

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

Ing. Iona BUCATARIU

TEZĂ DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL COMPENSĂRII SERIE
A REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE**

Conducător științific: Prof.dr.ing. Viorel NEGRU

BIBLIOTECA
In. volum 644.699
369 E

TIMIȘOARA 2004

CUPRINS

Cap. 1. INTRODUCERE	3
Cap. 2. COMPENSAREA CAPACITIVĂ SERIE A REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE. PROBLEME GENERALE	7
2.1. Considerații teoretice	8
2.2. Eficiența compensării capacitive serie la reglajul tensiunii în rețele de medie tensiune.....	15
2.3. Rolul compensării capacitive în creșterea stabilității de tensiune a liniilor	19
2.4. Fenomene perturbatoare în funcționarea rețelelor cu compensare serie	25
2.5. Concluzii.....	27
Cap. 3. PROBLEMELE COMPENSĂRII SERIE A REȚELELOR DE MEDIE TENSIUNE	28
3.1. Introducere.....	28
3.2. Stabilirea locului de amplasare și valorii reactanței bateriei de condensatoare serie.....	29
3.2.1. Linia cu sarcini uniform distribuite.....	30
3.2.2. Linie cu sarcini uniform distribuite pentru care compensarea este realizată prin două baterii de condensatoare	32
3.2.3. Linia cu sarcini distribuite liniar	35
3.2.4. Linie cu sarcini concentrate repartizate în lungul liniei	37
3.2.4.1. Linie radială cu un singur consumator	37
3.2.4.2. Linie radială cu mai mulți consumatori	38
3.2.5. Influența caracteristicilor statice ale consumatorilor asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei condensatoare	43
3.2.5.1. Caracteristici statice de tensiune ale consumatorilor.....	43
3.2.5.2. Determinarea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare.....	44
3.3. Aspecte privind protecția bateriei de condensatoare	46
3.4. Reglarea reactanței bateriei de condensatoare.....	50
3.4.1. Condensator serie controlat cu tiristoare GTO.....	51
3.4.2. Condensatorul serie comutat cu tiristoare (TSSC)	55
3.4.3. Condensatorul controlat cu tiristoare TCSC	55
3.6. Concluzii.....	58
Cap. 4. COMPORTAREA REȚELELOR PREVĂZUTE CU COMPENSARE SERIE ȘI PARALEL ÎN CONDIȚIILE POLUĂRII ARMONICE	60
4.1. Introducere.....	60

4.2. Probleme generale ale regimului nesinusoidal.....	60
4.2.1. Indicatori de apreciere a regimului nesinusoidal.....	61
4.2.2. Efectele regimului deformant.....	62
4.3. Răspunsul în frecvență al bateriei de condensatoare.....	65
4.4. Modelarea armonică a elementelor de rețea.....	67
4.5. Calculul circulației curenților armonici și a căderilor de tensiune.....	74
4.6. Aplicații.....	77
4.6.1. Studiul propagării armonicilor superioare în rețele cu compensare serie.....	77
4.6.2. Studiul propagării subarmonicilor în rețelele prevăzută cu compensare capacitivă serie.....	91
4.6.3. Studiu de caz privind influența compensării serie și paralel asupra propagării poluării armonice în rețele electrice cu mai surse de poluare.....	96
4.7. Concluzii.....	100
Cap. 5. SUPRATENSIUNI INTERNE ÎN REȚELELE DE MEDIE TENSIUNE COMPENSATE LONGITUDINAL.....	104
5.1. Modelarea elementelor de rețea pentru calculul supratensiunilor.....	104
5.2. Supratensiuni pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric.....	105
5.2.1. Bateria de condensatoare amplasată în stația de transformare.....	106
5.2.2. Bateria de condensatoare amplasată într-un post de transformare.....	109
5.2.3. Influența inductivității sursei.....	112
5.2.4. Determinarea supratensiunilor pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric prin modelare în ATP.....	115
5.3. Determinarea analitică a supratensiunilor la un defect monofazat.....	116
5.3.1. Analiza regimului stabilizat la un defect monofazat într-o rețea prevăzută cu compensare longitudinală.....	117
5.3.2. Analiza regimului tranzitoriu la un defect monofazat într-o rețea prevăzută cu compensare serie.....	118
5.3.3. Rețele cu neutrul izolat.....	120
5.3.4. Rețele cu neutrul tratat prin rezistor.....	123
5.4. Concluzii.....	126
Cap. 6. SIMULĂRI ȘI DETERMINĂRI EXPERIMENTALE.....	128
6.1. Determinări experimentale în laborator.....	128
6.2. Măsurători în rețea.....	141
6.3. Simulări în ATP.....	144
6.4. Concluzii.....	151
Cap. 7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII.....	153
BIBLIOGRAFIE.....	158
ANEXE	

Capitolul 1

INTRODUCERE

Schimbările produse în ultimii ani în societatea noastră datorate dispersărilor sarcinilor concentrate până nu de mult în zone industriale, au condus la solicitări mai mari ale rețelelor de medie și joasă tensiune atât sub aspectul încărcării, al pierderilor de putere, cât și al celor de tensiune. La acestea se adaugă și mutațiile survenite în domeniul receptoarelor de energie electrică. Acestea, cum este și firesc includ tot mai multe elemente de electronică de putere și informatice, sensibile la calitatea energiei electrice, dar și veritabile generatoare de noncalitate, mai ales dacă sunt racordate la noduri de rețea cu nivel de scurcircuit redus, noduri ce sunt reprezentative pentru rețelele de medie și joasă tensiune.

Toate acestea pun noi probleme sau le readuc pe cele vechi, dar sub o altă formă, la conceperea, dezvoltarea și conducerea rețelelor electrice de distribuție.

În aceste condiții, acționează însă tot mai pregnant economia de piață, care presupune vis a vis de pretențiile și dezvoltarea consumatorilor și clauze contractuale mai ferme și deci obligații suplimentare pentru furnizor. Furnizorul va căuta prin toate mijloacele să mărească calitatea serviciului de alimentare cu energie electrică a consumatorilor, asigurând creșterea capacităților de transfer, elasticitatea în realizarea schemelor de funcționare, reglarea nivelului de tensiune, reducerea circulațiilor de putere reactivă, conducerea echipamentelor componente, telemecanizarea și automatizarea comutărilor în rețea etc. [DM99], [PO04].

Una din activitățile esențiale desfășurate și la nivelul rețelelor de distribuție este reglarea tensiunii și ea se desfășoară cu scopul menținerii tensiunii în nodurile consumatoare la valori cât mai apropiate de cele stabilite. Dintre mijloacele de reglare sunt cunoscute: comutarea ploturilor la transformatoarele din stații și posturi de transformare, compensarea locală a puterii reactive și nu în ultimul rând compensarea serie a liniilor electrice [C6], [C34]. Folosită timid la nivel de medie și joasă tensiune până în prezent, ea devine foarte atractivă în condițiile performanțelor pe care le au dobândit actualmente bateriile de condensatoare încadrate în sisteme de comandă și protecție complexe, conduse de tehnici sofisticate de inteligență artificială [CL00].

În sensul celor prezentate mai sus, lucrarea de față și-a propus să se constituie într-o pledoarie pentru promovarea compensării capacitive serie în rețelele de medie și chiar joasă tensiune “lungi”, asigurând creșterea performanțelor acestora și asigurarea calității tensiunii, element cheie în întreaga activitate de asigurare a calității energiei electrice. Cu această ocazie s-au evidențiat problemele specifice acestei metode de compensare și s-au stabilit metodologii și tehnici utile pentru soluționarea lor

De menționat că lucrarea de doctorat este rezultatul unei activități de cercetare desfășurată de autoare în cadrul colectivului de Rețele electrice de la Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică Timișoara. Această activitate s-a desfășurat în etape de cercetare și a cuprins elaborarea și apoi publicarea sau comunicarea unor lucrări științifice. Direcțiile de cercetare fiind axate pe:

- stabilirea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare serie prin utilizarea indicatorilor integrali de calitate a tensiunii [BB97], [BB02];
- studiul propagării poluării armonice în rețelele electrice de transport și distribuție prevăzute cu compensare [B99], [B99], [BB00], [BP01], [BB01];
- analiza influenței compensării capacitive serie a rețelelor de medie tensiune asupra funcționării protecțiilor de distanță [B98];

- modelarea transformatorului ținând seama de caracteristicile circuitului magnetic în programul PSPICE [CC99];
- calculul supratensiunilor de comutație în rețelele electrice de distribuție prevăzute cu compensare serie, întocmirea unui program de calcul a supratensiunilor determinate de conectare și deconectare bateriei de condensatoare [B98].

Lucrarea este structurată pe șapte capitole și 6 anexe, a căror probleme se prezintă sintetic în figura 1.1.

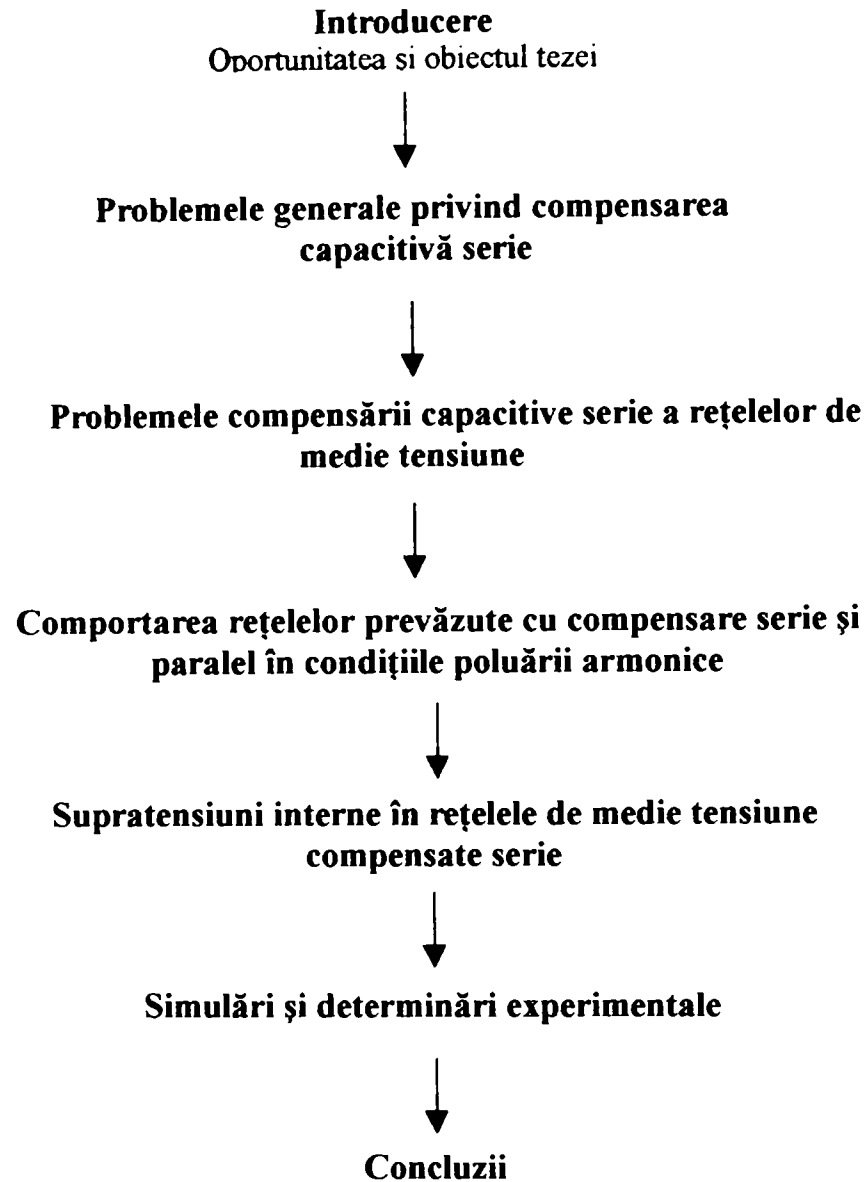


Fig. 1.1. Reprezentarea schematică a logicii organizării tezei de doctorat

În capitolul unu, capitol introductiv se justifică oportunitatea cercetării prezentată în teză și se trece în revistă pe scurt conținutul lucrării.

În capitolul al doilea se prezintă problematica compensării capacitive serie a rețelelor de medie tensiune cu evidențierea efectelor compensării asupra funcționării rețelelor electrice. De asemenea, este evidențiat rolul bateriei de condensatoare serie în îmbunătățirea calității tensiunii. Este realizat un studiu comparativ între compensarea capacitivă serie și cea derivație privind eficiența acestora în problemele de reglare a tensiunii și îmbunătățirea profilului acesteia în nodurile de consum. Totodată, se evidențiază rolul compensării capacitive serie asupra creșterii stabilității tensiunii în nodurile de consum. În ultima parte a acestui capitol sunt prezentate fenomenele perturbatoare în funcționarea rețelele de distribuție datorate prezenței bateriei de condensatoare serie.

Capitolul al treilea tratează problemele care apar la compensarea capacitivă a rețelelor de medie tensiune legate de stabilirea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare. În acest sens, este prezentată metoda de determinare a locului optim de amplasare a bateriei de condensatoare și a valorii reactanței acesteia, folosind indicatorii integrali de calitate a tensiunii, astfel încât profilul tensiunii în lungul liniei este îmbunătățit și sunt respectate condițiile de restricție privind abaterile tensiunilor în noduri. S-au considerat diferite moduri de repartiție ale sarcinilor: uniform distribuite, distribuite liniar și concentrate. De asemenea, s-a analizat influența caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare serie. În partea a doua a capitolului sunt prezentate schemele de protecție a bateriei de condensatoare împotriva supratensiunilor determinate de defecte exterioare și interioare și câteva aspecte privind reglarea automată a reactanței bateriei utilizând dispozitive bazate pe electronica de putere.

În capitolul al patrulea se analizează comportarea rețelelor de medie tensiune prevăzute cu compensare capacitivă serie și paralel în condițiile poluării armonice. La începutul capitolului sunt prezentate problemele generale ale regimului nesinusoidal: indicatorii de apreciere și efectele negative ale acestuia asupra performanțelor rețelelor electrice. De asemenea sunt prezentate modelele armonice ale elementelor de rețea și ipotezele simplificatoare adoptate pentru calculul circulației curenților armonici și ale căderilor de tensiune. În partea a doua a capitolului sunt prezentate două metode de calcul a impedanței armonice a rețelei și a coeficienților de transfer: metoda scanării frecvenței și metoda tensiunilor în noduri. Metoda scanării frecvenței s-a folosit pentru a evidenția efectul compensării capacitive serie și derivație asupra fenomenului de propagare armonice în domeniul suprasincron și subsincron. În acest sens, s-au determinat expresiile impedanțelor armonice și ale coeficienților de transfer, analizându-se efectul poluării armonice produsă de consumatorul neliniar asupra instalațiilor de compensare serie și derivație, a consumatorului liniar cât și asupra sistemului. De asemenea, s-a analizat și influența modului de reprezentare a consumatorului liniar asupra legii de variație și a valorilor impedanțelor armonice și a coeficienților de transfer. Consumatorul deformant s-a considerat ca o sursă de tensiune constantă pe armonica k . Metoda tensiunilor în noduri s-a folosit pentru calculul curenților și tensiunilor armonice în rețele cu mai multe surse de poluare armonică, evidențiindu-se efectul acestora asupra instalațiilor de compensare și a consumatorilor liniari.

În capitolul al cincilea se prezintă problematica determinării supratensiunilor pe bateria de condensatoare în cazul defectelor în rețea. În acest scop, la începutul capitolului sunt prezentate câteva aspecte privind modelarea elementelor de rețea în calculul supratensiunilor și metode de calcul a supratensiunilor. Apoi, sunt prezentate modelele matematice de calcul a supratensiunilor pe bateria de condensatoare la scurtcircuite simetrice când bateria de condensatoare este amplasată în stația de transformare, respectiv într-un post de transformare în lungul liniei. Rezultatele obținute folosind aceste modele matematice sunt comparate cu cele rezultate prin utilizarea programelor ATP-EMPT. În partea a doua a capitolului se analizează influența bateriei de condensatoare serie asupra valorilor supratensiunilor în rețelele prevăzute cu compensare serie, cauzate de defecte monofazate. În acest sens, s-a stabilit modele matematice de determinare a supratensiunilor în rețelele electrice cu neutrul izolat și cu neutrul tratat prin rezistor de limitare.

În capitolul al șaselea sunt prezentate rezultatele obținute prin măsurători și determinări experimentale, precum și cele rezultate din simulări efectuate în ATP, prelucrarea acestora și unele concluzii ce se desprind din analiza lor. Determinările experimentale s-au efectuat în laborator pe un model de rețea și pe o linie electrică de $20kV$ a SC. ELECTRICA SA. Pentru ordonarea determinărilor de la bun început s-a prezentat programul de măsurători și problemele ce s-au urmărit în cadrul fiecăreia.

Capitolul șapte prezintă concluziile principale ale lucrării, precum și contribuțiile aduse de autoare.

Bibliografia care a stat la baza întocmirii acestei lucrări cuprinde 38 tratate, cursuri universitare românești și străine, 57 articole științifice și 7 normative și standarde. Dintre acestea 10 au ca autor sau coautor pe autoarea tezei.

În încheierea acestui capitol introductiv doresc să mulțumesc conducătorului științific domnului prof.dr.ing. Viorel Negru pentru sprijinul acordat, înțelegere și încurajările pe durata elaborării tezei.

Totodată, mulțumesc domnului prof.dr.ing. Buta Adrian care mi-a sugerat tema tezei și care pe durata elaborării ei m-a îndrumat, fiindu-mi alături cu sfaturi competente, observații și încurajări.

Țin să le mulțumesc colegilor din cadrul Catedra de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică Timișoara pentru sprijinul acordat pe durata elaborării tezei, pentru sugestii și observații. De asemenea, mulțumesc domnului șl.dr.ing Vuc Gheorghe care mi-a oferit posibilitatea de a utiliza pachetul de programe ATP pentru verificarea modelor matematice de calculul a supratensiunilor.

Doresc să le mulțumesc colegilor de la societățile ELECTRICA SA și TRANSELECTRICA SA Timișoara, și în special domnilor directori ing.dr. Livius Milea și ing. Nicolae Chiosa pentru sprijinul acordat în efectuarea măsurărilor și determinărilor experimentale.

Capitolul 2

COMPENSAREA CAPACITIVĂ SERIE A REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE. PROBLEME GENERALE

În ultimii ani, datorită extinderii echipamentelor electronice în toate domeniile, s-a intensificat interesul, atât al furnizorului de energie electrică cât și a consumatorului, privind calitatea energiei electrice. Majoritatea aparatelor și instalațiilor electrice noi conțin controlere bazate pe microprocesoare și echipamente electronice de putere, care sunt sensibile la perturbațiile care apar în rețeaua de alimentare. Perturbațiile electromagnetice care pot să apară și să afecteze calitatea energiei electrice furnizate consumatorului sunt, [C16], [C27], [S3]:

- variațiile frecvenței rețelei de alimentare,
- variațiile lente ale tensiunii,
- variațiile de scurtă durată ale tensiunii (întreruperi, goluri de tensiune, creșteri ale tensiunii),
- tensiunile de impuls și supratensiunile de scurtă durată,
- dezechilibrul tensiunilor trifazate,
- distorsiuni ale curbei tensiunii și curentului (armonici, interarmonici, zgomot),
- fluctuații ale tensiunii (flicker).

Aceste perturbații au diferite efecte defavorabile asupra receptoarelor electrice, conducând la întreruperi ale proceselor tehnologice cu pierderi considerabile, micșorarea duratei de viață a acestora, unele perturbații în funcționarea lor etc.

Abaterrea tensiunii la bornele receptoarelor de la valoarea nominală reprezintă una din principalele criterii de asigurare a calității energiei electrice. Obținerea valorii tensiunii la bornele receptoarelor în limitele impuse de norme implică folosirea unor metode de reglarea a tensiunii. Rețelele de distribuție, în general, sunt extinse și alimentează mai mulți consumatori, dar tensiunea în nodurile de consum variază permanent din cauza modificării sarcinii consumatorilor, a conectării și deconectării acestora, precum și modificarea tensiunii pe barele stației de distribuție. Tensiunea în nodurile de consum are un caracter aleatoriu, iar pentru a putea aprecia calitatea tensiunii în nodurile de consum, respectiv pe ansamblul rețelei și obținerea unui reglaj optim al acesteia este necesar a se utiliza indicatori integrali de calitatea ai tensiunii.

Indicatorii integrali de calitatea ai tensiunii unei rețele care ne oferă informații despre starea, condițiile de funcționare și posibilitățile de ameliorare a regimului rețelei sunt, [C5], [C27]:

- valoarea medie a abaterii tensiunii $\overline{\Delta U} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta U dt = \frac{U(t) - U_n}{U_n}$,
- media abaterilor pătratice a tensiunii sau iregularitatea $\overline{\Delta U^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta U^2 dt$,
- abaterea standard $s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\Delta U - \overline{\Delta U})^2 dt} \cong \sqrt{\overline{\Delta U^2} - (\overline{\Delta U})^2}$.

Reglarea tensiunii în rețelele de distribuție se poate realiza prin modificarea circulației de putere reactivă în rețea – compensare capacitivă derivație sau prin modificarea parametrilor liniilor – compensarea capacitivă serie. În prezent, performanțele instalațiilor de

reglare a circulației de putere reactivă și a tensiunii s-au îmbunătățit odată cu apariția dispozitivelor FACTS. Aceste dispozitive asigură o creștere a performanțelor rețelelor electrice printr-un control dinamic al tensiunii, impedanței și/sau unghiului de fază, [EA97], [K92], [FG96], [KO93].

În condițiile asigurării calității energiei furnizate consumatorilor, în cadrul lucrării se va studia compensarea capacitivă serie a liniilor ca metodă de reglare și îmbunătățire a profilului tensiunii în nodurile de consum. În acest capitol se prezintă problematica compensării capacitive serie a rețelelor de medie tensiune cu evidențierea efectelor compensării capacitive serie asupra funcționării rețelelor de medie tensiune. De asemenea este realizat un studiu comparativ între compensarea capacitivă serie și cea derivație privind eficiența acestora în reglarea tensiunii și îmbunătățirea profilului acesteia.

2.1. Considerații teoretice

Rețelele de medie tensiune se caracterizează din punct de vedere electric prin parametrii longitudinali (rezistența ohmică și reactanța inductivă) și parametrii transversali (conductanța și susceptanța). Având în vedere lungimile reduse ale acestora, parametrii transversali se pot neglija în calculul circulațiilor de putere sau include în consumul receptorilor.

Pentru o linie electrică de medie tensiune, încărcată la capăt cu o sarcină \underline{I} la un factor de putere $\cos \varphi_2$, schema monofilară a rețelei considerate este prezentată în figura 2.1.

