	0.44 %	0.54 %	%	0.049	0.030	0.016

23	0.24 %	0.49 %	0.50 %	%	0.020	0.046	3.3
24	0.27 %	0.34 %	0.55 %	%	0.021	0.030	0.028
25	1.85 %	1.70 %	1.78 %	%	0.19	0.056	0.074

TRINET - THREE PHASE NETWORK ANALYSER. - @ 1994 - TELECOMM S.R.L.

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:11 Min:48

LINE IDENTIFIER-> PT CUPTOARE (Metalica) Freq: 50.00 Hz

***** Power informations *****

P(R) = 93.51 kW	P(S) = 82.31 kW	P(T) = 77.62 kW	P_3f = 253.4 kW
Q(R) = 103.8 kVAR	Q(S) = 117.4 kVAR	Q(T) = 104.2 kVAR	Q_3f = 325.4 kVA
D(R) = 19.32 kVAD	D(S) = 19.17 kVAD	D(T) = 14.81 kVAD	D_3f = 30.99 kVA
S(R) = 141.1 kVA	S(S) = 144.7 kVA	S(T) = 130.8 kVA	S_3f = 6.62 GVA
K(R) = 0.663	K(S) = 0.569	K(T) = 0.594	K_3f = 0.613

***** Powers on different harmonics *****

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
1	93.34 k	82.10 k	77.56 k	103.8 k	117.4 k	104.2 k
3	-23.83	-11.97	-20.26	-7.906	-5.991	-15.18
5	20.63	21.44	19.57	0.84	-2.438	-8.972
7	8.421	-3.264	3.574	17.16	18.87	14.30
9	9.507	0.29	6.257	-4.413	-8.892	-7.469
11	-3.398	0.60	4.061	18.43	15.66	18.01
13	0.69	-0.53	0.21	0.11	0.64	0.064
15	0.44	-0.63	0.18	0.30	-0.62	0.15
17	-1.888	3.076	0.46	0.073	-0.82	1.607
19	-0.32	-0.22	-0.22	-0.21	0.18	1.5 m
21	-0.23	1.248	0.37	0.18	-0.76	-0.45
23	-0.51	-0.085	-0.31	-0.020	-0.93	-0.43
25	-0.28	0.51	-1.639	-3.619	0.66	0.29

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
2	0.053	0.12	-0.33	0.085	-0.058	0.29
4	-8.8 m	0.26	0.84	0.54	0.19	0.76
6	-9.0 m	-0.025	0.19	0.030	0.069	-0.14
8	0.11	0.041	-0.40	0.12	-0.10	-0.29
10	-0.024	-0.17	0.067	-0.026	0.053	-0.12
12	0.097	0.12	-0.085	6.8 m	0.016	-0.099
14	-0.029	-0.012	-0.27	-0.065	0.024	-0.12
16	-0.089	7.8 m	-0.12	0.036	0.022	0.16
18	0.013	0.060	0.17	0.076	0.042	-0.21
20	-0.075	-0.024	0.37	0.030	-4.5 m	-0.17
22	-0.030	-0.089	0.55	0.073	-0.099	0.13
24	0.059	0.085	-0.095	-0.011	0.15	-0.71
26	-0.15	-0.028	-0.65	-0.081	-0.043	0.90

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:11 Min:56

LINE IDENTIFIER-> PT CUPTOARE (Metalica) Freq: 50.01 Hz

***** Voltage informations *****

U_ef(R)= 11.69 kV U_ef(S)= 11.60 kV U_ef(T)= 11.70 kV U_ef(H)= 0.0

U_l: kns2= 6.3 m kns0= 1.4 m kns= 7.7 m rns=0.992 rnsd= 8.3 m

δUR= 0.98% δUS= 1.12% δUT= 1.11% Arm1 [V]; Arm2..23 -> %:

Arm. | U_R . U_S . U_T | U_N | U_d . U_i . U_h

Arm.	U_R	U_S	U_T	U_N	U_d	U_i	U_h
1	11.69 k	11.60 k	11.70 k	0.0	11.66 k	73.93	16.13
2	0.10 %	0.05 %	0.12 %	%	4.002	8.901	4.457
3	0.43 %	0.64 %	0.64 %	%	5.619	11.64	66.23
4	0.03 %	0.03 %	0.11 %	%	5.969	2.943	4.141
5	0.57 %	0.67 %	0.63 %	%	1.831	72.41	6.380
6	0.01 %	0.02 %	0.06 %	%	2.694	1.795	2.525
7	0.21 %	0.22 %	0.17 %	%	21.37	6.252	8.151
8	0.03 %	0.02 %	0.05 %	%	2.275	1.599	3.177
9	0.17 %	0.15 %	0.17 %	%	4.866	5.254	17.69
10	0.01 %	0.04 %	0.03 %	%	1.984	2.756	1.001
11	0.47 %	0.39 %	0.46 %	%	2.962	50.90	7.178
12	0.01 %	0.02 %	0.02 %	%	1.673	1.251	1.301
13	0.19 %	0.21 %	0.18 %	%	21.04	6.705	5.470
14	0.01 %	0.01 %	0.03 %	%	1.442	1.356	1.071
15	0.15 %	0.15 %	0.08 %	%	5.322	1.272	14.30
16	0.01 %	0.01 %	0.02 %	%	1.649	0.53	0.63
17	0.07 %	0.11 %	0.06 %	%	7.055	4.546	4.712
18	0.01 %	0.02 %	0.04 %	%	1.721	1.800	1.661
19	0.08 %	0.08 %	0.09 %	%	6.874	2.770	5.901
20	0.02 %	0.01 %	0.08 %	%	3.214	2.801	3.066
21	0.06 %	0.14 %	0.11 %	%	3.490	8.256	8.911
22	0.01 %	0.02 %	0.08 %	%	2.980	3.572	3.271
23	0.15 %	0.13 %	0.08 %	%	9.077	9.743	6.080
24	0.02 %	0.04 %	0.10 %	%	4.629	2.066	5.152
25	0.14 %	0.03 %	0.07 %	%	6.748	4.443	7.308

***** Current informations *****

I_ef(R)= 12.07 A I_ef(S)= 12.47 A I_ef(T)= 11.17 A I_ef(H)= 0.0 A

I_l: kns2= 0.065 kns0= 5.0 m kns= 0.070 rns=0.899 rnsd= 0.11

δIR= 10.40% δIS= 9.10% δIT= 10.54% Arm1 [A]; Arm2..23 -> %:

Arm. | I_R . I_S . I_T | I_N | I_d . I_i . I_h

Arm.	I_R	I_S	I_T	I_N	I_d	I_i	I_h
1	11.94	12.35	11.10	0.0	11.78	0.76	0.059
2	0.07 %	0.21 %	0.29 %	%	0.022	8.4 m	7.1 n
3	4.14 %	1.45 %	3.07 %	%	0.066	0.13	0.33
4	1.12 %	0.86 %	0.81 %	%	0.11	3.2 m	0.029
5	2.58 %	2.25 %	2.65 %	%	0.019	0.29	0.034
6	0.21 %	0.25 %	0.32 %	%	0.012	0.015	0.024
7	6.40 %	5.96 %	6.78 %	%	0.74	0.10	0.094
8	0.43 %	0.39 %	0.72 %	%	3.7 m	0.056	0.024
9	4.31 %	4.13 %	4.55 %	%	0.042	0.046	0.51
10	0.34 %	0.31 %	0.33 %	%	0.016	0.019	0.030
11	2.84 %	2.83 %	3.09 %	%	0.070	0.33	0.059
12	0.62 %	0.34 %	0.41 %	%	0.016	7.6 m	0.053
13	0.26 %	0.27 %	0.09 %	%	7.5 m	0.022	0.014
14	0.99 %	0.19 %	0.71 %	%	0.018	0.064	0.051
15	0.25 %	0.42 %	0.22 %	%	0.026	0.025	0.012
16	0.50 %	0.27 %	0.67 %	%	0.051	0.027	6.8 n
17	1.96 %	2.00 %	2.18 %	%	0.066	0.22	0.066
18	0.44 %	0.32 %	0.52 %	%	0.026	0.010	0.042
19	0.36 %	0.24 %	0.19 %	%	0.030	0.011	5.3 n
20	0.38 %	0.15 %	0.42 %	%	0.018	0.025	0.024
21	0.33 %	0.75 %	0.39 %	%	4.4 m	0.046	0.044
22	0.55 %	0.44 %	0.54 %	%	0.049	0.030	0.016