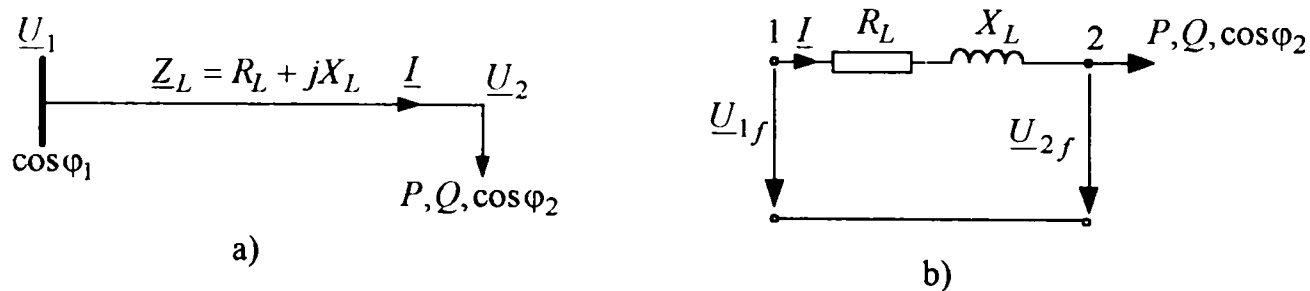


Fig. 2.1 Rețea de alimentare a unui consumator:
a) schema monofilară; b) schema echivalentă monofazată

Pentru rețeaua din fig. 2.1 ecuația de funcționare a liniei electrice care alimentează un consumator ce absoarbe o putere activă P , respectiv reactivă Q , având factorul de putere $\cos \varphi_2$ este, (2.1):

$$\underline{U}_{1f} = \underline{U}_{2f} + j \cdot \underline{I} \cdot X_L + \underline{I} \cdot R_L = \underline{U}_{2f} + \Delta \underline{U}_{1f} \quad (2.1)$$

unde: - $\underline{U}_{1f}, \underline{U}_{2f}$ tensiunea pe fază la începutul, respectiv sfârșitul liniei

- \underline{I} curentul de sarcină al liniei,
- R_L, X_L - rezistența ohmică, respectiv reactanța inductivă a liniei,
- $\Delta \underline{U}_{1f}$ căderea de tensiune pe linie, considerată pe fază.

Căderea de tensiune pe linie $\Delta \underline{U}_{1f}$ are o componentă longitudinală ΔU_{1f} și o componentă transversală δU_{1f} , adică:

$$\Delta \underline{U}_{1f} = \Delta U_{1f} + j \cdot \delta U_{1f} = I \cdot (R_L \cos \varphi_2 + X_L \sin \varphi_2) + j \cdot I \cdot (X_L \cos \varphi_2 - R_L \sin \varphi_2) \quad (2.2)$$

În condițiile în care se cunosc puterile absorbite de consumator și tensiunea la bornele acestuia expresiile celor două componente ale căderii de tensiune pe linie se scriu sub forma (2.3).

$$\Delta U_{1f} = \frac{P \cdot R_L + Q \cdot X_L}{3 \cdot U_{2f}}, \quad \delta U_{1f} = \frac{P \cdot X_L - Q \cdot R_L}{3 \cdot U_{2f}} \quad (2.3)$$

În general, pentru liniile de lungimi reduse, componenta transversală a căderii de tensiune fazorială are o valoare mult mai mică decât pierderea de tensiune și se poate neglija. În acest caz, diferența algebrică a modulelor tensiunilor de la capetele liniei, adică pierderea de tensiune se poate aproxima cu componenta longitudinală a căderii de tensiune, [C6].

Dacă se consideră că pe linia ce alimentează consumatorul este prevăzută o baterie de condensatoare serie, schema monofilară, respectiv cea echivalentă a rețelei electrice compensată este dată în figura 2.2.

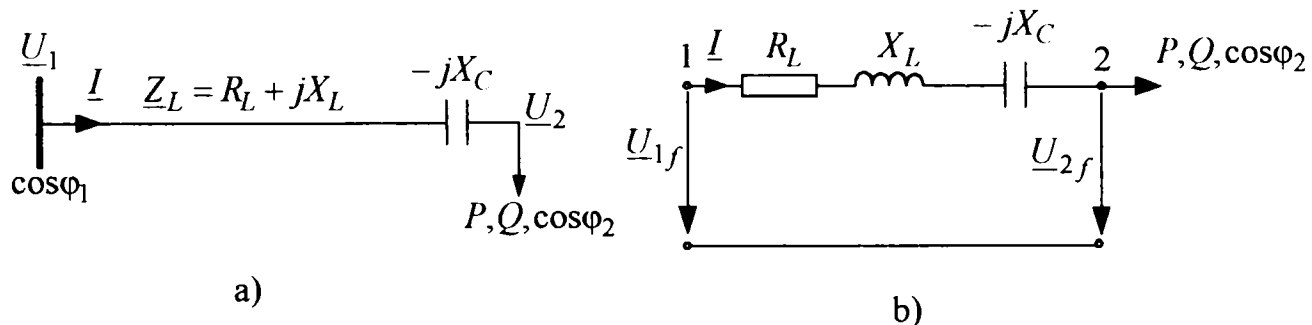


Fig.2.2. Linie de medie tensiune prevăzută cu compensare capacitivă longitudinală:
a) schema monofilară; b) schema echivalentă monofazată.

Ecuția de funcționarea a liniei electrice prevăzută cu compensarea capacitivă serie este:

$$\underline{U}_{1f} = \underline{U}_{2f} + j \cdot \underline{I} \cdot (X_L - X_C) + \underline{I} \cdot R_L = \underline{U}_{2f} + \Delta \underline{U}_{2f} \quad (2.4)$$

Ținând seama de compensarea reactanței liniei, expresia căderii de tensiune pe linie este, relația (2.5):

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{2f} &= \Delta U_{2f} + j \cdot \delta U_{2f} = \\ &= I \cdot (R_L \cos \varphi_2 + X_L (1 - K_C) \sin \varphi_2) + j \cdot I \cdot (X_L (1 - K_C) \cos \varphi_2 - R_L \sin \varphi_2) \end{aligned} \quad (2.5)$$

unde: $K_C = X_C / X_L$ reprezintă gradul de compensare al liniei.

Dacă se exprimă curentul prin puterile absorbite de consumator și tensiunea la bornele acestuia, componentele căderii de tensiune pe linie se scriu sub forma:

$$\Delta U_{2f} = \frac{P \cdot R_L + Q \cdot X_L (1 - K_C)}{3 \cdot U_{2f}}, \quad \delta U_{2f} = \frac{P \cdot X_L (1 - K_C) - Q \cdot R_L}{3 \cdot U_{2f}} \quad (2.6)$$

Din relația (2.6) se observă că, componentele căderii de tensiune pe linie scad pe măsură ce gradul de compensare crește, iar tensiunea la bornele consumatorului $U_{2f} = U_{1f} - \Delta U_{2f}$ se apropie de valoarea tensiunii de la începutul liniei. Liniile de medie tensiune au reactanța inductivă comparabilă ca valoare cu rezistența ohmică, iar pentru a compensa căderea de tensiune pe linie se impune utilizarea unui grad de compensare $K_C > 1$. În [C25] se precizează că pentru reglarea tensiunii în rețelele de medie tensiune gradul de compensare K_C ia valori între 1 și 4.

Pe baza relațiilor (2.1) și (2.4) s-au construit diagramele fazoriale pentru linia fără compensare (fig.2.2 a)), respectiv pentru linia prevăzută cu compensarea (fig.2.2 b) și c)).

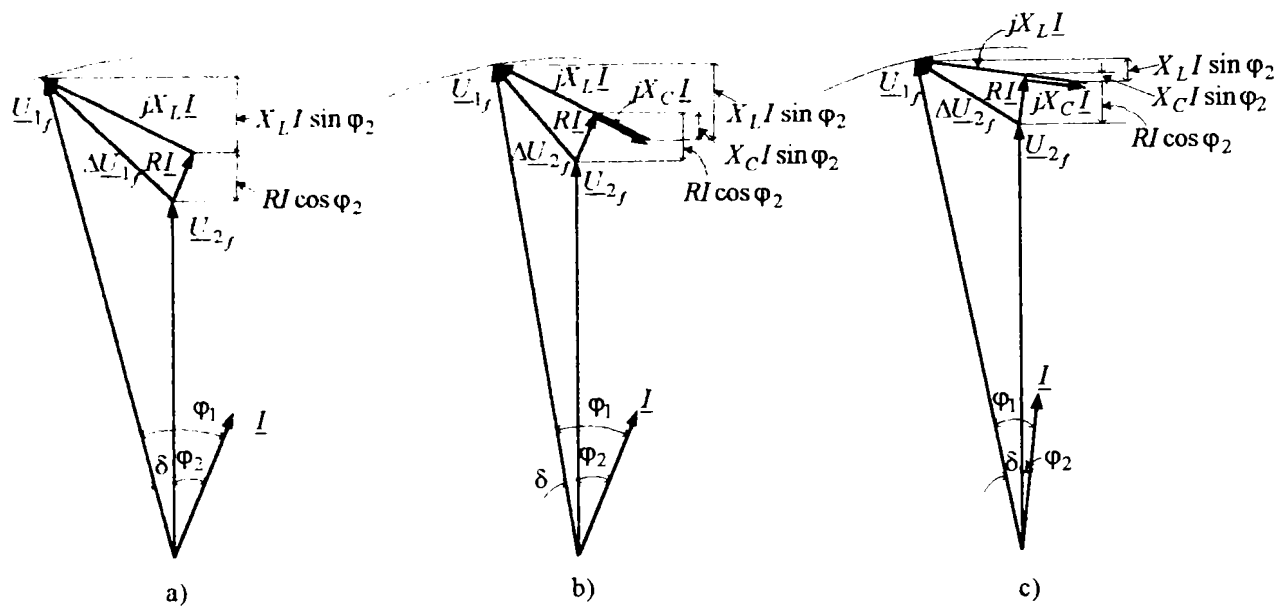


Fig.2.3. Diagrammele fazoriale ale unei linii electrice: a) fără compensare; b), și c) cu compensare.

Din diagramele din figura 2.3 a), respectiv figura 2.3 b) se observă că în condițiile în care valoarea tensiunii la începutul liniei \underline{U}_{1f} rămâne constantă, prin introducerea în serie cu reactanța inductivă X_L a liniei a unei reactanțe capacitive X_C , căderea de tensiune pe linie $\Delta \underline{U}_{2f} < \Delta \underline{U}_{1f}$ scade, ceea ce conduce la o creștere a tensiunii \underline{U}_{2f} la bornele consumatorului. Analizând cele două diagrame se constată că defazajul φ_1 dintre tensiunea la începutul liniei \underline{U}_{1f} și curent de sarcină \underline{I} se micșorează, ceea ce ne indică că prin compensarea capacitivă a liniei se îmbunătățește factorul de putere al rețelei $\cos \varphi_1$.

Comparând diagramele b) și c) din figura 2.3 se observă că la un factor de putere mai mare la consumator efectul compensării este mult mai redus. Aceasta lucru se observă și din diagrama de variație a tensiunii în funcție de factorul de putere al consumatorului și gradul de compensare al liniei, (fig.2.4). Prin urmare, compensarea capacitivă serie a liniilor de medie tensiune este indicată a fi utilizată în cazul în care factorul de putere este $0,75 \div 0,9$, [C6], [C25], [C34].

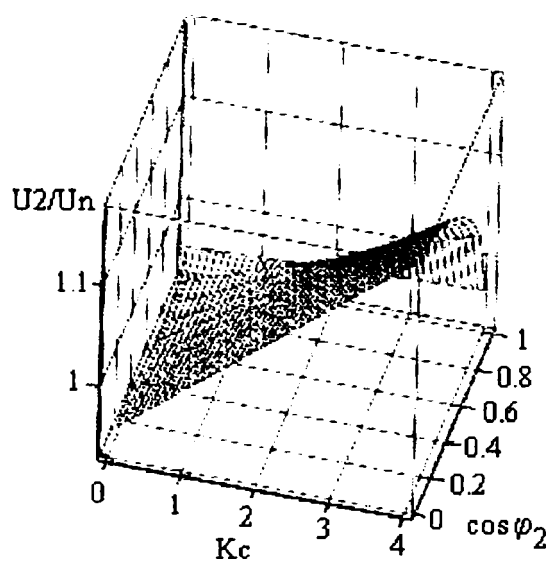


Fig. 2.4. Variația tensiunii la sfârșitul liniei în funcție de factorul de putere al consumatorului și gradul de compensare al liniei.

Pentru un factor de putere mai mic de 0,75 este mai eficientă soluția cu condensatoare derivație, care reduc pierderile de putere reactivă pe linie și îmbunătățesc profilul tensiunii.

Pierderile de putere activă și reactivă pe linia electrică fără compensare, respectiv cu compensare, se determină cu relațiile (2.7), (2.8).

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R_L, \quad \Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} X_L \quad (2.7)$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R_L, \quad \Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} X_L (1 - K_C) \quad (2.8)$$

Analizând relațiile de calcul pentru pierderile de putere activă în cazul liniei fără compensare (2.7), respectiv cu compensare (2.8), se constată că relațiile sunt identice ca formă, pierderea de putere activă depinde doar de tensiunea la bornele consumatorului, care este diferită în cele două cazuri. Pierderile de putere activă sunt invers proporționale cu pătratul tensiunii, de aceea, dacă tensiunea crește, pierderile de putere activă se reduc. Din cele arătate mai sus, rezultă că prin compensarea reactanței liniei se reduc și pierderile de putere activă. În figura 2.5 este reprezentată variația pierderilor de putere activă în raport cu gradul de compensare al liniei și factorul de putere al consumatorului.

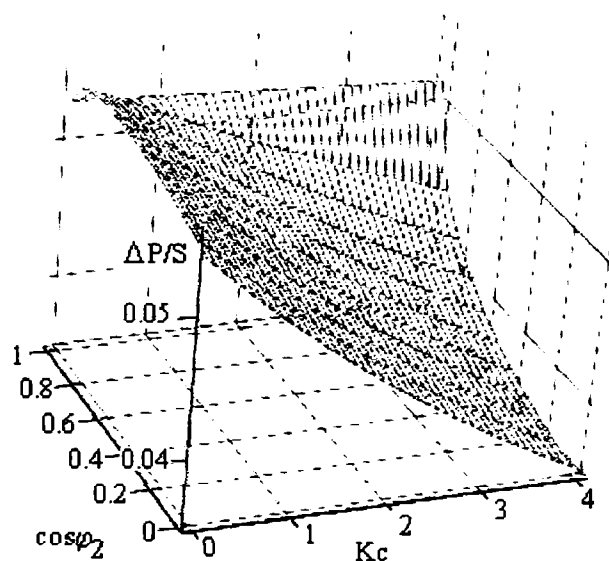


Fig. 2.5. Variația pierderilor de putere activă pe linie în funcție de factorul de putere al consumatorului și gradul de compensare al liniei

De asemenea din (2.7) și (2.8), se observă că pierderile de putere reactivă ΔQ pe linie scad odată cu creșterea tensiunii și a gradului de compensare al reactanței liniei, ceea ce ne indică că prin reducerea pierderii de putere reactivă pe linie se îmbunătățește factorul de putere al rețelei, $\cos \varphi_1 = \cos(\alpha \tan((Q + \Delta Q)/(P + \Delta P)))$.

Prin compensarea capacitivă serie a liniilor electrice crește capacitatea de transfer de energie a acestora. Un indicator al capacității de transfer de energie electrică îl constituie puterea naturală a liniei. Pentru o linie electrică fără pierderi ce funcționează la puterea naturală, valorile efective ale tensiunii și curentului se conservă în lungul liniei. Puterea naturală a liniei fără compensare este dată de relația, [C5], [C34]:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_c} = U_n^2 \cdot \sqrt{\frac{b_0}{x_0}}, \quad (2.9)$$

unde: U_n este tensiunea nominală a liniei;

Z_c - impedanța caracteristică a liniei fără pierderi;

x_0, b_0 - reactanța, respectiv susceptanța liniei pe unitatea de lungime.

Pentru o linie electrică cu compensare capacitivă serie puterea naturală este dată de relația:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_c} = U_n^2 \cdot \sqrt{\frac{b_0}{x_0 \cdot (1 - K_C)}} \quad (2.9)$$

unde: K_C - gradul de compensare al reactanței liniei;

Din relația (2.9) se observă că puterea naturală a liniei crește odată cu creșterea gradului de compensare. În figura 2.6 este reprezentată variația puterii naturale în funcție de gradul de compensare pentru o linie de 20kV, având conductoarele de secțiune 95 mm².

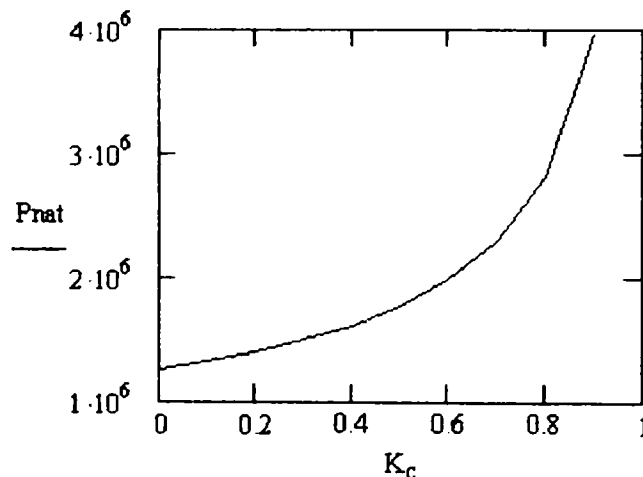


Fig. 2.6. Variația puterii naturale în funcție de gradul de compensare a reactanței liniei.

Se observă din figura 2.6 că puterea naturală a liniei la un grad de compensare de 0,9 este de ≈ 3 ori puterea naturală a liniei fără compensare.

Pentru linia electrică din figura 2.1, puterea activă la capătul liniei, în nodul de consum este dată de relația:

$$P = 3 \cdot I^2 \cdot Z_2 \cdot \cos \varphi_2 = \frac{U_1^2 \cdot Z_2 \cdot \cos \varphi_2}{Z_2^2 + Z_L^2 + 2 \cdot Z_2 \cdot Z_L \cdot \cos(\varphi_L - \varphi_2)} \quad (2.10)$$

unde: Z_2 este modulul impedanței de sarcină;

Z_L - modulul impedanței liniei;

φ_2 - defazajul dintre tensiunea la bornele consumatorului și curentul de sarcină;

$$\varphi_L = \arctan \frac{X_L}{R_L};$$

U_1 - tensiunea la începutul liniei.

Analizând relația (2.10) se observă că puterea activă în nodul de consum depinde de caracteristicile sarcinii (Z_2, φ_2), de impedanța liniei $Z_L = Z_L \cdot e^{j\varphi_L}$ și de tensiunea U_1 .

Dacă pe linie se prevede o baterie de condensatoare serie puterea activă la sfârșitul liniei, în nodul de consum va fi:

$$P_c = 3 \cdot I^2 \cdot Z_2 \cdot \cos \varphi_2 = \frac{U_1^2 \cdot Z_2 \cdot \cos \varphi_2}{Z_2^2 + Z_{Lcomp}^2 + 2 \cdot Z_2 \cdot Z_{Lcomp} \cdot \cos(\varphi_{Lcomp} - \varphi_2)} \quad (2.11)$$

$$\text{unde: } Z_{Lcomp} = \sqrt{R_L^2 + X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2}$$

$$\varphi_{Lcomp} = \arctan \frac{X_L \cdot (1 - K_C)}{R_L}$$

În condițiile în care tensiunea U_1 se consideră constantă și caracteristicile sarcinii (Z_2, φ_2) nu se modifică, din relațiile (2.10) și (2.11) se observă că puterea activă în nodul de consum pentru linia cu compensare crește odată cu creșterea gradului de compensare al liniei.

Pentru a evidenția efectul compensării serie asupra puterii active în nodul de consum se consideră o linie electrică aeriană de $20kV$, cu lungime de $30km$, având secțiunea conductoarele de $95mm^2$. Tensiunea la începutul liniei se consideră constantă, de valoare $21kV$ și impedanța sarcinii $Z_2 = 120\Omega$. În figura 2.7 s-a reprezentat variația raportului dintre puterea activă la sfârșitul liniei cu compensare, respectiv fără compensare, în funcție de factorul de putere al consumatorului și gradul de compensare al liniei.

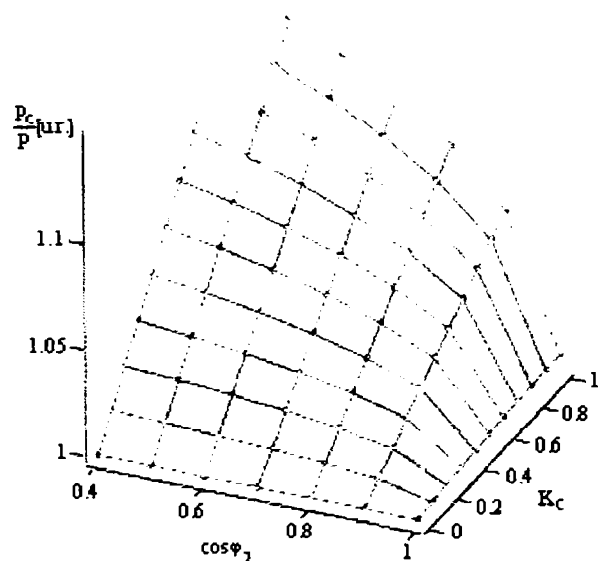


Fig.2.7. Variația raportului dintre puterea activă la sfârșitul liniei cu compensare, respectiv fără compensare în funcție $\cos \varphi_2$ și K_C , pentru $Z_2 = 120\Omega$

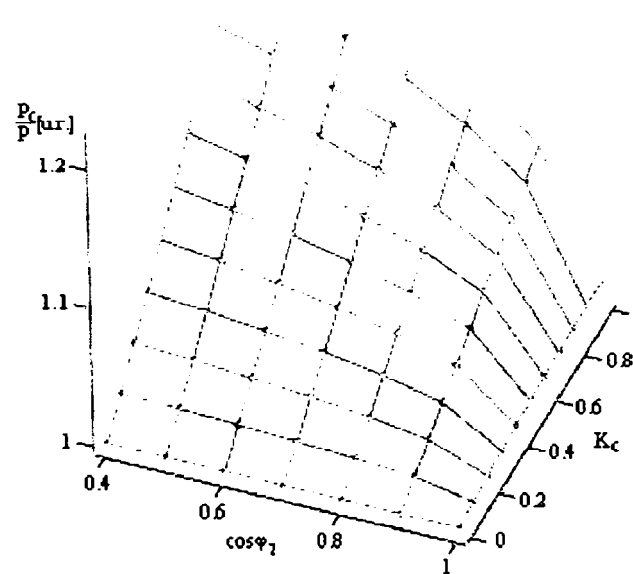


Fig.2.8. Variația raportului dintre puterea activă la sfârșitul liniei cu compensare, respectiv fără compensare în funcție $\cos \varphi_2$ și K_C , pentru $Z_2 = 80\Omega$

Din figura 2.7 se observă că pentru un factor de putere al consumatorului mai mare de 0,95 compensarea capacitivă serie influențează nesemnificativ puterea activă în nodul de consum. De asemenea se observă că puterea activă la sfârșitul liniei compensate crește dacă factorul de putere al consumatorului scade și gradului de compensare al reactanței liniei crește. La un grad de compensare de 0,9 și un factor de putere al consumatorului $\cos \varphi_2 = 0,7$, puterea activă în nodul de consum crește cu $\approx 10,1\%$ față de cazul liniei fără compensare. La același grad de compensare, dar factor de putere de 0,9 puterea activă în nodul de consum crește doar cu $\approx 6,25\%$.

Puterea activă și tensiunea în nodul de consum sunt influențate de impedanța sarcinii. Dacă modulul impedanței sarcinii scade, crește curentul și implicit puterea activă, iar tensiunea la bornele consumatorului scade. Pentru a arăta influența impedanței sarcinii asupra puterii active din nodul de consum s-a considerat $Z_2 = 80\Omega$ și s-a reprezentat grafic variația raportului dintre puterea activă la sfârșitul liniei cu compensare, respectiv fără compensare, în funcție de factorul de putere al consumatorului și gradul de compensare al liniei, (fig.2.8).

Analizând figura 2.8 se observă că puterea activă în nodul de consum crește cu scăderea impedanței sursei. La un grad de compensare de 0,9 și factor de putere al consumatorului de 0,9, puterea activă la sfârșitul liniei compensate crește cu 9,16% față de linia necompensată. Deci, la o scădere cu $\approx 33\%$ a impedanței sarcinii, pentru $K_C = 0,9$ și $\cos\varphi_2 = 0,9$, puterea activă la sfârșitul liniei compensate crește cu $\approx 46,56\%$.

Din cele prezentate mai sus, rezultă că prin compensarea capacitivă serie crește puterea naturală a liniei, puterea activă la sfârșitul linie, în nodul de consum, deci crește capacitatea de transport.

Din relația (2.4) se observă că, prin introducerea în serie cu reactanța liniei a unei reactanțe capacitive, căderea de tensiune inductivă pe reactanța liniei este compensată de căderea de tensiune capacitivă pe bateria de condensatoare. Această cădere de tensiune depinde de curentul de sarcină care trece prin bateria de condensatoare, și este direct proporțională cu valoarea acestuia, $\Delta U_C = X_C \cdot I$. Deci, tensiunea pe bateria de condensatoare se micșorează sau crește în funcție de variația curentului de sarcină, prin urmare, bateria reprezintă un regulator automat de tensiune, care modifică tensiunea la bornele consumatorului în funcție de curentul de sarcină de pe linie.

Dacă în cazul variațiilor lente ale tensiunii se poate interveni folosind mijloace corespunzătoare de reglare a tensiunii (transformatoarelor cu reglaj sub sarcină, baterii de condensatoare derivație reglabile, instalații de reglaj cu compensatoare), pentru combaterea variațiile bruște ale tensiunii, condensatorul serie reprezintă singurul mijloc eficient [C25]. Variații bruște ale tensiunii sunt provocate de receptoare generatoare de șocuri (cuptoare cu arc, aparate de sudură, pornirea motoarelor de puteri mari etc.).

La pornire, un motor de putere mare absoarbe din rețea un curent mare la un factor de putere redus, ceea ce determină o cădere a tensiunii de scurtă durată pe rețeaua de alimentare. Căderea de tensiune apare brusc și are o durată de câteva secunde până când motorul ajunge la turația nominală. Căderile de tensiune care apar pe linie, la pornirea motoarelor mari, sunt însoțite de o creștere a curentului de sarcină, care determină o creștere a tensiunii la bornele condensatorului serie proporțională cu creșterea curentului. Această creștere a tensiunii pe baterie va compensa căderea de tensiune inductivă de pe linia care alimentează mai mulți consumatori [IR99]. Căderile de tensiune în rețelele electrice de medie tensiune mai sunt determinate și de defectele din rețea [H01], [FA03], respectiv de creșterile bruște ale sarcinii. Un defect pe o linie determină o scădere a tensiunii pe bara stației și pe toate liniile racordate la bară, odată cu creșterea curentului pe acestea. Aceste căderi de tensiune (goluri de tensiune) afectează funcționarea receptoarele alimentate dintr-o astfel de rețea și în primul rând, echipamentele electronice (dispozitive de comandă, calculatoare electronice). O soluție de a reduce golurile de tensiune cauzate de defecte în rețea ar fi limitarea curentului de scurtcircuit folosind bobine de reactanță. În [K91], [SK96] se precizează că valoarea curentului de scurtcircuit se poate reduce conectând în paralel cu condensatorul o bobină de reactanță. Utilizarea dispozitivelor TCSC permit atât realizarea unui reglaj al gradului de compensare al reactanței liniei cât și limitarea curentului de scurtcircuit.

Din rețelele de medie tensiune sunt alimentați și consumatori care prezintă variații rapide ale amplitudinii curentului de sarcină (cuptoare cu arc, aparate de sudură, gater, pompe, compresoare), determinând variații rapide ale tensiunii – flickerul de tensiune. Flickerul de tensiune determină o variație vizibilă a fluxului luminos emis de sursele de iluminat, o deformare a imaginii televizoarelor, deranjamente în funcționarea echipamentelor electronice, [N1]. O metodă de reducere a flickerul de tensiune este folosirea condensatoarelor serie pe rețeaua de alimentare a consumatorilor ce determină fluctuații ale tensiunii, [C25], [LK90], [S1].

Principalul scop al compensării capacitive serie este de a îmbunătăți stabilitatea tensiunii și reglarea acesteia în rețelele de medie tensiune, așa cum s-a arătat mai sus, pe lângă acest obiectiv, utilizarea bateriilor de condensatoare serie prezintă unele avantaje. În figura 2.9

sunt sintetizate efectele pozitive pe care le poate avea compensarea capacitivă longitudinală asupra funcționării rețelei.

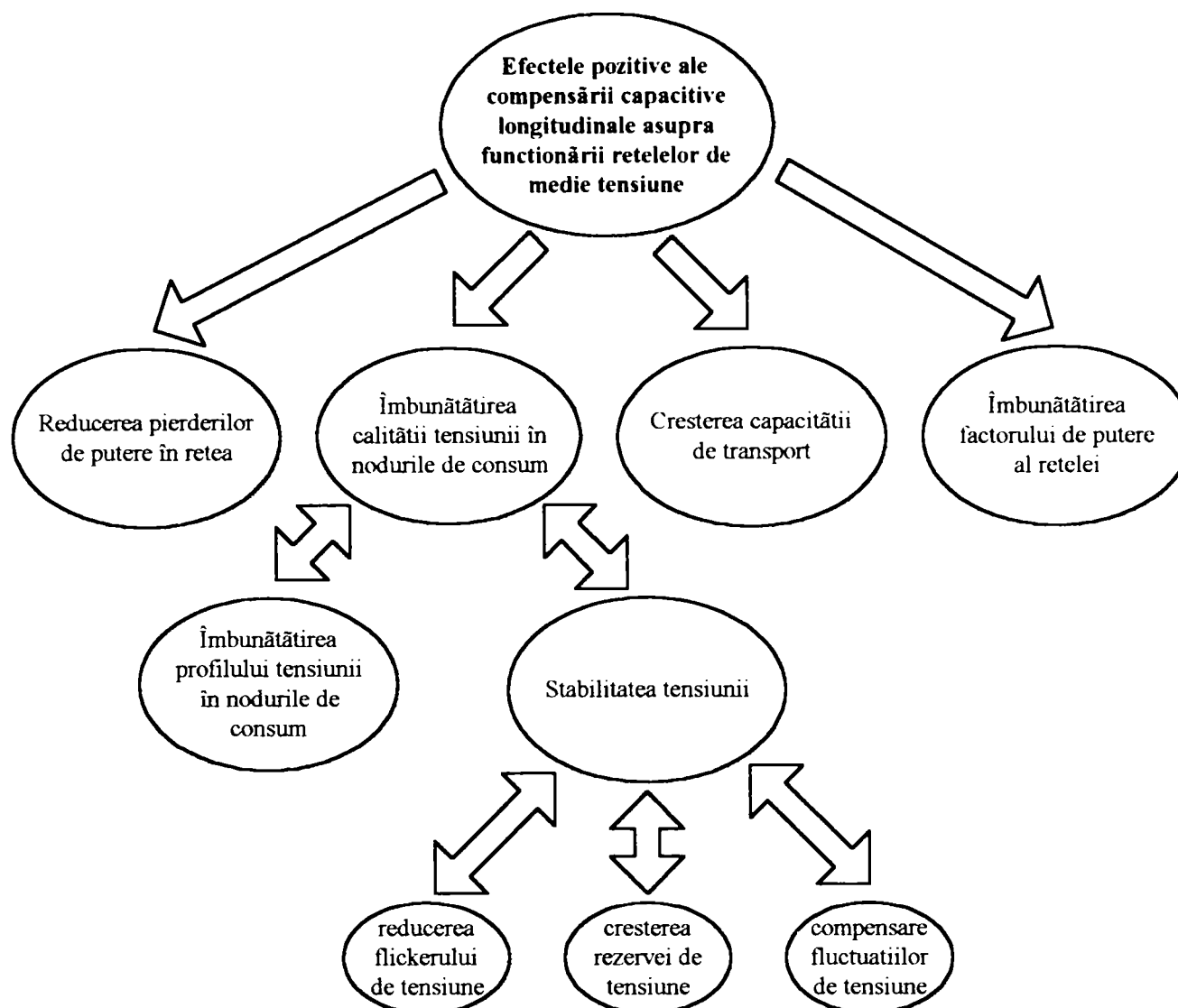


Fig.2.9 Efectele pozitive ale compensării serie asupra funcționării rețelelor de medie tensiune

2.2. Eficiența compensării capacitive serie la reglajul tensiunii în rețele de medie tensiune

După cum s-a arătat anterior, unul din parametrii energiei electrice care caracterizează calitatea ei o reprezintă abaterea tensiunii la bornele receptoarelor de la valoarea nominală. Normele de calitate a energiei [S3] stabilesc mărimea abaterilor admisibile ale tensiunii la bornele receptoarelor. Având în vedere că aceste rețele sunt extinse, de multe ori valoarea tensiunea la bornele consumatorilor îndepărtați este sub limita admisibilă. Problema care apare în rețele de distribuție a energiei electrice este asigurarea valorii tensiunii la bornele consumatorului între limitele impuse de normele în vigoare. Pentru aceasta este necesară reglarea tensiunii în nodurile rețelei. Reglarea tensiunii în rețelele de distribuție se poate realiza prin modificarea puterii reactive transportată pe linii, prin modificarea parametrilor liniilor, respectiv prin modificarea tensiunii în stație (reglarea sub sarcină a numărului de ploturi ale transformatoarelor de distribuție). Creșterea tensiunii pe barele de medie tensiune ale stațiilor de distribuție este limitată de condiția ca tensiunea consumatorilor din apropierea stației să fie în limitele admisibile $U_{\min adm} \leq U_i \leq U_{\max adm}$. Datorită acestei limitări soluțiile de reglare a

tensiunii în rețelele de distribuție cer folosirea bateriilor de condensatoare serie, respectiv derivație.

În continuare se analizează eficiența compensării capacitive serie, respectiv paralel asupra reglajului tensiunii în rețelele electrice de distribuție.

Dacă se consideră o linie electrică de medie tensiune ce alimentează un consumator, (fig.2.1), neglijând componenta transversală a căderii de tensiune, pierderea de tensiune pe linia fără compensarea este dată de relația:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R_L + Q \cdot X_L}{U_2}, \quad (2.12)$$

în care: P și Q sunt puterile absorbite de consumator,
 R_L și X_L - rezistența ohmică, respectiv reactanța linie,
 U_2 - tensiunea la bornele consumatorului.

În cazul în care se consideră la capătul liniei o baterie de condensatoare serie pentru compensarea reactanței, pierderea de tensiune pe linie este:

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R_L + Q \cdot (X_L - X_C)}{U_2} \quad (2.13)$$

unde: X_C este reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare serie.

Pierderea de tensiune pe linie în cazul compensării capacitive derivație este dată de relația:

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R_L + (Q - Q_C) \cdot X_L}{U_2} \quad (2.14)$$

unde: - Q_C este puterea reactivă a baterie de condensatoare derivație.

Creșterile de tensiune determinate de utilizarea condensatoarelor serie, respectiv derivație sunt date în relațiile:

$$\Delta U' = \Delta U - \Delta U_1 = \frac{Q}{U_2} \cdot X_C, \quad (2.15)$$

$$\Delta U'' = \Delta U - \Delta U_2 = \frac{Q_C}{U_2} \cdot X_L \quad (2.16)$$

Din relația (2.15) se constată că, în cazul în care puterea reactivă absorbită de consumator este mică creșterea tensiunii este nesemnificativă, deci compensarea capacitivă serie nu este indicată. În mod similar, se observă din relația (2.16) că pentru linii cu reactanță inductivă mică creșterea tensiunii determinată de bateria de condensatoare derivație este neînsemnată.

Dacă presupunem că, creșterea de tensiune este aceeași pentru ambele metode de compensare ($\Delta U' = \Delta U''$), rezultă $\frac{X_C}{Q_C} = \frac{X_L}{Q}$. Raportul dintre puterile celor două baterii de condensatoare este, [C25]:

$$\frac{Q_{Cser}}{Q_{Cder}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot X_L}{U_2 \cdot \sin \varphi_2} \quad (2.17)$$

În figura 2.10 s-a reprezentat grafic variația raportului dintre puterile $\frac{Q_{Cder}}{Q_{Cser}}$ celor două baterii (derivație și serie) în funcție de factorul de putere al consumatorului și lungimea liniei.

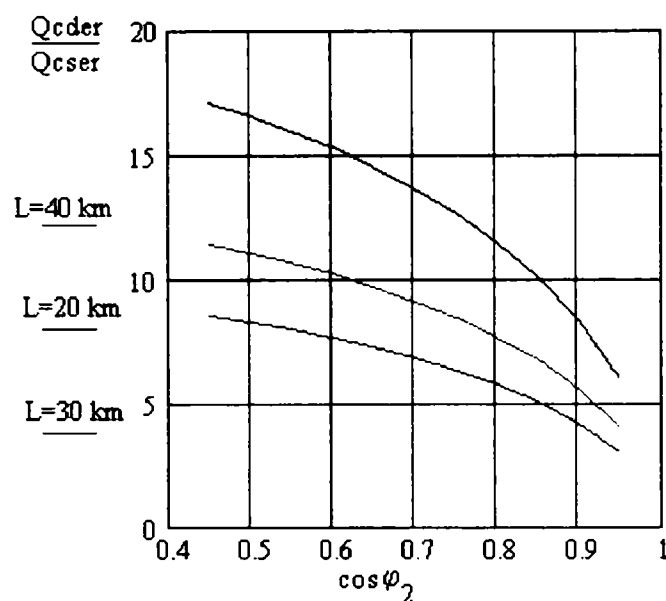


Fig. 2.10. Variația raportului $\frac{Q_{Cder}}{Q_{Cser}}$ în funcție de factorul de putere $\cos \varphi_2$ al consumatorului și de lungimea liniei L .

Se observă din figura 2.10 că pentru a avea același efect de compensare puterea bateriei de condensatoare derivație este mult mai mare decât cea a bateriei de condensatoare serie. Se constată de asemenea că acest raport $\frac{Q_{Cder}}{Q_{Cser}}$ scade odată cu creșterea lungimii liniei și implicit a

reactanței acesteia. Cu toate că raportul $\frac{Q_{Cder}}{Q_{Cser}}$ crește pe măsură ce factorul de putere scade,

compensarea capacitivă serie nu se va utiliza pentru un factor de putere mai mic de 0,75 și aceasta datorită pierderilor de putere ce apar pe linie.

Desigur, la scrierea relațiilor (2.13), (2.14) nu s-a ținut cont că prin compensare, tensiunea U_2 s-a modificat, în sensul că a crescut și corespunzător acestei creșteri, cresc puterile absorbite de consumator, conform caracteristicilor de sarcină $P = f(U)$ și $Q = f(U)$. În literatură [C34] se arată că într-o primă etapă de analiză a efectului compensării aceste aspecte pot fi neglijate.

Dacă nu se neglijează variația tensiunii și a puterilor, problema devine mai complicată, iar relațiile (2.10) și (2.11) pot fi scrise sub forma:

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot \left(\frac{U'_2}{U_2}\right)^\alpha \cdot R_L + Q \cdot \left(\frac{U'_2}{U_2}\right)^\beta \cdot (X_L - X_C)}{U'_2}, \quad (2.18)$$

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot \left(\frac{U''_2}{U_2}\right)^\alpha \cdot R_L + \left[Q \cdot \left(\frac{U''_2}{U_2}\right)^\beta - Q_C \cdot \left(\frac{U''_2}{U_2}\right)^2\right] \cdot X_L}{U''_2} \quad (2.19)$$

unde:

U'_2 este tensiunea la capătul liniei în condițiile compensării serie; se calculează cu relația

$$U'_2 = U_1 - \Delta U_1 = U_1 - \frac{P \cdot \left(\frac{U'_2}{U_2}\right)^\alpha \cdot R_L + Q \cdot \left(\frac{U'_2}{U_2}\right)^\beta \cdot (X_L - X_C)}{U'_2} \quad (2.20)$$

U''_2 - tensiunea la capătul liniei în condițiile compensării transversale; se calculează cu relația:

$$U''_2 = U_1 - \Delta U_2 = U_1 - \frac{P \cdot \left(\frac{U''_2}{U_2}\right)^\alpha \cdot R_L + \left[Q \cdot \left(\frac{U''_2}{U_2}\right)^\beta - Q_C \cdot \left(\frac{U''_2}{U_2}\right)^2 \right] \cdot X_L}{U''_2} \quad (2.21)$$

α, β - efectele de reglaj ale puterii active, respectiv reactive. Acestea depind de tipul consumatorului, fiind indicate în literatură [C12], [C28]

Pentru a evidenția eficiența celor două metode de reglare a tensiunii se consideră o linie electrică aeriană de $20kV$, de lungime $20km$, având o secțiune de $95mm^2$, ce alimentează un consumator ce absoarbe la capătul ei puterile P și Q variabile pe durata unui interval de timp T , fig.2.11. Curba de sarcină medie zilnică a consumatorului este dată în figura 2.12. Puterile maxime absorbite de consumator sunt: $P_{max} = 4MW$, $Q_{max} = 3MVar$.

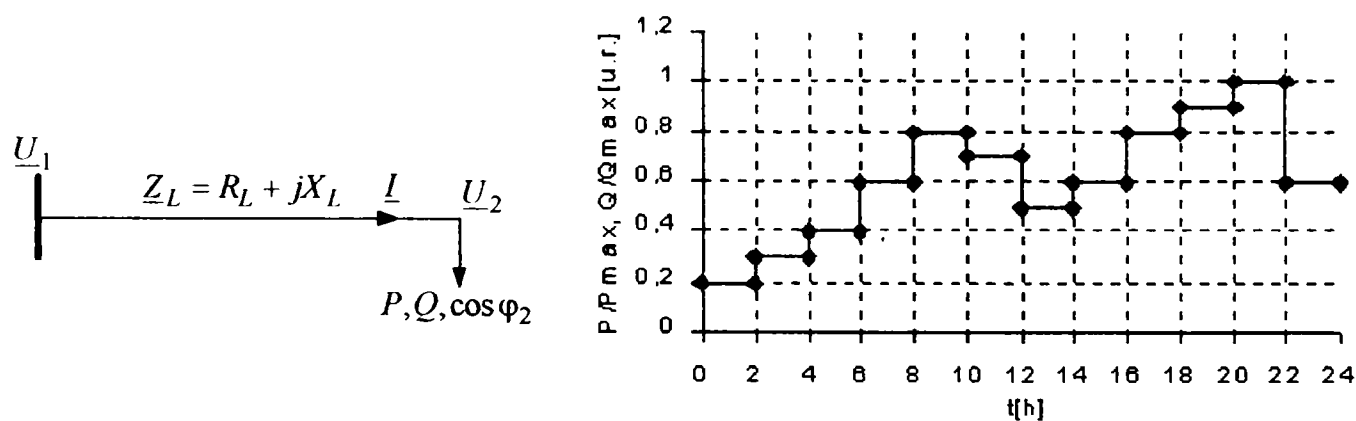


Fig. 2.11. Linie electrică cu un singur nod consumator

Fig.2.12. Curba medie zilnică utilizată pentru calculul puterii

S-au presupus două situații: linia prevăzută cu compensare capacitivă serie, respectiv cu compensare capacitivă derivație. În ambele situații compensatorul este amplasat la capătul liniei. Tensiunea la începutul liniei s-a considerat $U_1 = 21kV$, bateriei de condensatoare serie cu reactanța $X_C = 5,944\Omega$ și puterea $Q_{ser} = 0,352 \div 0.437MVar$, iar puterea bateriei de condensatoare derivație $Q_{der} = 0,999MVar$. În figura 2.13 s-a reprezentat variația tensiunii la bornele consumatorului pe durata unei zile.

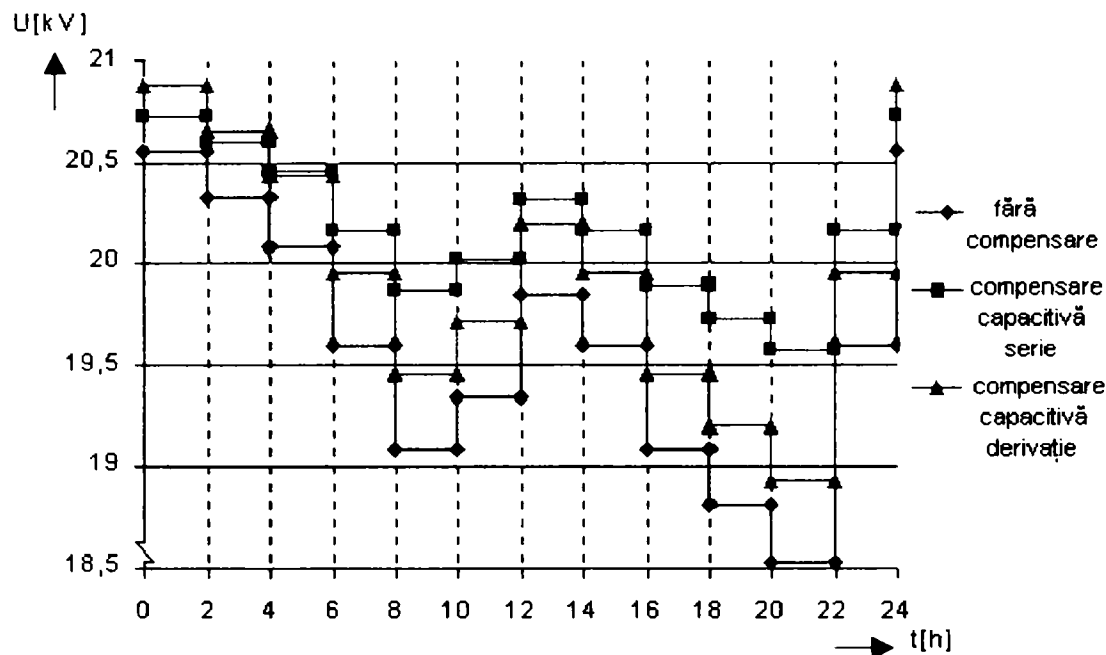


Fig. 2.13. Variația tensiunii la bornele consumatorului

Dacă se urmărește variația tensiunii la bornele consumatorului (fig.2.13) în condițiile liniei fără compensare, cu compensare serie, respectiv derivație se constată că cel mai bun profil al tensiunii se obține cu compensarea serie (tensiunea variază între 19,57÷20,73 kV). La sarcina maximă absorbită de consumator se observă că utilizând compensarea derivație tensiunea la bornele consumatorului scade la o valoare sub 95% U_{nC} . De asemenea se observă o eficiență mărită a compensării capacitive serie în cazul că puterea absorbită de consumator crește. Comparând puterile celor două instalații de compensare se observă că puterea bateriei de condensatoare derivație de $(2,83\div 2,28) Q_{ser}$.

2.3. Rolul compensării capacitive serie în creșterea stabilității de tensiune a liniilor

Este cunoscut faptul că stabilitatea tensiunii reprezintă capacitatea rețelei ca în cazul unei perturbații sau modificării ale sarcinii să readucă tensiunea la bornele consumatorilor la valoarea din regimul staționar anterior perturbației. De asemenea, în regim normal de funcționare să mențină tensiunea la bornele consumatorilor la o valoare apropiată de cea prestabilită. În funcție de durata de timp în care apar, perturbațiile ce determină instabilitatea tensiunii la bornele consumatorului pot fi lente sau rapide și cauzate, în general, de modificările sarcinii în nodurile de consum [C18].