23	0.24 %	0.49 %	0.50 %	%	0.020	0.046	3.1
24	0.27 %	0.34 %	0.55 %	%	0.021	0.030	0.028
25	1.85 %	1.70 %	1.78 %	%	0.19	0.056	0.074

TRINET - THREE PHASE NETWORK ANALYSER. - @ 1994 - TELECOMM S.R.L.

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:11 Min:56

LINE IDENTIFIER-> PT CUPTOARE (Metalica) Freq: 50.01 Hz

***** Power informations *****

P(R)= 93.51 kW P(S)= 82.31 kW P(T)= 77.62 kW P_3f= 253.4 kW
Q(R)= 103.8 kVAR Q(S)= 117.4 kVAR Q(T)= 104.2 kVAR Q_3f= 325.4 kVAR
D(R)= 19.32 kVAD D(S)= 19.17 kVAD D(T)= 14.81 kVAD D_3f= 30.99 kVAR
S(R)= 141.1 kVA S(S)= 144.7 kVA S(T)= 130.8 kVA S_3f= 6.62 GVA
K(R)=0.663 K(S)=0.569 K(T)=0.594 K_3f=0.613

***** Powers on different harmonics *****

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
1	93.34 k	82.10 k	77.56 k	103.8 k	117.4 k	104.2 k
3	-23.83	-11.97	-20.26	-7.906	-5.991	-15.18
5	20.63	21.44	19.57	0.84	-2.438	-8.972
7	8.421	-3.264	3.574	17.16	18.87	14.30
9	9.507	0.29	6.257	-4.413	-8.892	-7.469
11	-3.398	0.60	4.061	18.43	15.66	18.01
13	0.69	-0.53	0.21	0.11	0.64	0.064
15	0.44	-0.63	0.18	0.30	-0.62	0.15
17	-1.888	3.076	0.46	0.073	-0.82	1.607
19	-0.32	-0.22	-0.22	-0.21	0.18	1.5 m
21	-0.23	1.248	0.37	0.18	-0.76	-0.45
23	-0.51	-0.085	-0.31	-0.020	-0.93	-0.43
25	-0.28	0.51	-1.639	-3.619	0.66	0.29

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
2	0.053	0.12	-0.33	0.085	-0.058	0.29
4	-8.8 m	0.26	0.84	0.54	0.19	0.76
6	-9.0 m	-0.025	0.19	0.030	0.069	-0.14
8	0.11	0.041	-0.40	0.12	-0.10	-0.29
10	-0.024	-0.17	0.067	-0.026	0.053	-0.12
12	0.097	0.12	-0.085	6.8 m	0.016	-0.099
14	-0.029	-0.012	-0.27	-0.065	0.024	-0.12
16	-0.089	7.8 m	-0.12	0.036	0.022	0.16
18	0.013	0.060	0.17	0.076	0.042	-0.21
20	-0.075	-0.024	0.37	0.030	-4.5 m	-0.17
22	-0.030	-0.089	0.55	0.073	-0.099	0.13
24	0.059	0.085	-0.095	-0.011	0.15	-0.71
26	-0.15	-0.028	-0.65	-0.081	-0.043	0.90

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:10 Min:40

LINE IDENTIFIER-> PT ACCESORII (Metalica) Freq: 50.00 Hz

***** Voltage informations *****

U_ef(R)= 11.93 kV U_ef(S)= 11.79 kV U_ef(T)= 12.11 kV U_ef(H)= 0.0

U1: kns2= 6.0 m kns0= 9.9 m kns= 0.016 rns=0.974 rnsd= 0.026

δUR= 1.31% δUS= 1.53% δUT= 1.12% Arm1 [V]; Arm2..23 -> %:

Arm.	U_R	U_S	U_T	U_N	U_d	U_i	U_h
1	11.93 k	11.79 k	12.11 k	0.0	11.94 k	71.26	117.7
2	0.06 %	0.05 %	0.04 %	%	4.167	2.825	3.270
3	1.09 %	1.19 %	0.62 %	%	45.08	7.894	109.1
4	0.04 %	0.06 %	0.06 %	%	1.128	5.947	2.132
5	0.56 %	0.84 %	0.79 %	%	4.229	85.53	21.48
6	0.03 %	0.02 %	0.04 %	%	3.318	1.208	0.76
7	0.12 %	0.06 %	0.26 %	%	17.29	6.554	8.886
8	0.00 %	0.02 %	0.04 %	%	2.252	0.50	1.758
9	0.18 %	0.12 %	0.24 %	%	2.168	12.39	18.61
10	0.06 %	0.01 %	0.04 %	%	2.682	3.994	0.73
11	0.24 %	0.21 %	0.23 %	%	9.637	23.48	9.826
12	0.05 %	0.03 %	0.05 %	%	4.478	3.030	1.423
13	0.08 %	0.23 %	0.05 %	%	13.08	8.137	7.602
14	0.01 %	0.03 %	0.03 %	%	0.42	2.062	2.409
15	0.03 %	0.13 %	0.11 %	%	7.653	3.672	7.906
16	0.04 %	0.05 %	0.02 %	%	1.618	3.885	1.938
17	0.21 %	0.07 %	0.11 %	%	10.38	11.25	7.533
18	0.03 %	0.02 %	0.03 %	%	1.648	2.974	0.33
19	0.12 %	0.12 %	0.07 %	%	8.298	7.926	5.180
20	0.02 %	0.05 %	0.02 %	%	2.991	1.322	1.649
21	0.03 %	0.13 %	0.07 %	%	6.214	7.464	2.420
22	0.03 %	0.04 %	0.03 %	%	2.564	2.905	1.435
23	0.13 %	0.08 %	0.06 %	%	5.256	8.886	5.221
24	0.03 %	0.05 %	0.02 %	%	3.265	2.060	1.208
25	0.08 %	0.10 %	0.08 %	%	4.801	8.358	2.955

***** Current informations *****

I_ef(R)= 46.11 A I_ef(S)= 51.90 A I_ef(T)= 48.45 A I_ef(H)= 0.0

I1: kns2= 0.066 kns0= 6.4 m kns= 0.072 rns=0.889 rnsd= 0.12

δIR= 5.54% δIS= 5.91% δIT= 6.00% Arm1 [A]; Arm2..23 -> %:

Arm.	I_R	I_S	I_T	I_N	I_d	I_i	I_h
1	46.03	51.80	48.35	0.0	48.68	3.210	0.31
2	0.54 %	0.65 %	0.85 %	%	0.33	0.084	0.022
3	1.19 %	2.58 %	2.35 %	%	1.002	0.19	0.30
4	0.19 %	0.19 %	0.17 %	%	0.061	0.058	0.033
5	4.91 %	4.95 %	5.14 %	%	0.29	2.419	0.12
6	0.13 %	0.10 %	0.26 %	%	0.079	0.026	0.025
7	1.10 %	0.40 %	0.50 %	%	0.32	0.098	0.092
8	0.44 %	0.24 %	0.06 %	%	0.093	0.099	0.030
9	1.35 %	0.97 %	0.96 %	%	0.11	0.100	0.51
10	0.12 %	0.16 %	0.13 %	%	0.066	0.019	4.0
11	0.73 %	1.12 %	0.82 %	%	0.12	0.42	0.11
12	0.11 %	0.17 %	0.31 %	%	0.054	0.031	0.083
13	0.50 %	0.47 %	0.65 %	%	0.23	0.086	0.10
14	0.12 %	0.19 %	0.26 %	%	5.7 m	0.092	0.033
15	0.27 %	0.12 %	0.09 %	%	0.036	0.054	0.056
16	0.10 %	0.07 %	0.24 %	%	0.036	0.047	0.048
17	0.18 %	0.24 %	0.06 %	%	0.062	0.035	0.050
18	0.29 %	0.01 %	0.10 %	%	0.028	0.054	0.054
19	0.23 %	0.18 %	0.29 %	%	0.10	0.043	0.032
20	0.16 %	0.03 %	0.22 %	%	0.045	0.027	0.054
21	0.05 %	0.14 %	0.06 %	%	0.030	0.027	0.025
22	0.14 %	0.07 %	0.14 %	%	0.018	0.035	0.043