Instabilitatea tensiunii în rețelele de distribuție poate fi cauzată de [C16]:

- nivelul coborât al tensiunii în nodurile de consum;
- creșterea cererii de putere din partea consumatorilor;
- conectarea unor consumatori de puteri mari;
- comportamentul consumatorilor la scăderea tensiunii la borne;
- conectarea a unor motoare de puteri mari care pentru magnetizarea miezului absorb din rețea un curent mare (putere reactivă) la pornire;
- scurtcircuite ce pot apărea pe unul din fiderii rețelei și care determină scăderea tensiunii și pe ceilalți fideri;
- funcționarea defectuoasă a protecțiilor.

Instabilitatea de tensiune apare pe de o parte datorită existenței puterii maxime ce poate fi furnizată consumatorilor și pe de altă parte datorită interacțiunii dintre caracteristicile și comportamentul sarcinii și rețeaua de distribuție. Acestea pot fi modelate prin ecuații algebro-diferențiale de forma, [EB02]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, u) \\ 0 &= f_2(x_1, x_2, u) \end{aligned} \quad (2.22)$$

unde: x_1 este vectorul variabilelor dinamice;

x_2 - vectorul variabilelor algebrice;

u - vectorul variabilelor de intrare și parametrilor.

Punctele de echilibru sunt date de soluțiile ecuațiilor algebrice obținute din sistemul (2.22) prin anularea tuturor derivatelor în raport cu timpul, adică:

$$f(x, u) = 0 \quad (2.23)$$

Este evident că o soluție x a ecuațiilor algebrice (2.23) nu poate exista pentru toate valorile posibile ale componentelor vectorului u . Prin urmare, există un domeniu D limitat de o hipersuprafață S , numită suprafață critică, în afara căreia nu există puncte de echilibru. Punctele de pe suprafața S reprezintă punctele de bifurcație statică în evoluția sistemului și sunt caracterizate de singularitatea matricei Jacobian a sistemului de ecuații (2.23).

În literatură [LK90] se precizează că prin compensarea capacitivă serie a reactanțelor liniilor de medie tensiune se îmbunătățesc condițiile de stabilitate a rețelelor.

Pentru a explica aceste aspecte, se consideră o linie electrică de medie tensiune prevăzută cu compensare capacitivă serie ce alimentează un consumator, conectată la un sistem de putere infinită (fig.2.14).

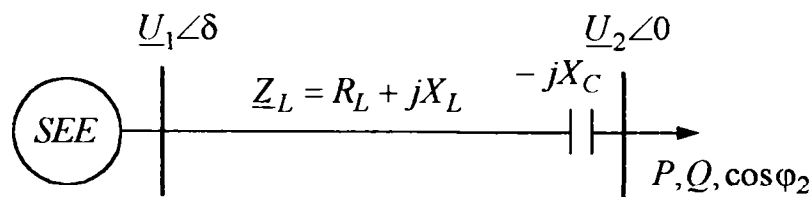


Fig.2.14. Rețea de distribuție prevăzută cu compensare

Ecuția de funcționare a acestei rețele, în condițiile neglijării parametrilor transversali, este dată de relația:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \sqrt{3} [R_L + j(X_L - X_C)] \cdot \underline{I} = U_2 + \frac{PR_L + Q(X_L - X_C)}{U_2} + j \frac{P(X_L - X_C) - QR_L}{U_2} \quad (2.24)$$

Proiectând relația (2.24) pe axele reală și imaginară se obțin relațiile:

$$\begin{aligned} U_1 U_2 \cos \delta &= U_2^2 + R_L P + (X_L - X_C) Q \\ U_1 U_2 \sin \delta &= (X_L - X_C) P - R_L Q \end{aligned} \quad (2.25)$$

în care δ este defazajul dintre fazorii tensiunilor de la începutul și sfârșitul liniei (fig.2.3 b)).

Relațiile (2.25) constituie o altă formă de exprimare a ecuațiilor regimului permanent pentru rețeaua din figura 2.14, în care vectorul parametrilor este: $u = [P, Q, U_1]$.

Din relațiile (2.25) prin eliminarea variabilei δ se obține relația de legătură implicită între tensiunea în nodul de consum și puterile absorbite de consumator (2.26), când tensiunea U_1 la începutul liniei este considerată parametru.

$$U_2^4 - [U_1^2 - 2 \cdot (P \cdot R_L + Q \cdot X_L \cdot (1 - K_C))] \cdot U_2^2 + (R_L^2 + X_L^2 (1 - K_C)^2) \cdot (P^2 + Q^2) = 0 \quad (2.26)$$

Din considerente fizice, dintre cele patru soluții ale ecuației (2.26) numai două sunt acceptabile și ele definesc punctele de echilibru ale rețelei. Adică, pentru o valoare dată a tensiunii U_1 ecuația (2.26) are cel puțin o soluție acceptabilă numai dacă este îndeplinită condiția:

$$\left[U_1^2 - 2 \cdot (P \cdot R_L + Q \cdot X_L \cdot (1 - K_C)) \right]^2 - 4 \cdot (R_L^2 + X_L^2 (1 - K_C)^2) \cdot (P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (2.27)$$

Impunând condiția de egalitate în relația (2.27) și exprimând puterea reactivă în funcție de cea activă se poate trasa în planul P-Q curba ce delimitează domeniul punctelor de echilibru, (fig.2.15).

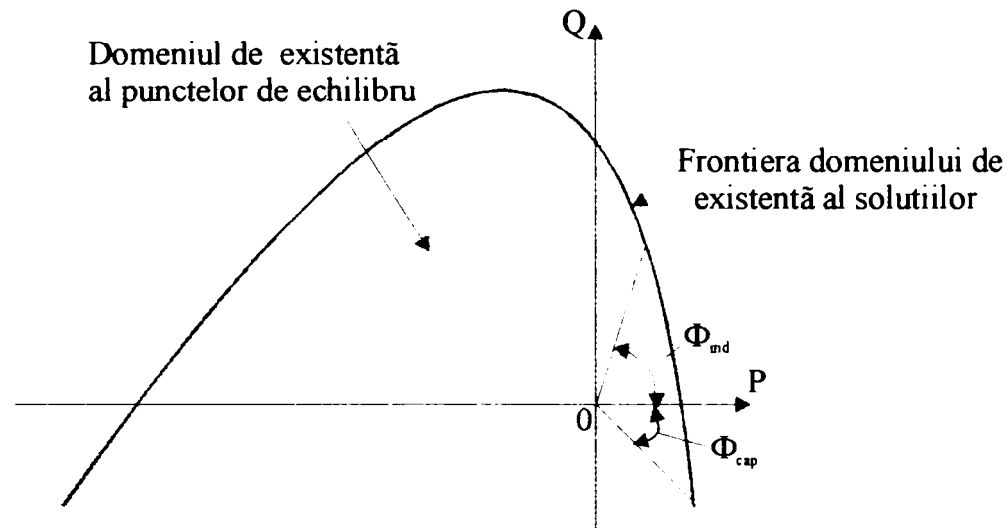


Fig.2.15. Domeniul de existență a punctelor de echilibru pentru rețeaua din figura 2.14

Punctele situate pe curba din figura 2.15 definesc puterile active și reactive maxime care pot fi furnizate consumatorului și se numesc puncte critice din punct de vedere al rețelei. Se poate constata că puterea maximă furnizată consumatorului depinde de valoarea factorului de putere. Dacă se consideră un consumator pur rezistiv, $\cos \varphi_2 = 1$, puterea furnizată depinde de tensiunea la începutul liniei și parametrii rețelei, conform relației:

$$P_{\max} = \frac{U_1^2}{2 \cdot X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2} \left[-R_L + \sqrt{R_L^2 + X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2} \right] \quad (2.28)$$

În condițiile în care sarcina ar fi pur inductivă, adică $P = 0$, ecuația (2.26) are soluții acceptabile numai dacă este îndeplinită condiția:

$$Q \leq \frac{U_1^2}{2 \cdot R_L^2} \left[X_L \cdot (1 - K_C) + \sqrt{R_L^2 + X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2} \right] \quad (2.29)$$

Dacă la capătul receptor al liniei se injectează o putere reactivă:

$$Q = \frac{1}{4} \cdot U_1^2 \cdot X_L \cdot \frac{(1 - K_C)}{R_L^2} \quad (2.30)$$

puterea activă maximă (critică) transmisă consumatorului este $P_{\max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_1^2}{R_L}$.

Din relația (2.30) se observă că puterea reactivă injectată în nodul de consum depinde de gradul de compensare al liniei. Pentru un grad de compensare $K_C = 1$, puterea reactivă în nodul de consum este $Q = 0$.

Pentru o valoare dată a factorului de putere al consumatorului, impunând condiția de egalitate în (2.27) și având în vedere relațiile între puterea activă, reactivă și aparentă în nodul

de consum și $S \geq 0$ puterea aparentă maximă (critică) transmisă consumatorului este dată de relația:

$$S_{\max} = \frac{U_1^2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2 + [R_L \cdot \cos \varphi_2 + X_L \cdot (1 - K_C) \cdot \sin \varphi_2]}} \quad (2.31)$$

Ținând seama de expresiile puterilor maxime transmise consumatorului, din relația (2.26) rezultă expresia pentru tensiunea critică din nodul de consum:

$$U_{2cr} = \frac{U_1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{R_L^2 + X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2}}{R_L \cdot \cos \varphi_2 + X_L \cdot (1 - K_C) \cdot \sin \varphi_2 + \sqrt{R_L^2 + X_L^2 \cdot (1 - K_C)^2}}} \quad (2.32)$$

Pentru a evidenția cele precizate mai sus, se consideră o linie electrică aeriană de $20kV$ ce alimentează un consumator. Linia are lungimea de $30km$ și secțiunea conductoarelor de $95mm^2$. Tensiunea la începutul liniei se consideră de valoare constantă $21kV$.

Din relația (2.27), impunând condiția de egalitate și exprimând puterea activă în funcție de cea reactivă s-au trasat curbele din figura 2.16, care definesc domeniul de existență a punctelor de echilibru.

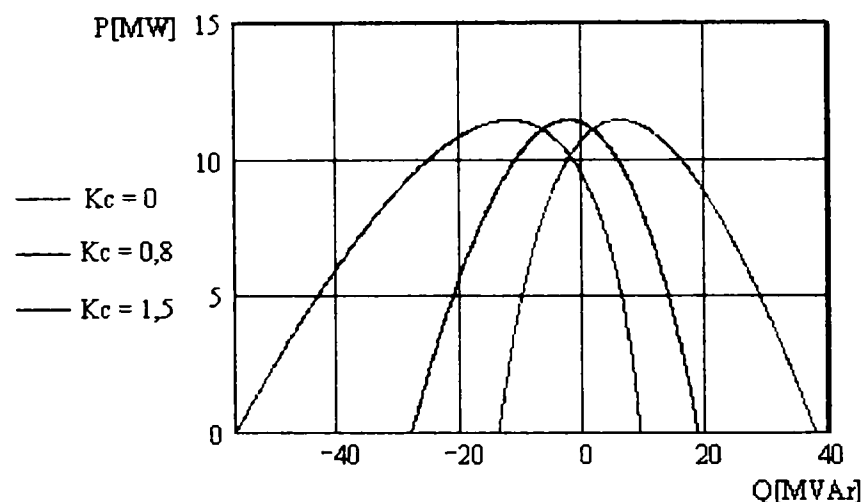


Fig.2.16. Variația puterii active furnizate consumatorului în funcție de puterea reactivă

Analizând figura 2.16 se constată că pentru a furniza putere activă maximă consumatorului, în cazul liniei fără compensare, este necesară o compensare locală a puterii reactive, deci o baterie de condensatoare derivație amplasată la bornele consumatorului care să injecteze în rețea putere reactivă. Prin compensarea capacitivă serie a reactanței liniei se observă că, în funcție de gradul de compensare și factorul de putere al consumatorului, se poate furniza acestuia atât putere activă cât și reactivă.

În figura 2.17 este reprezentată variația tensiunii la bornele consumatorului în funcție de puterea aparentă cerută, pentru un factor de putere de 0,8. Curba tensiunii critice delimitează zona de funcționare stabilă de cea instabilă a rețelei. Astfel, dacă tensiunea în nodul consumator $U_2 > U_{cr}$ și puterea absorbită de consumator $S < S_{cr}$ rețeaua este stabilă, în timp ce pentru $U_2 < U_{cr}$ și $S < S_{cr}$ rețeaua este instabilă. Se observă că prin compensarea capacitivă serie crește puterea maximă furnizată consumatorului și în același timp crește și tensiunea critică. Deci, prin compensarea capacitivă serie se obține o funcționare stabilă a rețelei pentru valori mai mari ale puterii cerute de consumator.

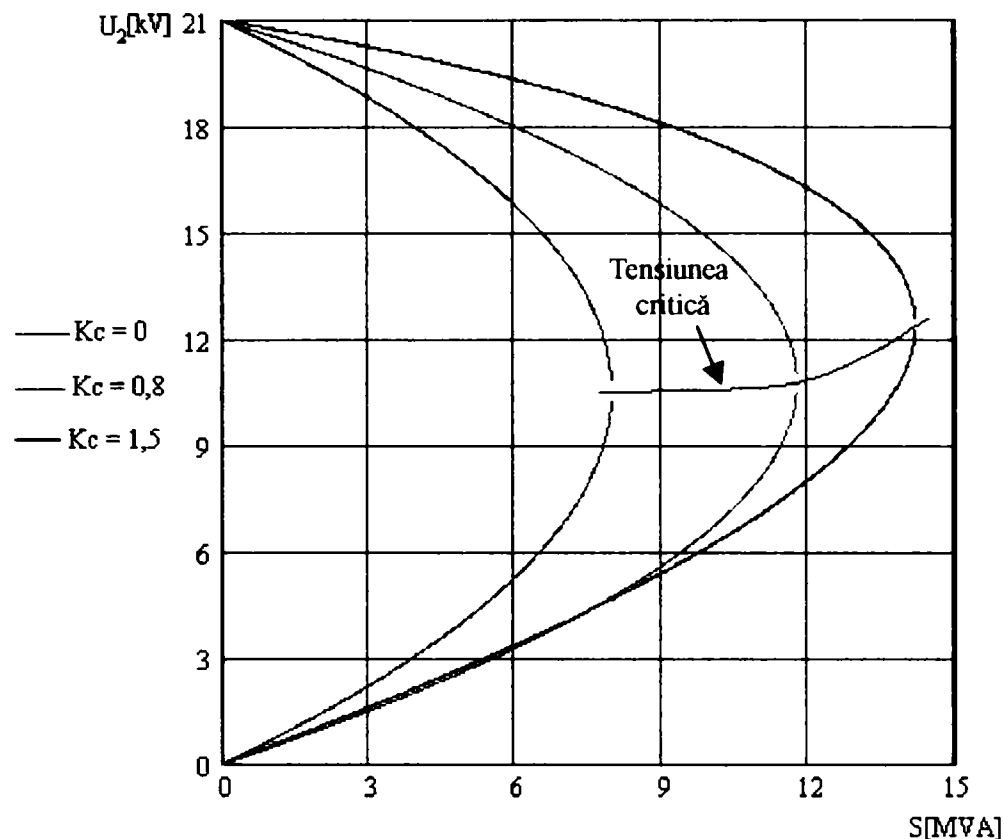


Fig.2.17. Limita de stabilitate a tensiunii la bornele consumatorului în funcție de sarcina S , la $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Pentru aplicația considerată, în figura 2.18 s-au reprezentat suprafețele ce delimitează domeniul punctelor de echilibru ale rețelei. Suprafața notată în figură cu „tensiunea critică” delimitează zona de funcționare stabilă de cea instabilă a rețelei, cu observația ca tensiunea în nodul de consum să fie în limitele admisibile.

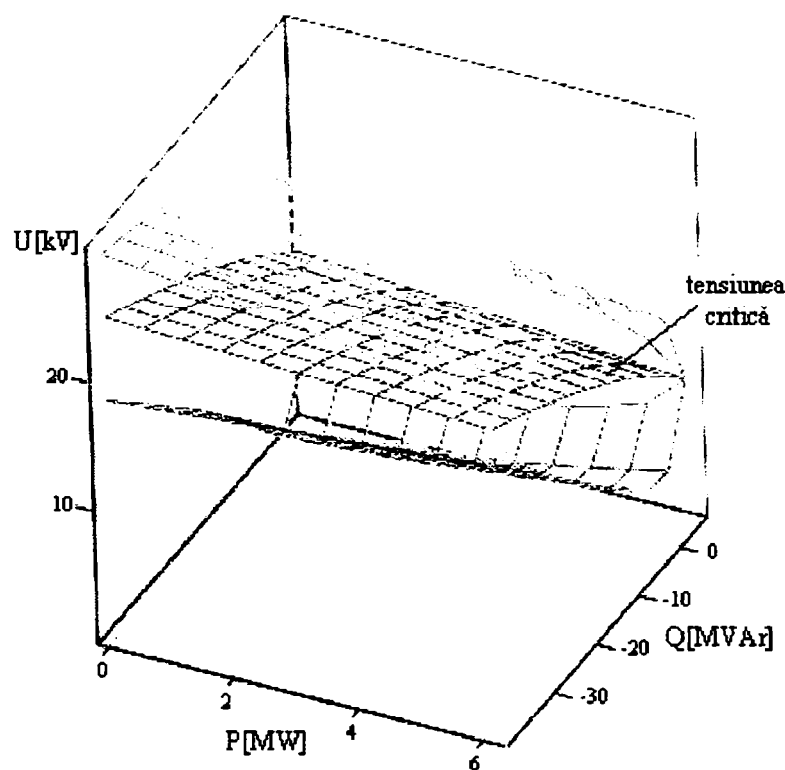


Fig. 2.18. Limitele de stabilitate a tensiunii la bornele consumatorului în funcție de puterea activă P și Q reactivă, în cazul liniei fără compensare.

Dacă tensiunea în nodul de consum este între „tensiunea critică” și suprafața superioară din figură, spunem că rețeaua funcționează stabil, iar în caz contrar este instabilă. Un indicator de apreciere cantitativă a stabilității tensiunii în nodul de consum îl reprezintă rezerva de tensiune dată de relația [C32]:

$$R_U = \frac{U - U_{cr}}{U} \quad (2.33)$$

Pentru ca rețeaua considerată în aplicație să funcționeze stabil, din figura 2.18 se observă că este necesară o compensare locală a puterii reactive, ceea ce determină o creștere a tensiunii la bornele consumatorului peste limitele admisibile. În lipsa acestei compensării, cu toate că există o rezervă de tensiune, nu este permisă funcționarea rețelei datorită nivelului scăzut al tensiunii la bornele consumatorului.

În figura 2.19 s-au reprezentat suprafețele ce delimitează domeniul soluțiilor acceptabile pentru tensiunea la bornele consumatorului, în cazul în care gradul de compensare al reactanței liniei este de 0,8. Comparând diagramele din figurile 2.18 și 2.19 se constată că pentru o anumită putere cerută de consumator, tensiunea la bornele acestuia crește și de asemenea crește și rezerva de tensiune a rețelei.

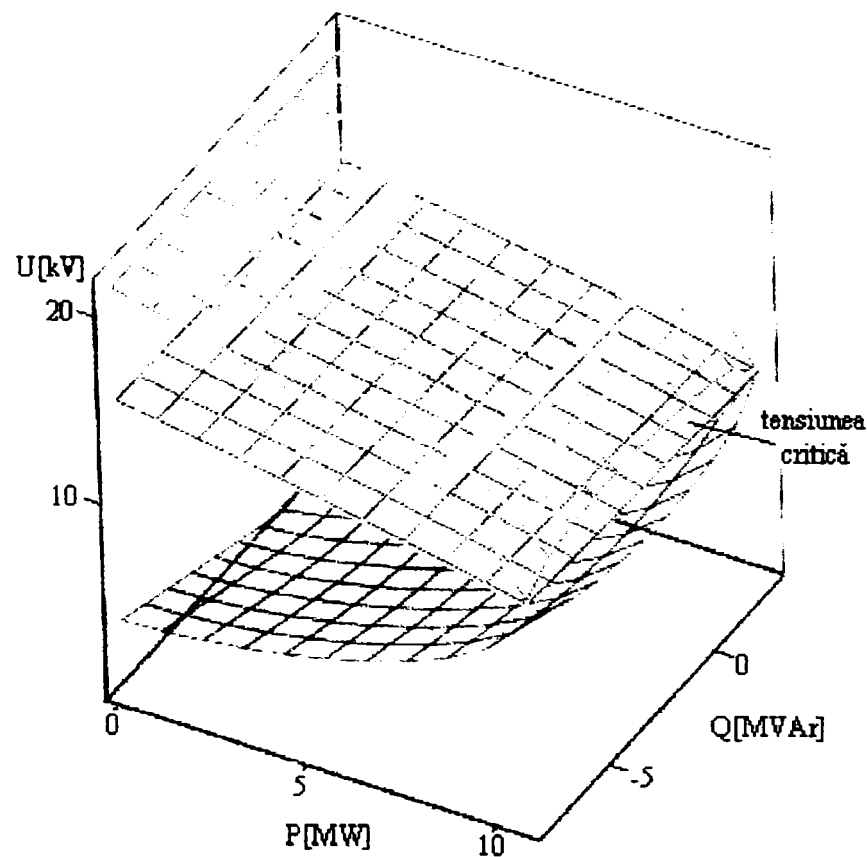


Fig. 2.19. Limitele de stabilitate ale tensiunii la bornele consumatorului în funcție de puterea activă P și reactivă absorbită Q , în cazul liniei compensate capacitiv $K_C = 0,8$.

O reprezentare a tensiunii la bornele consumatorului în funcție de puterea aparentă furnizată acestuia și gradul de compensare al liniei, (fig.2.20), scoate mai bine în evidență eficiența compensării capacitive serie asupra stabilității tensiunii în nodul de consum.

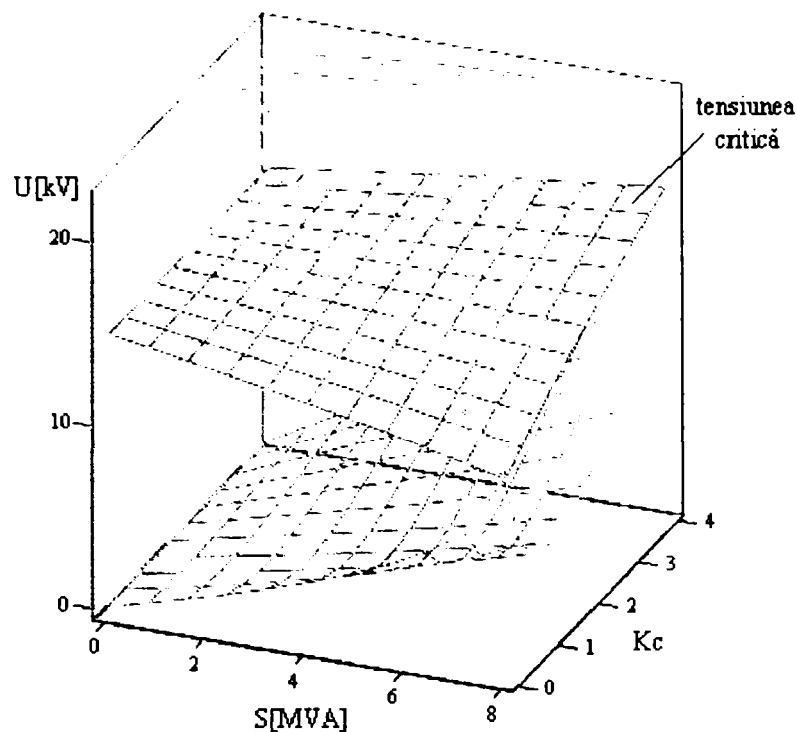


Fig.2.20. Limitele de stabilitate ale tensiunii la bornele consumatorului în funcție de puterea aparentă S și gradul de compensare K_C .

2.4. Fenomene perturbatoare în funcționarea rețelelor cu compensare serie

După cum s-a arătat în paragraful 2.1 compensarea capacitivă serie a rețelelor de medie tensiune are multe efecte benefice asupra funcționării acestora. Cu toate acestea, compensarea capacitivă serie este puțin utilizată în sistemele de distribuție, aplicabilitatea ei a devenit de actualitate odată cu apariția problemelor de asigurare a calității energiei electrice furnizate consumatorilor și a dezvoltării dispozitivelor FACTS, care asigură creșterea performanțelor rețelelor electrice [KO93], [EC97], [GA96], inclusiv sub aspectul reglajului de tensiune [GI95], [PL93]. Compensarea reactanței liniei, care în regim normal de funcționare îmbunătățește performanțele rețelei, la apariția unui defect după bateria de condensatoare poate crea mari probleme. La scurtcircuite simetrice, la bornele bateriei de condensatoare apare o supratensiune proporțională cu valoarea curentului de scurtcircuit, care solicită izolația condensatoarelor. Amplitudinea acestei supratensiunii depinde de locul de amplasare al bateriei de condensatoare și de gradul de compensare al reactanței liniei. Cele mai mari valori ale supratensiunii pe bateria de condensatoare apar în cazul în care bateria ar fi amplasată la începutul liniei și locul de scurtcircuit imediat după baterie. Aceste supratensiuni care apar la bornele bateriei de condensatoare solicită și echipamentele rețelei între sursă și baterie (transformatoare, descărcătoare).

Rețelele de medie tensiune sunt, în general, cu neutrul tratat cu bobină de stingere, legat la pământ printr-un rezistor de limitare sau cu neutrul izolat. Un defect monofazat în rețelele cu neutrul izolat sau tratat, fără compensare, determină creșterea tensiunii pe fazele sănătoase de $\sqrt{3}$ ori tensiunea de fază. Dacă pe linie este amplasată o baterie de condensatoare valoarea supratensiunii pe fazele sănătoase la defect cu punere la pământ este superioară. Aceste supratensiunii solicită descărcătoarele de la începutul liniei sau bornele transformatorului din stație și pot conduce la deteriorarea acestora, având în vedere faptul că durata lor este mare.

Din cele prezentate, rezultă că problema care apare la compensarea capacitivă serie și care a limitat utilizarea ei în rețelele de medie tensiune este asigurarea protecției bateriei de

condensatoare împotriva supratensiunilor. Sistemul de protecție împotriva supratensiunilor limitează tensiunea la bornele bateriei serie la o valoare admisibilă și astfel se reduc și supratensiunile în rețea. În general, pentru protecția bateriei se conectează în paralel cu aceasta varistoare cu oxizi metalici și/sau eclatoare [SH96], [LG96], [LK90], [GH96], care limitează tensiunea pe bateria de condensatoare la o valoare admisibilă.

În rețelele prevăzute cu compensare capacitivă există posibilitatea de apariție a fenomenul de ferorezonanță. Fero-rezonanța este un caz special al rezonanței armonice, determinată de prezența unui condensator în serie cu o bobină cu miez feromagnetic saturat și modificarea bruscă a regimului de funcționare. De exemplu, conectarea unui transformator în gol printr-o linie cu compensare capacitivă. În aceste condiții poate să apară un salt de tensiune la o frecvență mai mică decât frecvența rețelei, care solicită echipamentele rețelei [SS01]. Pentru evitarea fenomenului de ferorezonanță trebuie analizate condițiile în care poate să apară, prin găsirea soluțiilor stabile ale ecuațiilor ce caracterizează circuitul neliniar [NS97], [BP96] și luarea de măsuri pentru limitare. Prin conectarea în paralel cu bateria de condensatoare a unui rezistor de amortizare, de valoare corespunzătoare se poate evita ferorezonanța. De asemenea în timpul manevrelor în rețea și pe durata golurilor de sarcină bateria de condensatoare se scurcircuitază.

Un alt fenomen care poate să apară în rețelele prevăzute cu compensare capacitivă serie este autoexcitația motoarelor asincrone mari, care la pornire nu ajung la turația nominală, ci se rotesc la o turație mai redusă, devenind generatoare de frecvență corespunzătoare acelei turații. În circuitul format de condensatorul serie și reactanța rețelei de alimentare a motorului poate să apară rezonanța pe una din aceste frecvențe, ceea ce determină o creștere a curentului. Motorul funcționează în același timp ca motor și generator, absoarbe din rețea curent la frecvența nominală și îl transformă în cureni de frecvență redusă. În general, liniile de medie tensiune aeriene alimentează consumatorii rurali, motoarele folosite în gospodării au puteri reduse, iar probabilitatea de apariție a rezonanței subsincrone în astfel de rețele este redusă.

Compensarea capacitivă a liniilor electrice aeriene influențează funcționarea protecțiilor acestora și în special a protecțiilor de distanță. Impedanța văzută de releul de distanță depinde foarte mult de protecția condensatoarelor serie împotriva supratensiunilor, de locul de amplasare al acestora, de gradul de compensare al reactanței liniei, de locul defectului.

În regim normal de funcționare, impedanța văzută de releul de distanță este impedanța liniei în serie cu impedanța instalației de compensare. Impedanța instalației de compensare depinde de tipul protecție condensatoarelor împotriva supratensiunilor. Dacă se prevede o protecție cu eclatoare, la funcționarea normală, impedanța văzută de releu este $Z_{releu} = |R_L + j \cdot (X_L - X_C)|$. La un defect după bateria de condensatoare, condensatoarele sunt scurcircuitate de eclator, iar impedanța văzută de releu este mai mare și protecția nu va acționa. În cazul protecției condensatoarelor cu varistoare cu oxizi metalici, la un defect după baterie, se modifică impedanța instalației de compensare $Z_{comp} = R_{MOV} // (-jX_C)$, R_{MOV} are o valoare mică, ceea ce permite trecerea curentului de defect. În funcție de defect, energia varistorului poate atinge valoare nominală, ceea ce implică intrarea în funcțiune a protecției acestuia și scurcircuitarea instalației de compensare [M92]. În acest caz, impedanța văzută de releu se modifică într-un timp foarte scurt, conducând la refuzuri în funcționare sau acționări false.

Alte dificultăți în realizarea protecției liniei ar fi determinate de conectarea și deconectarea condensatoarelor în circuit, prin care se modifică unghiul dintre tensiunea și curentul adus la releul direcțional, acesta poate funcționa greșit.

Evitare problemelor legate de protecția liniilor compensate capacitiv se poate realiza prin alegerea unei scheme de protecție corespunzătoare. În [JA98] este prezentată o nouă tehnică de protecție a liniilor compensate serie ce utilizează semnalele de tensiune de înaltă frecvență induse de defect.

Din analiza efectelor compensării capacitive serie asupra funcționării rețelelor electrice se poate concluziona că folosind sisteme de protecție corespunzătoare pentru bateria de condensatoare utilizarea acesteia are un rol benefic pentru rețele. Efectele negative cauzate de prezenței baterie de condensatoare în rețelele de medie tensiune aeriene ca, fero-rezonanța, rezonanța subsincronă sunt puțin probabil să apară, având în vedere extinderea acestora. Dacă aceste fenomene perturbatoare apar se iau măsuri de limitare a acestora prin conectarea în paralel cu bateria a unor rezistoare de amortizare.

2.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-au trecut în evidență principalele problemele pe care le ridică compensarea capacitivă serie. Cu această ocazie s-a evidențiat faptul că, compensarea serie reprezintă o metodă eficientă de reglare a tensiunii în rețelele de medie tensiune și asigură o stabilitate a tensiunii în nodurile de consum. Rezolvă probleme de flicker și fluctuații de tensiune ce pot apărea în rețele, fiind un regulator cu un timp de răspuns nesemnificativ, nu necesită o instalație de automatizare pentru reglarea tensiunii la fluctuații ale acesteia. De asemenea îmbunătățește regimul de funcționare al rețelelor: reducerea căderilor de tensiune, reducerea pierderilor de putere activă, îmbunătățirea factorului de putere, creșterea capacității de transport.

În vederea asigurării calității energiei furnizate consumatorilor, compensarea capacitivă serie se va utiliza pe liniile ce alimentează consumatori la care funcționarea este însoțită de fluctuații de tensiune, pe liniile electrice unde este necesar asigurarea tensiunilor optime în noduri, pe linii lungi încărcate.

În ultima parte a acestui capitol sunt prezentate fenomenele perturbatoare care pot să apară în rețelele de medie tensiune compensate capacitiv și măsurile ce se impun pentru limitarea acestora.

Contribuțiile aduse în acest capitol se referă la:

- sistematizarea problemelor teoretice pe care le comportă analiza compensării capacitive serie;
- evidențierea avantajelor și dezavantajelor compensării capacitive serie;
- aprecierea eficienței compensării capacitive serie la reglajul tensiunii;
- evidențierea rolului caracteristicilor statice de tensiune ale consumatorilor în efectuarea comparației dintre cele două compensări capacitive: serie și paralel;
- analiza rolului compensării capacitive serie asupra stabilității tensiunii la bornele consumatorilor;
- efectuarea unor aplicații pentru a evidenția eficiența compensării serie în problemele de reglare a tensiunii în rețelele de distribuție;
- prezentarea unor studii de caz care să evidențiază efectele benefice ale compensării capacitive asupra funcționării rețelelor de distribuție și rolul acesteia în stabilitatea tensiunii la bornele consumatorilor.

Capitolul 3

PROBLEMELE COMPENSĂRII SERIE A REȚELELOR DE MEDIE TENSIUNE

3.1. Introducere

Rețelele de medie tensiune sunt în general extinse și alimentează posturile de transformare de la care se dezvoltă rețeaua de joasă tensiune, fig.3.1.

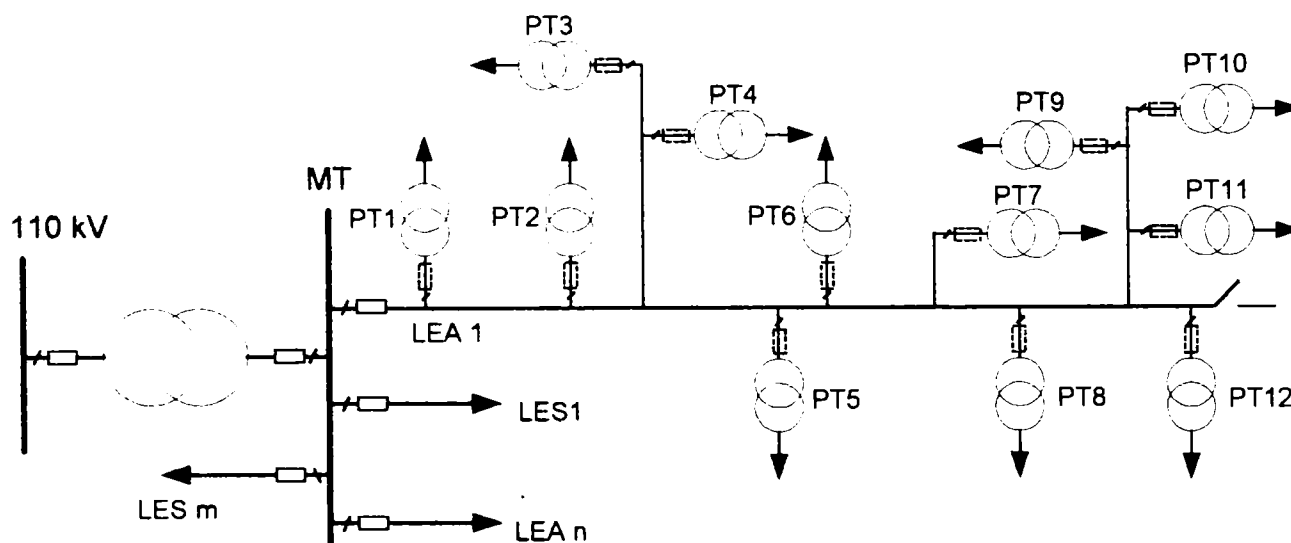


Fig.3.1. Rețea de distribuție publică de medie tensiune

Datorită extinderii rețelei și a căderilor de tensiune de pe linie, tensiunea în unele noduri de consum poate fi sub limita minimă admisibilă, ceea ce necesită o reglare a tensiunii. Utilizarea condensatoarelor serie pentru reglarea tensiunii implică rezolvarea a trei probleme importante [C25], [BB97], [A96], [ML95]: stabilirea locului de amplasare al bateriei de condensatoare, determinarea valorii reactanței acestei și protecția ei.

La stabilirea locului de amplasare al bateriei de condensatoare pe linia de medie tensiune, în vederea îmbunătățirii profilului tensiunii și asigurării valorii optime a tensiunii la bornele consumatorilor, trebuie luate în considerare posibilitățile de reglare a tensiunii din stație, variația sarcinii pe linie, curbele de sarcină ale consumatorilor, parametrii liniilor, restricțiile privind abaterea valorii tensiunii în limitele admisibile. Deci, problema stabilirii locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare serie este complexă, având în vedere mulțimea parametrilor de care trebuie să se țină seama. Ele pot fi tratate împreună sau distinct, cel mai adesea ca o problemă de optimizare: cu o funcție obiectiv clară și restricții bine definite.

Sarcinile electrice pe liniile de medie tensiune se cunosc, în general, la plecarea liniei din stație și mai puțin sunt cunoscute sarcinile repartizate în lungul liniei, în posturile de transformare ce alimentează rețelele de joasă tensiune. Pentru repartizarea puterilor în nodurile de consum (posturi de transformare) în lungul liniei de medie tensiune se pleacă de la puterea măsurată la începutul liniei (în stație) și informațiile disponibile despre puterile absorbite în nodurile de consum. În [C20], [C21] se precizează că o modelare a sarcinilor în nodurile rețelei se poate realiza cu ajutorul graficelor tip de sarcină activă și reactivă ale consumatorilor racordați în nodurile respective și un număr redus de informații culese din

rețea. Astfel, cunoscând graficele tip de sarcină dintr-un nod și curentul, respectiv factorul de putere la o anumită oră sau energia vehiculată prin nod într-un interval de 24 de ore se pot stabili curbele de sarcină ale aceluși nod. O altă metodă de a cunoaște variația sarcinilor în nodurile de consum ar fi realizarea unor prognoze ale sarcinilor electrice în nodurile de consum.

În cadrul acestui capitol se prezintă problematica stabilirii locului optim de amplasare a bateriei de condensatoare și a valorii reactanței ei pentru linii cu sarcini uniform distribuite, distribuite liniar și sarcini concentrate, repartizate în lungul liniei. De asemenea se analizează influența caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței baterie de condensatoare. În subcapitolul 3.3 sunt prezentate scheme de protecție ale baterie de condensatoare împotriva supratensiunilor și defectelor interioare. În ultima parte a acestui capitol sunt prezentate câteva aspecte privind reglarea reactanței bateriei de condensatoare cu ajutorul dispozitivelor bazate pe electronica de putere.

3.2. Stabilirea locului de amplasare și valorii reactanței bateriei de condensatoare serie

La stabilirea locului de amplasare și a valorii optime a reactanței bateriei de condensatoare se pot urmări mai multe obiective, și anume: minimizarea cheltuielilor de instalare și exploatare a bateriei, minimizarea pierderilor de energie pe bateria de condensatoare, creșterea capacității de transport a liniei, minimizarea efectelor economice produse de neasigurarea calității energiei electrice furnizate consumatorilor etc. Ținând seama de acestea, funcția obiectiv poate fi definită

prin relația: $FOB = \sum_{i=1}^n \pm C_i$, în care C_i reprezintă cheltuielile aferente instalării, exploatării

bateriei de condensatoare, a pierderilor de energie pe baterie, a reducerii puterilor instalate în centralele sistemului, a daunelor determinate consumatorilor datorită neasigurării calității energiei furnizate etc.

Dacă se consideră că, cheltuielile de exploatare și instalare nu depind de locul de amplasare al bateriei de condensatoare și ia în considerare doar efectele produse de neasigurarea calității tensiunii la bornele consumatorului, care constituie una din problemele importante ale furnizorului de energie electrică, având în vedere obligația acestuia de asigurare a indicatorilor de performanță, pentru definirea funcției obiectiv se poate apela la indicatorii integrali de calitate. Astfel, funcția obiectiv poate fi definită de exemplu ca suma pătratelor abaterilor tensiunilor din nodurile de consum, care se dorește ca la momentul t să fie minimă, adică:

$$\phi_1 = \sum_i \left(\frac{U_i - U_n}{U_n} \right)^2 = \min \quad (3.1)$$

Această condiție este folosită pentru determinarea locului de amplasare și a valorii reactanței baterie de condensatoare în cazul liniilor cu sarcini uniform distribuite și distribuite liniar.

De asemenea, la stabilirea locului de amplasare, precum și a valorii reactanței bateriei trebuie să se țină seama de condițiile ca tensiunea în orice punct de pe linie să fie menținută în banda admisibilă [S3], căderea de tensiune pe bateria de condensatoare datorată unei suprasarcini pe linie să nu depășească tensiunea maximă admisibilă, instalația de compensare să fie prevăzută cu o protecție corespunzătoare împotriva supratensiunilor cauzate de scurtcircuite și să se evite apariția fenomenelor de rezonanță, [C25]. Aceste condiții sunt exprimate prin relațiile (3.2):

$$\begin{cases} U_{\min adm} \leq U_i \leq U_{\max adm} \\ \Delta U_{C \max} \leq 1,1 \cdot \Delta U_{C adm} \\ I_{C \max} \leq 1,3 \cdot I_{C adm} \end{cases} \quad (3.2)$$

unde: U_i este tensiunea într-o secțiune i de linie;

$\Delta U_{C_{\max}}, \Delta U_{C_{adm}}$ - tensiunea maximă la bornele condensatorului, respectiv cea admisibilă;

$I_{C_{\max}}, I_{C_{adm}}$ - curentul maxim prin condensator, respectiv cel admisibil;

În condițiile în care se cunosc curbele de sarcină în posturile de transformare și în stația de distribuție pe linia ce alimentează acele posturi, pentru stabilirea locului de amplasare a bateriei de condensatoare și a valorii reactanței acesteia se va apela la indicatorul integral de calitate – media abaterilor pătratice ale tensiunii în nodul de consum. Utilizarea indicatorilor integrali de calitate la reglarea optimă a tensiunii în rețelele de distribuție, în condițiile în care puterile absorbite de consumatori sunt variabile aleatoare și respectă legea de distribuție normală este indicată în [C34].

Valoarea optimă a reactanței bateriei de condensatoare, când se cunosc curbele de sarcină ale consumatorului, se determină din condiția (3.3) ca media abaterilor pătratice ale tensiunii în nodul de consum să fie minimă.

$$\phi_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta U^2 = \frac{1}{T} \sum_i \left(\frac{U_i(t) - U_n}{U_n} \right)^2 = \min \quad (3.3)$$

În continuare se consideră câteva situații distincte, corespunzător cărora se va stabili locul de amplasare a bateriei de condensatoare și valoarea reactanței acesteia.

3.2.1. Linia cu sarcini uniform distribuite

Se consideră o rețea cu sarcini echilibrate și uniform distribuite (fig.3.2.). La momentul t se cunoaște sarcina electrică I de la începutul liniei.

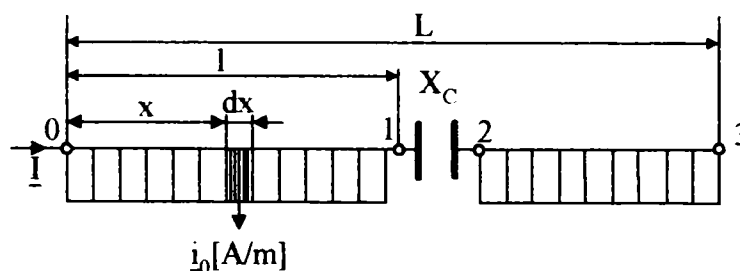


Fig.3.2. Linie cu sarcini uniform distribuite

Pentru linia electrică cu parametrii lineici distribuiți ($z_0 = r_0 + j x_0$, impedanța pe unitate de lungime), presupunând constantă densitatea de sarcină $i_0 = const.$ ($i_0 = i_{0a} - j \cdot i_{0r}$, exprimată în [A/m]), căderea de tensiune pentru linia fără compensare se determină cu relația, [C26]:

$$\Delta \underline{U} = \Delta U + j \delta U = \sqrt{3} \cdot \int_0^L z_0 \cdot i_0 \cdot x dx = \sqrt{3} \cdot z_0 \cdot i_0 \cdot \frac{L^2}{2} \quad (3.4)$$

unde: $\Delta U = \sqrt{3} \cdot (i_{0a} \cdot r_0 + i_{0r} \cdot x_0) \frac{L^2}{2}$ este componenta longitudinală a căderii de tensiune;

L – lungimea liniei;

$\delta U = \sqrt{3} \cdot (i_{0a} \cdot x_0 - i_{0r} \cdot r_0) \frac{L^2}{2}$ - componenta transversală a căderii de tensiune.

În cazul în care linia electrică este prevăzută cu compensare capacitivă serie, (fig.3.2.) și se neglijează componenta transversală a căderii de tensiune, relația de determinare a tensiunii înainte de bateria de condensatoare este:

$$U_1 = U_0 - \Delta u \int_0^l (L - x) dx = U_0 - \frac{\Delta u}{2} \cdot l \cdot (2L - l) \quad (3.5)$$

unde: U_0 este tensiunea la începutul liniei,

r_0, x_0 – rezistența și reactanța specifică, raportate unitatea de lungime,

l – distanța de la începutul liniei până la bateria de condensatoare;

$$\Delta u = \sqrt{3} \cdot (r_0 \cdot i_{0a} + x_0 \cdot i_{0r}) - \text{căderea de tensiune unitară [V/m]}$$

i_{0a}, i_{0r} – componenta activă, respectiv reactivă a curentului pe unitate de lungime [A/m].

Tensiunea în nodul 2, după bateria de condensatoare:

$$U_2 = U_0 - \frac{\Delta u}{2} \cdot l \cdot (2L - l) + \sqrt{3} \cdot X_C \cdot i_{0r} \cdot (L - l), \quad (3.6)$$

Tensiunea la sfârșitul liniei este:

$$U_3 = U_2 - \Delta u \int_l^L (L - x) dx = U_2 - \frac{\Delta u}{2} \cdot (L - l)^2 = U_0 - \frac{\Delta u}{2} \cdot L^2 + \sqrt{3} \cdot X_C \cdot i_{0r} \cdot (L - l) \quad (3.7)$$

Din condiția (3.1) după derivare ($\partial\phi_1/\partial X_C, \partial\phi_1/\partial l$) și efectuarea calculelor rezultă locul de amplasare și valoarea reactanței baterie de condensatoare serie, astfel:

$$l = L - \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left(L^2 - 2 \cdot \frac{(U_0 - U_n)}{\Delta u} \right)} \quad (3.8)$$

$$X_C = \frac{\Delta u}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot i_{0r}} \cdot \sqrt{L^2 - \frac{2 \cdot (U_0 - U_n)}{\Delta u}} \quad (3.9)$$

Analizând relațiile (3.8) și (3.9) se constată că locul de amplasare al bateriei de condensatoare și valoarea reactanței acestora depind de lungimea liniei, de valoarea tensiunii U_0 la începutul liniei, de parametrii unitari ai liniei și de sarcina vehiculată pe linie. Locul de amplasare al bateriei de condensatoare se îndepărtează de începutul liniei pe măsură ce crește tensiunea U_0 , în timp ce reactanța bateriei scade. De asemenea se observă că pentru linii cu conductoare de secțiuni mai mici sau linii mai încărcate bateria de condensatoare este amplasată mai aproape de începutul liniei, iar valoarea reactanței este mai mare.