23	0.07 %	0.23 %	0.14 %	%	0.038	0.056	0.0
24	0.08 %	0.18 %	0.06 %	%	0.025	0.053	0.0
25	0.14 %	0.20 %	0.09 %	%	0.037	0.046	0.0

TRINET - THREE PHASE NETWORK ANALYSER. - @ 1994 - TELECOMM S.R.L.

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:10 Min:40

LINE IDENTIFIER-> PT ACCESORII (Metalica) Freq: 50.00 Hz

***** Power informations *****

P(R)=-232.6 kW	P(S)=-244.7 kW	P(T)=-190.0 kW	P_3f=-667.3 k
Q(R)=-497.3 kVAR	Q(S)=-559.6 kVAR	Q(T)=-553.5 kVAR	Q_3f=-1.610 M
D(R)= 33.97 kVAD	D(S)= 41.26 kVAD	D(T)= 41.82 kVAD	D_3f= 67.86 k
S(R)= 550.0 kVA	S(S)= 612.1 kVA	S(T)= 586.7 kVA	S_3f= 27.9 C
K(R)=-0.423	K(S)=-0.400	K(T)=-0.324	K_3f=-0.383

***** Powers on different harmonics *****

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
1	-232.7 k	-244.8 k	-190.2 k	-497.3 k	-559.6 k	-553.7 k
3	-61.64	51.48	74.06	-35.50	-179.4	43.24
5	78.00	66.35	192.2	130.5	245.1	137.9
7	-4.491	-1.408	-5.972	-5.606	- 0.22	-4.973
9	10.79	-4.901	-7.556	-8.345	-5.221	-11.05
11	4.275	-7.231	-10.27	-8.580	-12.51	-4.152
13	-2.187	-6.141	1.260	0.26	2.668	1.327
15	0.39	0.51	- 0.11	0.34	0.82	0.55
17	1.931	- 0.74	- 0.10	0.68	- 0.73	- 0.36
19	1.164	- 0.38	- 0.80	- 0.99	-1.261	0.93
21	0.078	-1.080	- 0.16	-0.026	0.21	- 0.18
23	- 0.32	0.94	0.066	0.41	- 0.59	- 0.53
25	0.60	- 0.23	0.10	- 0.17	1.135	0.37

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
2	0.25	- 0.63	-1.783	-1.855	-1.713	0.70
4	- 0.39	- 0.70	0.26	1.1 m	-0.049	- 0.54
6	- 0.19	- 0.12	- 0.50	0.062	0.048	- 0.33
8	-0.078	- 0.30	0.10	0.037	0.13	0.052
10	0.25	-0.063	0.14	- 0.26	- 2.6 m	0.31
12	0.27	-0.076	- 0.65	0.11	- 0.36	0.70
14	0.018	- 0.32	- 0.28	-0.035	0.15	0.44
16	0.22	-0.033	-0.077	0.084	0.20	- 0.33
18	0.42	- 2.1 m	- 0.14	- 0.35	6.2 m	- 0.12
20	0.097	0.095	0.022	- 0.10	5.3 m	0.20
22	0.023	0.013	0.29	0.21	0.17	0.027
24	- 0.12	- 0.40	0.043	0.039	- 0.35	0.044
26	- 5.7 m	0.24	0.23	- 0.14	0.14	9.8 m

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:10 Min:50

LINE IDENTIFIER-> PT ACCESORII (Metalica) Freq: 50.03 Hz

***** Voltage informations *****

U_ef(R)= 11.69 kV U_ef(S)= 11.60 kV U_ef(T)= 11.70 kV U_ef(H)= 0.0 V

U1: kns2= 6.3 m kns0= 1.4 m kns= 7.7 m rns=0.992 rnsd= 8.3 m

δUR= 0.98% δUS= 1.12% δUT= 1.11% Arm1 [V]; Arm2..23 -> %:

Arm.	U_R	U_S	U_T	U_N	U_d	U_i	U_h
1	11.69 k	11.60 k	11.70 k	0.0	11.66 k	73.93	16.13
2	0.10 %	0.05 %	0.12 %	%	4.002	8.901	4.457
3	0.43 %	0.64 %	0.64 %	%	5.619	11.64	66.23
4	0.03 %	0.03 %	0.11 %	%	5.969	2.943	4.141
5	0.57 %	0.67 %	0.63 %	%	1.831	72.41	6.380
6	0.01 %	0.02 %	0.06 %	%	2.694	1.795	2.525
7	0.21 %	0.22 %	0.17 %	%	21.37	6.252	8.151
8	0.03 %	0.02 %	0.05 %	%	2.275	1.599	3.177
9	0.17 %	0.15 %	0.17 %	%	4.866	5.254	17.69
10	0.01 %	0.04 %	0.03 %	%	1.984	2.756	1.001
11	0.47 %	0.39 %	0.46 %	%	2.962	50.90	7.178
12	0.01 %	0.02 %	0.02 %	%	1.673	1.251	1.301
13	0.19 %	0.21 %	0.18 %	%	21.04	6.705	5.470
14	0.01 %	0.01 %	0.03 %	%	1.442	1.356	1.071
15	0.15 %	0.15 %	0.08 %	%	5.322	1.272	14.30
16	0.01 %	0.01 %	0.02 %	%	1.649	0.53	0.63
17	0.07 %	0.11 %	0.06 %	%	7.055	4.546	4.712
18	0.01 %	0.02 %	0.04 %	%	1.721	1.800	1.661
19	0.08 %	0.08 %	0.09 %	%	6.874	2.770	5.901
20	0.02 %	0.01 %	0.08 %	%	3.214	2.801	3.066
21	0.06 %	0.14 %	0.11 %	%	3.490	8.256	8.911
22	0.01 %	0.02 %	0.08 %	%	2.980	3.572	3.271
23	0.15 %	0.13 %	0.08 %	%	9.077	9.743	6.080
24	0.02 %	0.04 %	0.10 %	%	4.629	2.066	5.152
25	0.14 %	0.03 %	0.07 %	%	6.748	4.443	7.308

***** Current informations *****

I_ef(R)= 12.07 A I_ef(S)= 12.47 A I_ef(T)= 11.17 A I_ef(H)= 0.0 A

I1: kns2= 0.065 kns0= 5.0 m kns= 0.070 rns=0.899 rnsd= 0.11

δIR= 10.40% δIS= 9.10% δIT= 10.54% Arm1 [A]; Arm2..23 -> %:

Arm.	I_R	I_S	I_T	I_N	I_d	I_i	I_h
1	11.94	12.35	11.10	0.0	11.78	0.76	0.059
2	0.07 %	0.21 %	0.29 %	%	0.022	8.4 m	7.1 m
3	4.14 %	1.45 %	3.07 %	%	0.066	0.13	0.33
4	1.12 %	0.86 %	0.81 %	%	0.11	3.2 m	0.029
5	2.58 %	2.25 %	2.65 %	%	0.019	0.29	0.034
6	0.21 %	0.25 %	0.32 %	%	0.012	0.015	0.024
7	6.40 %	5.96 %	6.78 %	%	0.74	0.10	0.094
8	0.43 %	0.39 %	0.72 %	%	3.7 m	0.056	0.024
9	4.31 %	4.13 %	4.55 %	%	0.042	0.046	0.51
10	0.34 %	0.31 %	0.33 %	%	0.016	0.019	0.030
11	2.84 %	2.83 %	3.09 %	%	0.070	0.33	0.059
12	0.62 %	0.34 %	0.41 %	%	0.016	7.6 m	0.053
13	0.26 %	0.27 %	0.09 %	%	7.5 m	0.022	0.014
14	0.99 %	0.19 %	0.71 %	%	0.018	0.064	0.051
15	0.25 %	0.42 %	0.22 %	%	0.026	0.025	0.012
16	0.50 %	0.27 %	0.67 %	%	0.051	0.027	6.8 m
17	1.96 %	2.00 %	2.18 %	%	0.066	0.22	0.066
18	0.44 %	0.32 %	0.52 %	%	0.026	0.010	0.042
19	0.36 %	0.24 %	0.19 %	%	0.030	0.011	5.3 m
20	0.38 %	0.15 %	0.42 %	%	0.018	0.025	0.024
21	0.33 %	0.75 %	0.39 %	%	4.4 m	0.046	0.044
22	0.55 %	0.44 %	0.54 %	%	0.049	0.030	0.016