Aplicație

Dacă se consideră o linie electrică aeriană de $20kV$, având secțiunea conductoarelor de $95mm^2$, cu sarcini uniforme distribuite, în figura 3.3. s-a reprezentat variația gradului de compensare pentru diferite lungimi de linie și factori de putere. Puterea absorbită din stație, la începutul liniei este $\underline{S} = 3 \cdot \exp(j\varphi)MVA$, iar regimul este simetric sinusoidal.

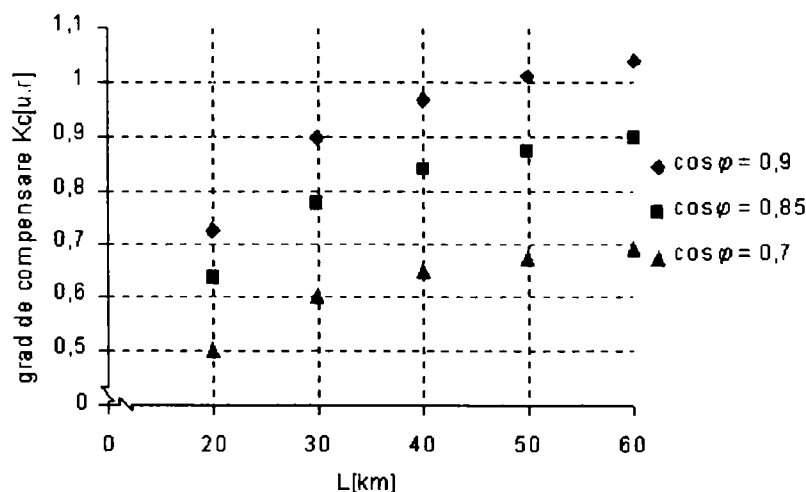


Fig.3.3. Gradului de compensare K_C pentru diferite lungimi de linie și valorile factorului de putere.

Se observă că, gradul de compensare scade odată cu scăderea factorului de putere al consumatorului, dar cum s-a precizat în § 2.1 compensarea capacitivă serie nu se utilizează dacă factorul de putere este sub 0,75. De asemenea se constată o creștere a gradului de compensare cu creșterea lungimii liniei. Variația gradului de compensare cu lungimea liniei se poate aproxima printr-o funcție de forma:

$$K_C(L) = a + \frac{b}{L} + \frac{c}{L\sqrt{L}} + \frac{d}{L^2}, \quad (3.10)$$

unde: a , b , c , d sunt coeficienții funcției care depinde de factorul de putere, tensiunea la începutul liniei, parametrii unitari ai liniei și ei se determină cu metoda celor mai mici pătrate.

Din figura 3.4 se observă că locul de amplasare a bateriei de condensatoare, în condiții în care suma pătratelor abaterilor tensiunii în nodurile de consum este minimă, este influențat mai puțin de factorul de putere al sarcinii și mai mult de lungimea liniei. Pentru o linie de 20km bateria de condensatoare va fi amplasată la $\approx 50\%$ din lungimea liniei, în timp ce pentru o linie de lungime 50km bateria va fi amplasată la $\approx 30\%$ din lungimea liniei (distanța fiind măsurată de la începutul liniei până la locul de amplasare al bateriei).

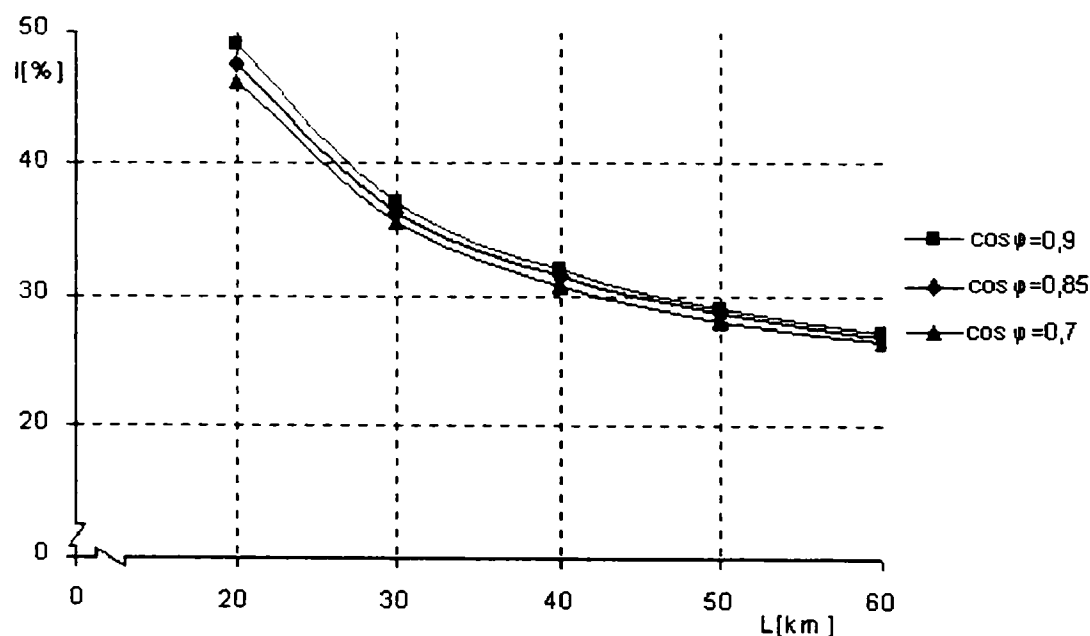


Fig. 3.4. Locul de amplasare al bateriei de condensatoare serie pentru diferite valori ale lungimii liniei și ale factorului de putere

3.2.2. Linie cu sarcini uniform distribuite pentru care compensarea este realizată prin două baterii de condensatoare

În literatură [C34] se apreciază că prin distribuirea instalațiilor de compensare serie în mai multe secțiuni pe linie, se obține un profil îmbunătățit al tensiunii și se evită posibilitatea ca în aval de bateria de condensatoare tensiunea să depășească limita maximă admisibilă. În continuare se consideră o linie electrică cu sarcini uniform distribuite, iar compensarea reactanței acesteia se realizează prin două baterii de condensatoare. Se va determina locul de amplasare al celor două baterii și valoarea reactanței acesteia din condiția (3.1), cu respectarea restricțiilor din (3.2).

Pentru linia electrică cu sarcini uniform distribuite pentru care compensarea se realizează prin două baterii de condensatoare serie, (fig.3.5) tensiunile în nodurile de interes se determină cu relațiile (3.11÷3.15).

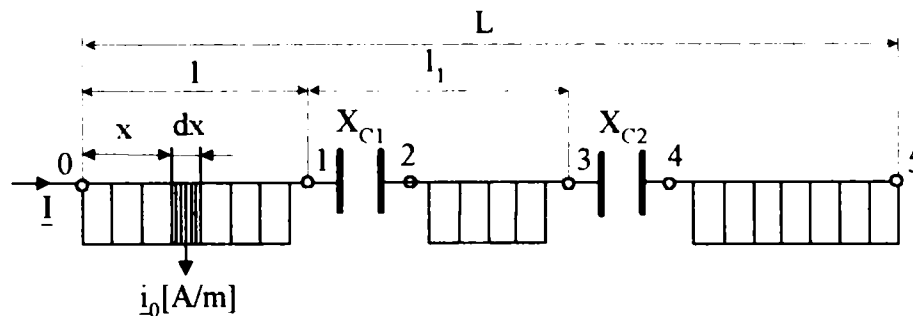


Fig.3.5. Linie cu sarcini uniform distribuite și cu două instalații de compensare serie.

$$U_1 = U_0 - \Delta u \int_0^l (L-x) dx = U_0 - \frac{\Delta u}{2} \cdot l \cdot (2L-l), \quad (3.11)$$

$$U_2 = U_0 - \frac{\Delta u}{2} \cdot l \cdot (2L-l) + \sqrt{3} \cdot X_{C1} \cdot i_{0r} \cdot (L-l), \quad (3.12)$$

$$U_3 = U_2 - \frac{\Delta u}{2} \cdot l_1 \cdot \frac{2(L-l)-l_1}{2} + \sqrt{3} \cdot X_{C1} \cdot i_{0r} \cdot (L-l), \quad (3.13)$$

$$U_4 = U_3 + \sqrt{3} \cdot X_{C2} \cdot i_{0r} \cdot (L-l-l_1), \quad (3.14)$$

$$U_5 = U_0 - \frac{\Delta u}{2} \cdot \frac{L^2}{2} + \sqrt{3} \cdot X_{C1} \cdot i_{0r} \cdot (L-l) + \sqrt{3} \cdot X_{C2} \cdot i_{0r} \cdot (L-l-l_1). \quad (3.15)$$

Din condiția (3.1) după derivare și efectuarea calculelor rezultă valorile reactanțelor X_{C1} , X_{C2} , precum și locurile de amplasare l și l_1 ale celor două baterii de condensatoare serie. Astfel:

$$l = L - \frac{2}{\sqrt{5}} \cdot \sqrt{L^2 - \frac{2 \cdot (U_0 - U_n)}{\Delta u}} \quad (3.16)$$

$$l_1 = \frac{2 - \sqrt{2}}{\sqrt{5}} \cdot \sqrt{L^2 - 2 \cdot \frac{(U_0 - U_n)}{\Delta u}} \quad (3.17)$$

$$X_{C1} = \frac{\sqrt{15}}{30} \cdot \frac{\Delta u}{i_{0r}} \cdot \sqrt{L^2 - \frac{2 \cdot (U_0 - U_n)}{\Delta u}} \quad (3.18)$$

$$X_{C2} = \frac{\sqrt{30}}{30} \cdot \frac{\Delta u}{i_{0r}} \cdot \sqrt{L^2 - \frac{2 \cdot (U_0 - U_n)}{\Delta u}} \quad (3.19)$$

Analizând relațiile (3.16) și (3.17) se constată că locul de amplasare al bateriei de condensatoare (C_1) se îndepărtează de începutul liniei pe măsură ce crește tensiunea pe bara de medie tensiune a stației, în timp ce distanța l_1 dintre cele două baterii se micșorează. Din (3.18) și (3.19) se observă că între reactanțele celor două baterii există relația: $X_{C2} = \sqrt{2} \cdot X_{C1}$. Valorile reactanțelor celor două baterii se reduc dacă tensiunea la începutul liniei crește, respectiv dacă factorul de putere scade, adică crește componenta reactivă a curentului de pe linie. De asemenea se constată că pentru aceeași sarcină distribuită pe o linie de secțiunea mai

mică, valorile reactanțelor celor două baterii cresc, (Δu mai mare), locul de amplasare a bateriei C_1 se apropie de începutul liniei și distanța dintre cele două baterii crește.

Aplicație

Pentru a compara eficiența compensării reactanței liniei prin două baterii de condensatoare, respectiv o singură baterie asupra profilului tensiunii, se consideră o linie electrică aeriană de $20kV$, având conductoarele cu secțiunea de $95mm^2$, cu sarcina uniform distribuită. Puterea aparentă pe linie, la ieșirea din stație este $S = 3 \cdot e^{j\varphi} MVA$, tensiunea pe bara de medie tensiune a stației $U_0 = 20,4kV$.

În figura 3.6 s-a reprezentat variația tensiunii în amonte și aval de bateriile de condensatoare în cazul liniei cu sarcini uniform distribuite, de lungime $40km$ și factorul de putere al sarcinii $0,85$. Analizând figura 3.6 se observă că în cazul liniei compensate printr-o singură baterie de condensatoare, abaterea tensiunii în amonte și aval de baterie, față de tensiunea nominală este $\pm 1,595\%$, iar pentru linia cu două baterii de condensatoare este de $\pm 0,955\%$ pentru prima baterie și ($-0,955\%$ și $+0,32\%$) pentru a doua baterie. Abaterea tensiunii la sfârșitul liniei față de tensiunea nominală pentru cele două situații este aceeași de $-1,595\%$. În concluzie, prin distribuirea bateriilor de condensatoare în mai multe locuri pe linie se îmbunătățește profilul tensiunii, însă având în vedere costul instalațiilor de compensare și comparând abaterile tensiunii în lungul liniei în cele două cazuri cea mai bună soluție ar fi compensarea printr-o singură baterie de condensatoare amplasată la o distanță optimă de începutul liniei.

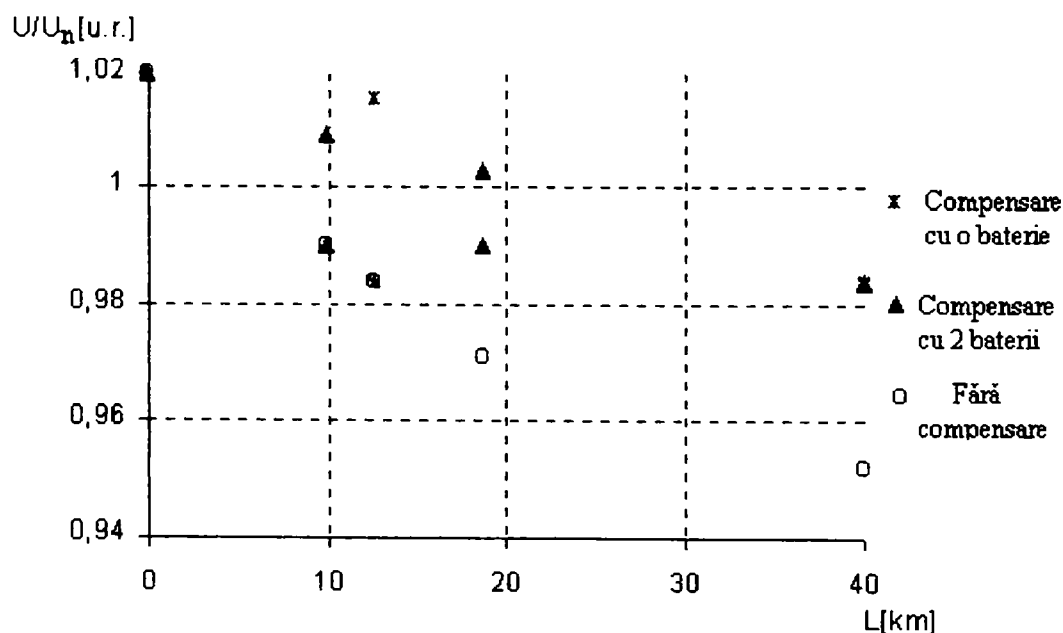


Fig. 3.6. Variația tensiunii în amonte și aval de bateria de condensatoare în cazul unei linii pentru care compensarea se realizează cu o baterie de condensatoare, respectiv cu două.

În figura 3.7 cu X_C este notată reactanța baterie de condensatoare pentru linia cu o singură instalație de compensare, iar cu X_{C1} și X_{C2} reactanțele bateriilor de condensatoare pentru linia cu două instalații de compensare serie.

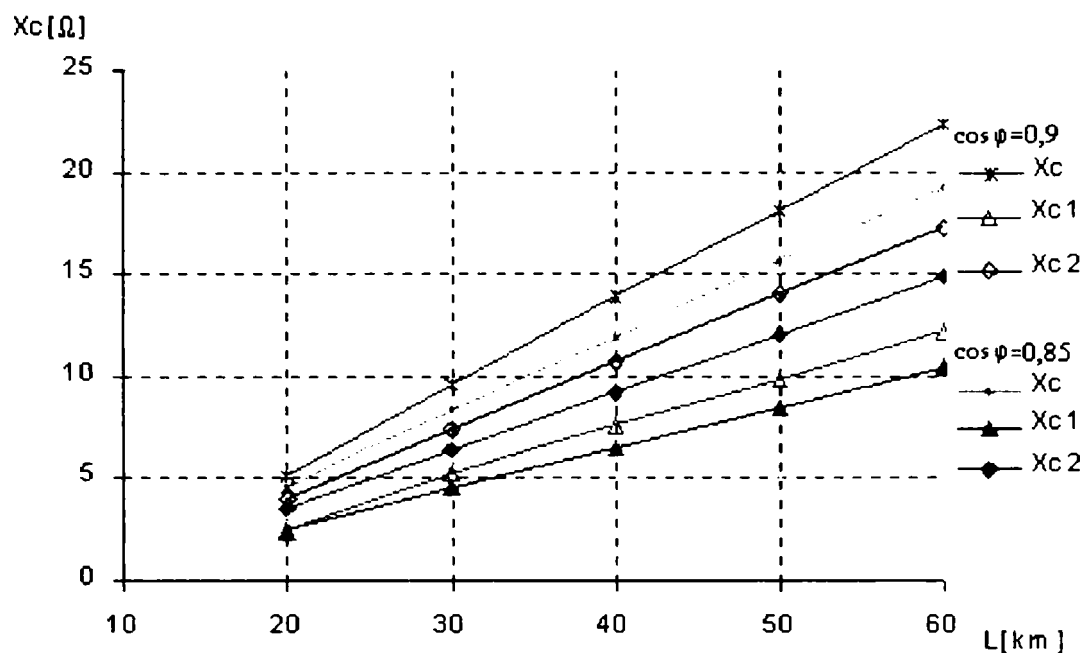


Fig.3.7. Variația reactanțelor bateriilor de condensatoare în funcție de lungimea liniei și factorul de putere al sarcinii.

Analizând cele prezentate în figura 3.7 se observă că pentru o anumită valoare a factorului de putere reactanța bateriei de condensatoare prezintă o variație liniară crescătoare cu lungimea liniei. Valorile reactanței baterie de condensatoare cresc odată cu creșterea factorului de putere. Din figura 3.7 se poate determina reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare pentru o linie de lungime, cuprinsă între 20 și 60km, dacă factorului de putere al consumatorului este 0,9 sau 0,85.

3.2.3. Linia cu sarcini distribuite liniar

Se consideră o linie electrică omogenă, cu parametrii specifici uniform distribuiți, iar sarcina este distribuită liniar ca în figura 3.8.a).

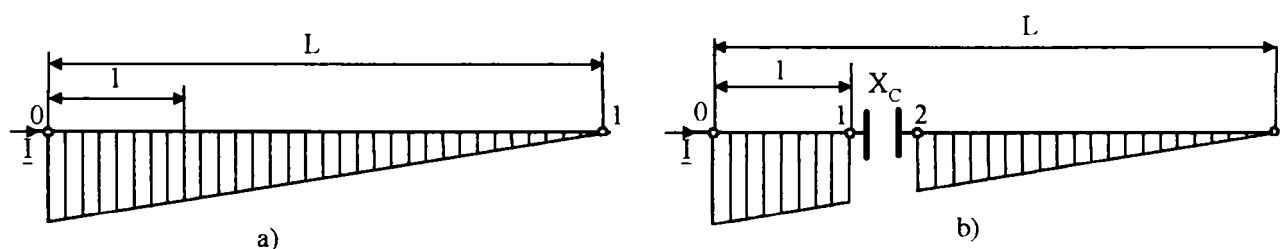


Fig. 3.8. Linie electrică cu sarcini distribuite liniar

Curentul de sarcină prin linie la distanța l este:

$$I_l = I \cdot \frac{(L-l)^2}{L^2} \quad (3.20)$$

Căderea de tensiune pe întreaga linie este dată de relația:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \int_0^L z_0 \cdot I_l dl = \sqrt{3} \cdot z_0 \cdot I \cdot \frac{L}{3}, \quad (3.21)$$

unde: $z_0 = r_0 + jx_0$ este impedanță liniei pe unitate de lungime;

$I = I_a - j \cdot I_r$ - curentul de sarcină total, la începutul liniei.

Din relația (3.21) rezultă că în cazul variației liniare a sarcinii, căderea de tensiune pe linie este egală cu cea produsă de sarcina electrică concentrată I , amplasată în centrul de greutate al triunghiului (fig. 3.8 a)).

Dacă se neglijează componenta transversală a căderii de tensiune, atunci pierderea de tensiune pe linia fără compensare este:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (r_0 \cdot i_{0a} + x_0 \cdot i_{0r}) \cdot \frac{L^2}{3} \quad (3.22)$$

Plecând de la expresia pierderii de tensiune dată de relația (3.22), se stabilesc relațiile de calcul a tensiunilor în nodurile de interes, (fig.3.8 b)).

Tensiunea înainte de bateria de condensatoare este dată de relația:

$$U_1 = U_0 - \frac{\Delta u}{L^2} \cdot \int_0^l (L-x)^2 dx = U_0 - \frac{\Delta u}{3 \cdot L^2} \cdot l \cdot [3L \cdot (L-l) + l^2], \quad (3.23)$$

unde: U_0 este tensiunea la începutul liniei,

$\Delta u = \sqrt{3} \cdot (r_0 \cdot I_a + x_0 \cdot I_r)$ - căderea de tensiune pe unitatea de lungime;

r_0, x_0 - parametrii unitari ai liniei;

I_a, I_r - componenta activă, respectiv reactivă a curentului de sarcină la începutul liniei.

Tensiunea după bateria de condensatoare:

$$U_2 = U_0 - \frac{\Delta u}{3 \cdot L^2} \cdot l \cdot [3L \cdot (L-l) + l^2] + \sqrt{3} \cdot X_C \cdot I_r \cdot \frac{(L-l)^2}{L^2} \quad (3.24)$$

Tensiunea la sfârșitul liniei este:

$$U_3 = U_2 - \frac{\Delta u}{L^2} \int_l^L (L-x)^2 dx = U_0 - \Delta u \cdot \frac{L}{3} + \sqrt{3} \cdot X_C \cdot I_r \cdot \frac{(L-l)^2}{L^2} \quad (3.25)$$

Din condiția (3.1) după derivare ($\partial \phi_1 / \partial X_C, \partial \phi_1 / \partial l$) și efectuarea calculelor rezultă locul de amplasare și valoarea reactanței baterie de condensatoare serie, astfel:

$$l = L - \frac{\sqrt[3]{18}}{6} \cdot (1 - i \cdot \sqrt{3}) \cdot \sqrt[3]{L^2 \cdot \frac{3 \cdot (U_0 - U_n)}{\Delta u} - L^3} \quad (3.26)$$

$$X_C = \frac{2 \cdot \sqrt[3]{18} \cdot \sqrt{3}}{27 \cdot I_r \cdot (1 + i \cdot \sqrt{3})} \cdot \sqrt[3]{L^2 \cdot \frac{3 \cdot (U_0 - U_n)}{\Delta u} - L^3} \quad (3.27)$$

Aplicație

Pentru a evidenția influența distribuției sarcinii electrice în lungul linie asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare, precum și eficiența compensării reactanței liniei se consideră o linie electrică aeriană de 20kV, având conductoarele cu secțiunea de 95mm² și lungime de 40km, cu sarcina uniform distribuită. Puterea aparentă pe linie, la ieșirea din stație este $S = 3,5 \cdot \exp(j\varphi)MVA$, tensiunea pe bara de medie tensiune a stației $U_0 = 20,4kV$. În tabelul 3.1 se compară rezultatele obținute în cazul liniei cu sarcină distribuită uniform și distribuită liniar cu compensare capacitivă serie, respectiv fără compensare când sarcina este distribuită uniform.

Tabelul 3.1. Compensarea capacitivă serie - comparație între distribuția uniformă și cea liniară a sarcinii

	$\cos \varphi$	l [km]	l_1 [km]	X_{C1} [Ω]	X_{C2} [Ω]	ε_{U_1} [%]	ε_{U_2} [%]	ε_{U_3} [%]	ε_{U_4} [%]	ε_{U_5} [%]	$\sum_i \varepsilon_{U_i}^2$ [%] ²	Linia fără compensare ε_U [%]
Distribuție uniformă o baterie	0,8	11,67		11,12		-2,03	2,03	-2,03			12,326	-6,08
	0,9	11,95		14,3		-1,88	1,88	-1,88			10,552	-5,625
Distribuție uniformă 2 baterii	0,8	8,96	9,09	6,09	8,61	-1,22	1,22	-1,22	0,405	-2,03	8,71	-6,08
	0,9	9,27	9	7,83	11,08	-1,13	1,13	-1,13	0,375	-1,88	7,457	-5,625
Distribuție liniară	0,8	10,06		7,83		-1,13	1,13	-1,13			3,825	-3,385
	0,9	10,4		10,6		-1,03	1,03	-1,03			3,171	-3,085

Din tabelul 3.1 se constată că locul de amplasare al bateriei de condensatoare depinde atât de factorul de putere cât și de distribuția sarcinii în lungul liniei. Pentru linia cu sarcini uniform distribuite și cu o singură baterie de condensatoare aceasta va fi amplasată la o distanță mai mare de începutul liniei. Reactanța baterie de condensatoare are valoarea cea mai mică pentru linia cu sarcini distribuite liniar la $\cos \varphi = 0,8$. În ceea ce privește abaterea relativă ale tensiunilor în nodurile de interes, față de tensiunea nominală se observă că valorile cele mai mici se obțin pentru linia cu sarcini distribuite liniar la $\cos \varphi = 0,9$, iar cele mai mari pentru linia cu distribuție uniformă la $\cos \varphi = 0,8$. Dacă se compară abaterea relativă ale tensiunilor la sfârșitul liniei prevăzută cu compensare cu cele ale liniei fără compensare se constată că, în cazul liniei fără compensare, abaterea relativă a tensiunii, față de tensiunea nominală este de cca 3 ori mai mare.

3.2.4. Linie cu sarcini concentrate repartizate în lungul liniei

3.2.4.1. Linie radială cu un singur consumator

Se consideră linia din figura 3.9 care alimentează un consumator, ce absoarbe la capătul ei puterile P și Q variabile pe durata unui interval de timp T.

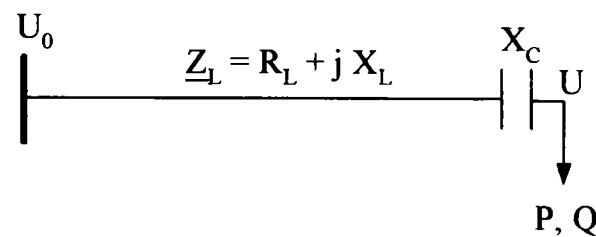


Fig. 3.9. Linie electrică cu un singur nod consumator

Dacă la calculul pierderii de tensiune pe linie se consideră că în nodul de consum tensiunea este cea nominală și se neglijează contribuția componentei transversale a căderii de tensiune, relația (3.3) devine:

$$\phi_2 = \overline{\Delta U^2} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[\frac{U_0}{U_n} - \frac{P_L \cdot R + Q \cdot (X_L - X_C)}{U_n^2} \right]^2 dt = \min \quad (3.28)$$

În relația (3.28) după efectuarea calculelor și apoi derivând funcția ϕ_2 în raport cu X_C și anulând derivata se obține valoarea optimă a lui X_C , adică [BB02]:

$$X_C = X_L + \frac{\overline{PQ}}{Q^2} \cdot R_L - \frac{U_n \cdot (U_0 - U_n)}{Q^2} \cdot \overline{Q} \quad (3.29)$$

unde: \overline{Q} este valoarea medie a puterii reactive pe intervalul T;

$\overline{Q^2}$ - valoarea medie pătratică a puterii reactive; se calculează cu relația:

$$\overline{Q^2} = (\overline{Q})^2 + \sigma_Q^2 \quad (3.30)$$

σ_Q^2 - dispersia față de valoarea medie a puterii reactive;

\overline{PQ} - valoarea medie a produsului puterilor activă și reactivă; se calculează cu relația:

$$\overline{PQ} = \overline{P} \cdot \overline{Q} + \sigma_P \cdot \sigma_Q \cdot r_{PQ} \quad (3.31)$$

r_{PQ} - raportul de corelație dintre variabilele aleatoare P și Q . Cu cât variațiile puterilor P și Q sunt asemănătoare, cu atât r_{PQ} se apropie de valoarea 1.

3.2.4.2. Linie radială cu mai mulți consumatori

Se consideră linia din figura 3.10 ce alimentează consumatorii de puteri P_i, Q_i ($i = 1, \dots, n$) variabile pe durata T.

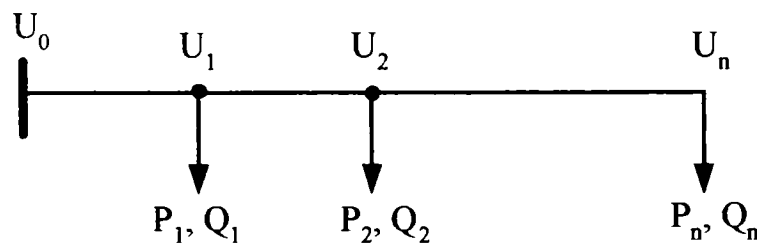


Fig. 3.10. Linie electrică cu mai multe noduri de consum

Datorită faptului că linia electrică alimentează mai multe posturi de transformare se pune problema amplasării bateriei de condensatoare astfel încât să se realizeze un reglaj optim al tensiunii în nodurile de consum. Pentru stabilirea locului de amplasare a bateriei de condensatoare se înlocuiește linia reală cu una echivalentă, fictivă, ce alimentează un consumator

de putere $\sum_{i=1}^n P_i$ și $\sum_{i=1}^n Q_i$, [BB97], [BB02]. Parametrii liniei fictive: rezistența R și reactanța X , se

determină cunoscând valoarea tensiunii în nodul fictiv de consum U_F și raportul R/X egal cu acela al liniei reale. Practic se va considera:

$$R = r_0 \cdot L \text{ și } X = x_0 \cdot L \quad (3.32)$$

unde r_0 și x_0 sunt parametrii specifici pe unitatea de lungime în $[\Omega/km]$, iar $L[km]$ lungimea liniei fictive.

$$\begin{cases} U_F = U_0 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot R + \sum_{i=1}^n Q_i \cdot X}{U_n} \\ R/X = ct. \end{cases} \quad (3.33)$$

În condițiile în care pe o perioadă de timp T sunt înregistrate tensiunile în nodurile de consum U_i ($i = 1, \dots, n$) și energiile consumate E_i , tensiunea fictivă se determină cu relația, [C26]:

$$U_F = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot U_i(t)}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (3.34)$$

Pentru determinarea tensiunii fictive U_F se pune condiția ca media aritmetică a pătratelor abaterilor tensiunilor U_i ($i = 1, \dots, n$) aferente rețelei reale să fie egală cu media pătratelor abaterilor tensiunii fictive U_F , adică:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{U_i(t) - U_n}{U_n} \right]^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{U_F(t) - U_n}{U_n} \right]^2 dt \quad (3.35)$$

Din relațiile (3.33) sau (3.34) și (3.35) după efectuarea calculelor rezultă reactanța liniei fictive și implicit lungimea ei L .

Reactanței bateriei de condensatoare de condensatoare se determină la fel ca și în cazul liniei cu un singur consumator.

Pentru verificarea soluției rezultate din aplicarea relației (3.35) s-a apelat și la metoda sensibilității, metodă des utilizată în problemele de reglare a tensiunii [C18] și de stabilire a locului de amplasare a bateriilor de condensatoare derivație [HY96].

Astfel, pentru fiecare nod "r" se calculează sensibilitatea S_i^X a sumei pătratelor abaterii tensiunilor nodurilor rețelei în raport cu reactanța X_i a tronsonului i de linie la capătul căruia este dispus consumatorul i ,

$$S_i^X = \frac{\Delta \left[\sum_{i=1}^m \Delta U_i^2 \right]}{\Delta X_i} \quad (3.36)$$

S-a modificat succesiv reactanța X_i a tronsonului de linie "r" cu o cantitate ΔX_i și s-a calculat corespunzător variația sumei pătratelor abaterilor tensiunilor nodurilor liniei pe intervalul de timp T . Nodul ce reprezintă sensibilitatea maximă este nodul fictiv, de tensiune U_F în care se va concentra tot consumul liniei.

Aplicație

Se consideră o linie electrică aeriană rurală de distribuție de $20kV$, având lungimea de $38km$ ce alimentează 6 posturi de transformare. Lungimile tronsoanelor și puterile absorbite în regim de sarcină maximă de posturile de transformare, sunt indicate în figura 3.11. Conductoarele sunt din Al-Ol având secțiunea de $70mm^2$, consumatorii sunt considerați ca fiind de același tip, iar curbele de sarcină activă și reactivă zilnice corespund celor prezentate în figura 3.12. Tensiunea la începutul liniei s-a considerat $U = 21kV$, iar raportul dintre rezistența și reactanța liniei este $R/X = 1,274$ ($X_0 = 0,343 \Omega/km$).

Se va stabili locul optim de amplasare al bateriei de condensatoare și valoarea reactanței acesteia în condițiile în care media pătratelor abaterilor tensiunilor în nodurile de consum este minimă și sunt respectate restricțiile (3.2), iar pentru verificare se utilizează metoda sensibilității.

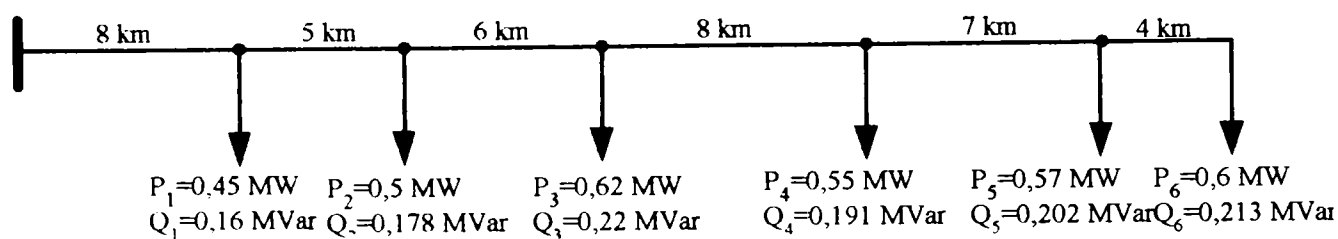


Fig.3.11 Linie electrică aeriană de distribuție

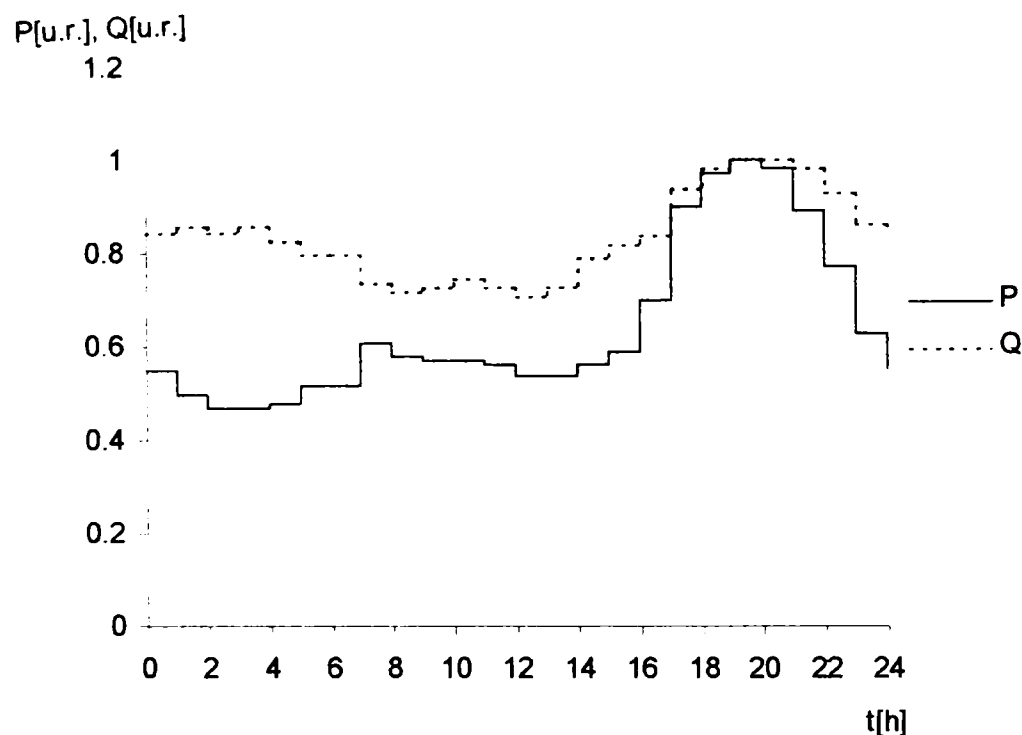


Fig.3.12 Curbele de sarcină activă și reactivă zilnice

Folosind relațiile (3.33) și (3.35) s-a determinat lungimea liniei fictive $L = 20,3878 \text{ km}$, adică locul de amplasare al bateriei de condensatoare. Având în vedere faptul că bateria de condensatoare trebuie amplasată într-un post de transformare, rezultă că cel mai apropiat post este postul 3. Cu ajutorul relația (3.29), în care rezistența și reactanța liniei fictive corespund lungimii liniei de 19 km , se determină valoarea optimă a reactanței baterie de condensatoare $X_C = 6,98 \Omega$. În figurile 3.13 și 3.14 s-au reprezentat variațiile tensiunii în regim de sarcină maximă, respectiv minimă pentru rețeaua electrică de distribuție când bateria de condensatoare este amplasată în diferite posturi de transformare.

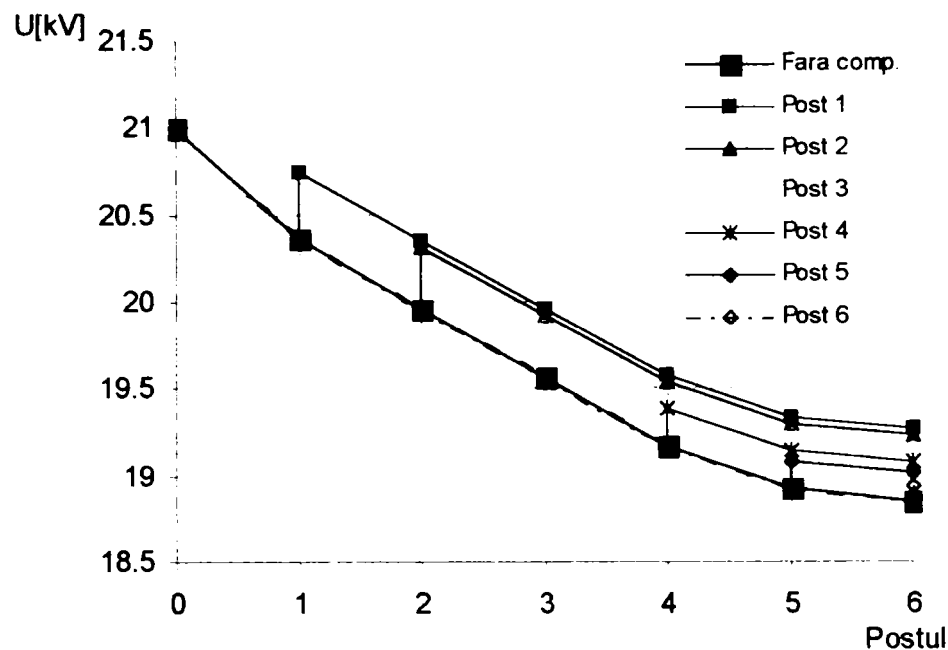


Fig.3.13. Variația tensiunii în lungul liniei pentru diferite locuri de amplasare a bateriei de condensatoare, în regim de sarcină maximă

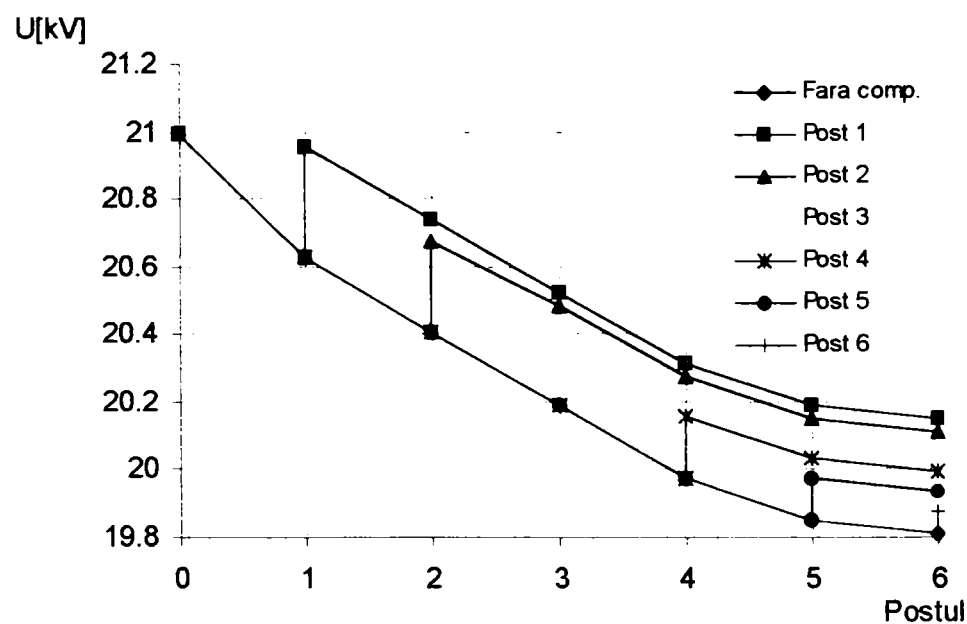


Fig.3.14. Variația tensiunii în lungul liniei pentru diferite locuri de amplasare a bateriei de condensatoare, în regim de sarcină minimă.

Din analiza celor prezentate în fig.3.13 și fig.3.14 se constată următoarele:

- în regim de sarcină maximă, pentru linia fără compensare tensiunea la bornele consumatorilor racordați la posturile 5 și 6 este mai mică de $19kV$, adică $18,931kV$ pentru postul 5, respectiv $18,859kV$ pentru postul 6, ceea ce corespunde unei căderi de tensiune pe linie $> 5\%U_n$;
- amplasarea bateriei de condensatoare în postul 1 determină o creștere semnificativă a tensiunii în nodurile rețelei; în regim de sarcină minimă tensiunea în nodul 1 are o valoare apropiată de tensiunea de la începutul liniei ($20,956kV$), bateria de condensatoare practic compensează căderea de tensiune pe tronson 1, însă suma pătratelor abaterilor tensiunii în nodurile rețelei este mult mai mare chiar și față de linia fără compensare;

- amplasarea bateriei la sfârșitul liniei, în postul 6, nu influențează valoarea tensiunii în celelalte noduri ale rețelei, iar în nodul 6 creșterea tensiunii este redusă (în regim de sarcină maximă această creștere este de 80V). În condițiile regimului de sarcină maximă tensiunea în postul 6 pentru linia fără compensare are valoarea de 18,859kV, iar în cazul amplasării bateriei în postul 6 are valoarea de 18,94kV.
- cel mai bun profil al tensiunii în nodurile rețelei se obține în cazul amplasării bateriei de condensatoare în postul 3. În acest caz suma pătratelor abaterilor tensiunii în posturile de transformare este $\sum \overline{\Delta U^2} = 17,88(\%)^2$, în timp ce pentru linia fără compensare este $\sum \overline{\Delta U^2} = 26,616(\%)^2$.

În figura 3.14 s-a reprezentat curbele de variație ale iregularității tensiunii în noduri pentru diferite locuri de amplasare a bateriei de condensatoare.

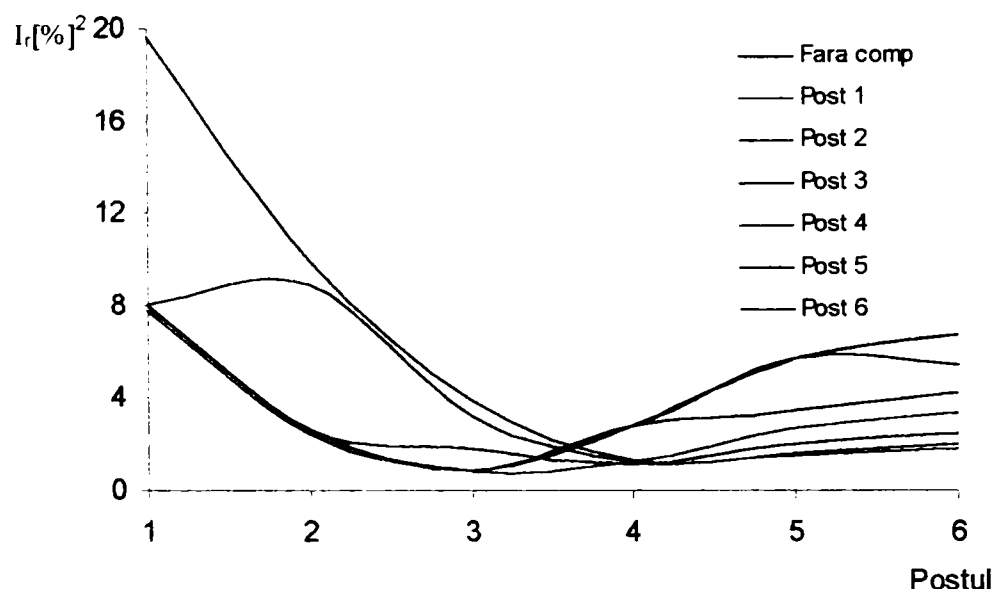


Fig.3.14. Variația gradului de iregularitate a tensiunii în noduri pentru diferite locuri de amplasare a bateriei de condensatoare

Analizând cele prezentate în figura 3.14 se observă că:

- cel mai mare grad de iregularitate al tensiunii în posturile 1, 2 și 3 se obține în cazul amplasării bateriei de condensatoare în postul 1; astfel gradul de iregularitate în postul 1 este de $19,715(\%)^2$, ceea ce conform [C23] se încadrează în limitele unei calități bune a tensiunii;
- pentru linia fără compensare sau în cazul amplasării bateriei de condensatoare în postul 5, respectiv 6 iregularitatea scade până la postul 3 după care crește spre sfârșitul liniei;
- în cazul amplasării bateriei de condensatoare în postul 3, gradul de iregularitate în nodurile rețelei, exceptând nodul 1 este mai mic de $2,6(\%)^2$, ceea ce indică o calitate foarte bună a tensiunii.