23	0.24 %	0.49 %	0.50 %	%	0.020	0.046	3.3
24	0.27 %	0.34 %	0.55 %	%	0.021	0.030	0.028
25	1.85 %	1.70 %	1.78 %	%	0.19	0.056	0.074

TRINET - THREE PHASE NETWORK ANALYSER. - @ 1994 - TELECOMM S.R.L.

User: F.R.E. ORADEA V3.3

DATA-> An:1998 Luna:10 Zi: 5 Ora:10 Min:50

LINE IDENTIFIER-> PT ACCESORII (Metalica) Freq: 50.03 Hz

***** Power informations *****

P(R)= 93.51 kW	P(S)= 82.31 kW	P(T)= 77.62 kW	P _{3f} = 253.4 kW
Q(R)= 103.8 kVAR	Q(S)= 117.4 kVAR	Q(T)= 104.2 kVAR	Q _{3f} = 325.4 kV
D(R)= 19.32 kVAD	D(S)= 19.17 kVAD	D(T)= 14.81 kVAD	D _{3f} = 30.99 kV
S(R)= 141.1 kVA	S(S)= 144.7 kVA	S(T)= 130.8 kVA	S _{3f} = 6.62 GV
K(R)=0.663	K(S)=0.569	K(T)=0.594	K _{3f} =0.613

***** Powers on different harmonics *****

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
1	93.34 k	82.10 k	77.56 k	103.8 k	117.4 k	104.2 k
3	-23.83	-11.97	-20.26	-7.906	-5.991	-15.18
5	20.63	21.44	19.57	0.84	-2.438	-8.972
7	8.421	-3.264	3.574	17.16	18.87	14.30
9	9.507	0.29	6.257	-4.413	-8.892	-7.469
11	-3.398	0.60	4.061	18.43	15.66	18.01
13	0.69	-0.53	0.21	0.11	0.64	0.064
15	0.44	-0.63	0.18	0.30	-0.62	0.15
17	-1.888	3.076	0.46	0.073	-0.82	1.607
19	-0.32	-0.22	-0.22	-0.21	0.18	1.5 m
21	-0.23	1.248	0.37	0.18	-0.76	-0.45
23	-0.51	-0.085	-0.31	-0.020	-0.93	-0.43
25	-0.28	0.51	-1.639	-3.619	0.66	0.29

Arm	P(R) [W]	P(S) [W]	P(T) [W]	Q(R) [VAR]	Q(S) [VAR]	Q(T) [VAR]
2	0.053	0.12	-0.33	0.085	-0.058	0.29
4	-8.8 m	0.26	0.84	0.54	0.19	0.76
6	-9.0 m	-0.025	0.19	0.030	0.069	-0.14
8	0.11	0.041	-0.40	0.12	-0.10	-0.29
10	-0.024	-0.17	0.067	-0.026	0.053	-0.12
12	0.097	0.12	-0.085	6.8 m	0.016	-0.099
14	-0.029	-0.012	-0.27	-0.065	0.024	-0.12
16	-0.089	7.8 m	-0.12	0.036	0.022	0.16
18	0.013	0.060	0.17	0.076	0.042	-0.21
20	-0.075	-0.024	0.37	0.030	-4.5 m	-0.17
22	-0.030	-0.089	0.55	0.073	-0.099	0.13
24	0.059	0.085	-0.095	-0.011	0.15	-0.71
26	-0.15	-0.028	-0.65	-0.081	-0.043	0.90