Pentru verificarea celor prezentate mai sus, în legătură cu locul de amplasare optim al bateriei de condensatoare, s-a calculat cu ajutorul relației (3.36) sensibilitatea sumei mediilor pătratelor abaterii tensiunii în nodurile rețelei. Calculul sensibilității s-a efectuat în fiecare post pentru diferite valori ale reactanței bateriei de condensatoare X_C , iar rezultatele s-au consemnat în tabelul nr. 3.2.

Tabelul nr.3.2 Valorile sensibilității $S_i^X [kV^2/\Omega]$ în posturile de transformare ale rețelei din figura 3.11.

$X_c[\Omega]$	Postul					
	1	2	3	4	5	6
2	-0,15902	0,006423	0,021612	0,00712	-0,02198	-0,03999
4	-0,08162	-0,00579	0,031415	0,03058	0,012782	-0,0061

Din tabelul 3.2 se observă că cele mai mari valori ale sensibilității S_i^X se obțin când bateria de condensatoare este amplasată în postul de transformare 3, indiferent de valoarea reactanței bateriei. Rezultă că, locul de amplasare al bateriei de condensatoare stabilit cu relația (3.35) corespunde cu cel al sensibilității maxime.

3.2.5. Influența caracteristicilor statice ale consumatorilor asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei condensatoare

După cum s-a specificat în § 2.2 puterilor absorbite de consumatori sunt dependente de tensiunea la borne. Prin compensarea reactanței liniei se modifică tensiunea în nodurile de consum și prin urmare, la stabilirea locului optim de amplasare al bateriei de condensatoare și a valorii reactanței pe lângă evoluția în timp a sarcinii trebuie să se țină seama și de caracteristicile statice ale consumatorilor.

3.2.5.1. Caracteristici statice de tensiune ale consumatorilor

Consumatorii, în general, au în compoziția lor un număr mare de receptoare de puteri diferite și de diverse tipuri. Fiecare tip de receptor are un comportament specific față de modificările tensiunii la borne. Pentru a cunoaște comportarea consumatorului față de modificările tensiunii la borne trebuie să se cunoască ponderea fiecărui tip de receptor în cadrul consumatorului și caracteristicile statice de tensiune ale acestuia.

Liniile electrice aeriene de medie tensiune alimentează, în general, posturile de transformare de unde se dezvoltă rețeaua de distribuție rurală de joasă tensiune. Receptoarele ce formează consumatorul rural sunt diverse (aparate electrocasnice, lămpi iluminat, motoare de puteri, în general, reduse etc.) și au caracteristici statice de tensiune diferite. În literatură [C28] sunt prezentate caracteristicile statice de tensiune pentru câteva tipuri de receptoare. Caracteristica statică de tensiune a unui consumator format din diverse tipuri de receptoare se obține prin combinarea caracteristicilor statice ale receptoarelor în funcție de ponderea fiecăruia. În general, caracteristicile statice de tensiune ale consumatorilor sunt considerate sub formă exponențială (3.37) sau polinomială (3.38) [C17], [C28], adică.

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^\alpha, \quad Q = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^\beta, \quad (3.37)$$

sau

$$P = P_0 \cdot \left[a_0 + a_1 \left(\frac{U}{U_0}\right) + a_2 \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 \right], \quad Q = Q_0 \cdot \left[b_0 + b_1 \left(\frac{U}{U_0}\right) + b_2 \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 \right], \quad (3.38)$$

unde: P_0, Q_0, U_0 sunt valorile de regim ale puterilor și ale tensiunii;

a_i, b_i – coeficienți, care în funcție de valoarea lor indică modul de reprezentare al consumatorului;

α, β - indicii caracteristicilor statice.

Pe baza relațiilor (3.37) și (3.38) în funcție de valorile coeficienților a_i , b_i și α , β se stabilesc caracteristicile statice ale consumatorilor. De exemplu, pentru $\alpha = \beta = 0$ în (3.37) sau $a_0 = b_0 = 1$ și ceilalți coeficienți sunt nuli în (3.38) puterile absorbite de consumatori sunt constante, independente de tensiunea aplicată la bornele acestora.

Un exemplu de caracteristici statice de tensiune sub formă polinomială pentru un consumator complex (casnic, comercial, industrial) întâlnite în literatură [C17] sunt:

$$P = P_0 \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 0,47 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right], \quad Q = Q_0 \cdot \left[6,7 - 15,3 \left(\frac{U}{U_0} \right) + 9,6 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

3.2.5.2. Determinarea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare

Dacă se consideră un consumator alimentat printr-o linie electrică necompensată ce absoarbe din rețea puterile P_i și Q_i , variabile pe o perioadă T , conform unei curbe de sarcină în n trepte, când tensiunea la bornele acestuia este U_i , în cazul compensării reactanței liniei tensiunea la bornele consumatorului crește la valoarea U_i' și prin urmare, vor crește și puterile absorbite de consumatori. Considerând caracteristicile statice de tensiune ale consumatorului de formă exponențială (3.37), puterile absorbite de acesta în condițiile compensării reactanței liniei sunt:

$$P_i' = P_i \cdot \left(\frac{U_i'}{U_i} \right)^\alpha, \quad Q_i' = Q_i \cdot \left(\frac{U_i'}{U_i} \right)^\beta \quad (3.40)$$

Dacă se consideră la calculul pierderii de tensiune pe linie că în nodul de consum tensiunea este cea nominală și se neglijează contribuția componentei transversale a căderii de tensiune, înlocuind în relația (3.28) puterile P_i și Q_i cu P_i' și Q_i' aceasta devine:

$$\phi_2 = \overline{\Delta U^2} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{U_0}{U_n} - \frac{P_i \cdot \left(\frac{U_n}{U_i} \right)^\alpha \cdot R_L + Q_i \cdot \left(\frac{U_n}{U_i} \right)^\beta \cdot (X_L - X_C)}{U_n^2} \right]^2 = \min \quad (3.41)$$

În relația (3.41) după efectuarea calculului și apoi derivând funcția ϕ_2 în raport cu X_C și anulând derivata se obține valoarea optimă a lui X_C , adică:

$$X_C = X_L + U_n^{(\alpha-\beta)} \cdot R_L \cdot \frac{\sum_i P_i \cdot Q_i \cdot \left(\frac{1}{U_i} \right)^{(\alpha+\beta)}}{\sum_i Q_i^2 \cdot \left(\frac{1}{U_i} \right)^{2\beta}} - U_n^{(1-\beta)} \cdot (U_0 - U_n) \cdot \frac{\sum_i Q_i \cdot \left(\frac{1}{U_i} \right)^\beta}{\sum_i Q_i^2 \cdot \left(\frac{1}{U_i} \right)^{2\beta}} \quad (3.42)$$

unde: α și β sunt indicii caracteristicilor statice de tensiune care indică dependența puterilor absorbite de consumator de tensiunea de la borne,

P_i și Q_i - puterile absorbite de consumator pe treapta i a curbei de sarcină, în condițiile în care nu se realizează compensarea reactanței liniei;

U_i - tensiunea la bornele consumatorului când acesta absoarbe din rețea puterile P_i și Q_i .

În aceste condiții, neglijând componenta transversală a căderii de tensiune, tensiunea la bornele consumatorului alimentat printr-o linie compensată capacitiv (fig. 3.9), ținând seama de caracteristicile statice ale consumatorului, se scrie sub forma:

$$U_i' = U_0 - \frac{P_i \cdot \left(\frac{U_i'}{U_i}\right)^\alpha \cdot R_L + Q_i \cdot \left(\frac{U_i'}{U_i}\right)^\beta \cdot (X_L - X_C)}{U_i'} \quad (3.43)$$

unde X_C este determinat cu relația (3.29).

Valoarea tensiunii la bornele consumatorului se determină prin rezolvarea ecuației neliniare (3.43). Gradul de neliniaritate depinde de indicii caracteristicilor statice ale consumatorului.

Pentru a evidenția influența caracteristicilor statice de tensiune asupra valorii reactanței bateriei de condensatoare se consideră aplicația din §2.2, presupunând că puterile active și reactive absorbite de consumator sunt dependente de tensiune conform caracteristicilor statice de formă exponențială (3.37) cu indicii caracteristicilor statice egali cu 2, respectiv de formă polinomială (3.39). Cu ajutorul relațiilor (3.29), (3.39) și (3.42) s-au calculat valorile reactanței bateriei de condensatoare în condițiile în care puterile absorbite de consumator sunt independente de tensiunea aplicată la borne ($X_C = 5,944\Omega$), variază cu pătratul tensiunii aplicate la borne ($X_C = 6,853\Omega$) sau sunt funcții de tensiune de forma (3.39) ($X_C = 6,496\Omega$). Din cele precizate anterior se constată că reactanța bateriei de condensatoare crește cu 15,29% în cazul caracteristicilor statice de tip exponențial și cu 9,287% pentru caracteristicile de tip polinomial (3.39), față de cazul în care puterile se consideră independente de tensiune.

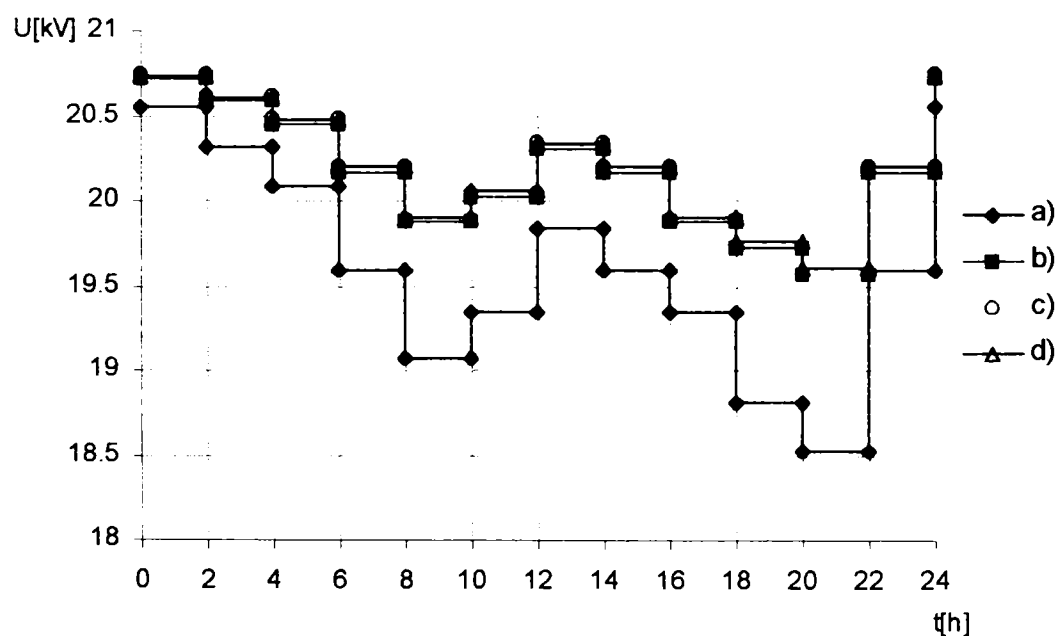


Fig.3.14 Variația tensiunii la bornele consumatorului:

- linia fără compensare;
- linie compensată și puterile absorbite de consumator independente de tensiune;
- caracteristică statică exponențială;
- caracteristică statică polinomială.

Analizând figura 3.14 se constată că tensiunea la bornele consumatorului crește dacă puterile absorbite de acesta sunt funcții de tensiune. În cazul în care caracteristicile statice ale consumatorului sunt de tip polinomial tensiunea la bornele acestuia are valoarea cea mai mare. Totuși, creșterea tensiunii datorată caracteristicilor statice ale consumatorului este mai mică de 0,2%.

Pentru linia cu mai mulți consumatori locul de amplasare al bateriei de condensatoare se determină cu relațiile (3.33) și (3.35) înlocuind puterile absorbite de consumatori, independente de tensiune P_i și Q_i , cu caracteristicile statice de tensiune sub formă exponențială (3.40) sau sub formă polinomială (3.39). Pentru a arăta influența caracteristicilor statice ale consumatorilor asupra locului de amplasare a bateriei de condensatoare s-a considerat aplicația din § 3.2.4.2. În urma efectuării calculelor, locul de amplasare a bateriei de condensatoare a rezultat pentru caracteristica de tip exponențial la distanța $L = 20,1516 km$, iar caracteristica de tip polinomial la distanța $L = 20,4606 km$. Valoarea reactanței bateriei de condensatoare pentru caracteristica exponențială este $X_C = 7,433\Omega$, iar pentru cea de tip polinomial $X_C = 7,28\Omega$.

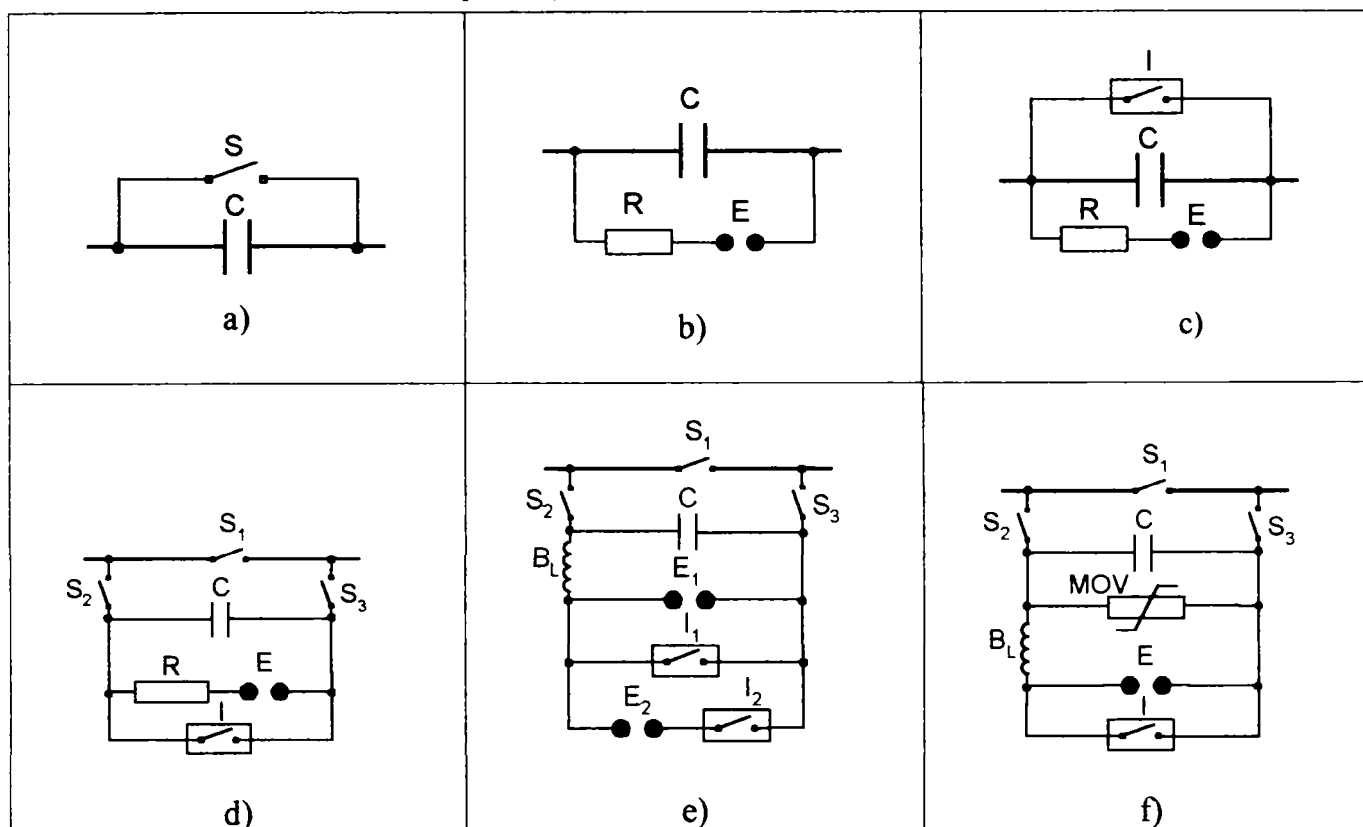
Din cele prezentate mai sus rezultă că bateria de condensatoare este amplasată mai aproape de stația de distribuție cu 1,128% în cazul caracteristicii statice de tip exponențial și mai departe de stație cu 0,3925% pentru caracteristica statică de tip polinomial, față de cazul în care puterile sunt considerate independente de tensiune. Rezultă că la stabilirea locului de amplasare a bateriei se poate neglija influența caracteristicilor statice de tensiune. Valoarea reactanței bateriei de condensatoare este mai mare cu 7,1% pentru caracteristica statică de tip exponențial și cu 4,298% pentru caracteristica statică polinomială, față de cazul în care puterile absorbite de consumatori sunt constante, independente de tensiune. Prin urmare, valoarea reactanței bateriei de condensatoare poate fi influențată de caracteristicile statice de tensiune.

3.3. Aspecte privind protecția bateriei de condensatoare

După cum s-a arătat în paragraful anterior, eficiența bateriei de condensatoare serie în îmbunătățirea profilului tensiunii la bornele consumatorilor depinde de locul de amplasare al acesteia. Pe liniile de medie tensiune, după cum a rezultat din studiul efectuat, bateria de condensatoare se va amplasa într-un post de transformare la o distanță mai mică sau mai mare de începutul liniei, în funcție de mărimile caracteristice ale rețelei. În aceste condiții, instalația de compensare serie este de tip exterior și poate fi montată pe stâlpi portali, dacă puterea acesteia este de câțiva zeci de $kVar$, sau pe sol, în cazul instalațiilor de puteri mai mari [C25]. Nivelul de izolație al bateriei de condensatoare este același ca și al liniei pe care este amplasată. Echipamentele de pe fiecare fază a instalației de compensare sunt așezate pe un suport (platformă), față de care sunt izolate, ceea ce permite o detectare a defectelor de izolație. Împotriva defectelor de izolație, când pot să apară conturnări între echipament și platformă, se prevede o protecție de curent pentru a scurtcircuita rapid și permanent bateria de condensatoare.

O problemă importantă în ceea ce privește compensarea capacitivă serie este asigurarea protecției bateriei de condensatoare împotriva supratensiunilor la scurtcircuitate pe linie cât și a defectelor interioare. Condensatorul este proiectat să funcționeze la o tensiune mult mai mică decât tensiunea nominală a liniei. La o suprasarcină sau un defect pe linie, tensiunea la bornele condensatorului poate atinge o valoare de 5÷20 ori mai mare decât tensiunea nominală, ceea ce conduce la străpungerea izolației condensatorului [C25]. Schemele de protecție ale bateriilor de condensatoare sunt mai simple sau complexe în funcție de puterea acestora, de valorile curenților de scurtcircuit, de importanța liniilor. În literatură sunt prezentate diverse scheme de protecție împotriva supratensiunilor sistematizate în tabelul 3.3.

Tabelul nr.3.3. Scheme de protecție a bateriei de condensatoare împotriva supratensiunilor



Pentru baterii de condensatoare la care puterea nu depășește zeci de $kVar$, curenții de scurtcircuit nu au valori mari și nu există posibilități de apariție a fenomenelor de rezonanță subsincronă și de ferorezonanță, nu este prevăzută o protecție împotriva supratensiunilor (schema a)). În paralel cu bateria de condensatoare este un separator S sau întreruptor de șuntare, pentru ocolirea bateriei de condensatoare [C25]. În acest caz izolația bateriei de condensatoare este dimensionată la $U_{nC} = (0,3 - 0,5)X_C I_{sc}$ și durata scurtcircuitului trebuie să fie limitată sub 0,5s, pentru a evita solicitări de lungă durată ale izolației. În cazul curenților de scurtcircuit de valori mari, bateria de condensatoare este protejată împotriva supratensiunilor cu eclatoare E . Schemele de protecție a bateriilor conțin (c), (d) sau nu (b) întreruptoare de șuntare, iar pentru micșorarea curenților de descărcare în serie cu eclatorul este prevăzută o rezistență de amortizare R [C25].

Bateriile de condensatoare de puteri mari sunt protejate împotriva supratensiunilor fie prin eclatoare (schemele clasice) sau prin varistoare cu oxizi metalici (schemele moderne). Schemele clasice de protecție conțin un eclator sau două eclatoare în paralel (e). În ultimul caz unul, eclatorul E_2 asigură protecția eclatorului principal E_1 , în situația în care arcul în eclatorul E_1 arde un timp îndelungat, [JA98]. Bobina B_L are rol de protecție a eclatorului, limitând curentul de defect în circuitul format de condensator și eclator, reprezentând circuitul de descărcare a bateriei de condensatoare în cazul scoaterii din circuit prin întreruptorul de șuntare. Pentru a preveni apariția condițiilor de rezonanță (subsincronă, ferorezonanță sau hunting) se montează în paralel cu bateria de condensatoare un rezistor de amortizare [C25], [LK90]. Condițiile care trebuie să le îndeplinească rezistorului pentru a se evita fenomenele de rezonanță sunt:

$$R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_l + L_M}{C}} \quad (\text{la rezonanță subsincronă}), \quad R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_l + L_T}{C}} \quad (\text{la ferorezonanță}) \quad (3.44)$$

unde: L_l este inductivitatea liniei compensate;

L_M - inductivitatea motorului alimentat prin linia compensată;

L_T - inductivitatea transformatorului alimenta prin linia compensată.

În schemele moderne de protecție a bateriei de condensatoare eclatoarele au fost înlocuite de varistoare cu oxizi metalici (f), care în cazul unui scurtcircuit limitează tensiunea la bornele baterie la o valoare care nu periclitizează izolația acesteia [LG96], [MC91], [GH96]. Unul din avantajele folosirii varistoarelor la protecția bateriei de condensatoare este că pe durata scurtcircuitului aceasta nu este complet ocolită, astfel încât introducerea în circuit este instantanee și fără supratensiuni [JA98]. Acesta prezintă importanță în problemele de îmbunătățire a stabilității tranzitorie ale sistemului.

Tensiunea maximă la bornele bateriei de condensatoare depinde de caracteristica neliniară curent-tensiune ($I = k \cdot U^\alpha$) a varistorului și de amplitudinea curentului de scurtcircuit. Nivelul de protecție al varistorului este definit de curentul maxim ce trece prin acesta pe durata scurtcircuitului, fiind influențat de locul de amplasare bateriei de condensatoare și de gradul de compensare a reactanței linie [S2]. Varistoarele pe durata defectelor absorb energie care poate determina creșterea exagerată a temperaturii acestora. Pentru a proteja varistorul unele scheme de protecție conțin și eclatoare primesc comandă de amorsare dacă energia absorbită depășește o anumită valoare[S2], [AE89].

Împotriva defectelor interioare bateria de condensatoare se protejează prin siguranțe fuzibile și/sau prin relee. Siguranțele fuzibile sunt conectate în serie cu o unitate sau grup de unități, care în cazul unui defect de izolație sunt scoase din funcțiune. Dacă mai multe unități sunt defecte atunci bateria de condensatoare trebuie să fie scurtcircuitată. Protecțiile prin relee folosite împotriva defectelor interioare sunt: protecția de tensiune minimă (fig.3.15) și protecția diferențială transversală (fig.3.16). Protecția de tensiune minimă poate fi folosită în cazul în care curentul de defect nu produce diferențe de tensiuni mari între faze. Protecția diferențială transversală este mai sensibilă, în unele situații chiar decât siguranțele fuzibile [S1], dar poate fi aplicată numai când bateria de condensatoare este formată din mai multe unități în paralel.

În continuare sunt prezentate trei scheme de protecție împotriva supratensiunilor la defecte pe linii și defectelor interioare: o schemă de protecție clasică cu eclatoare, o schemă de protecție cu varistoare MOV și eclatoare și una cu varistoare și dispozitiv TCSC.

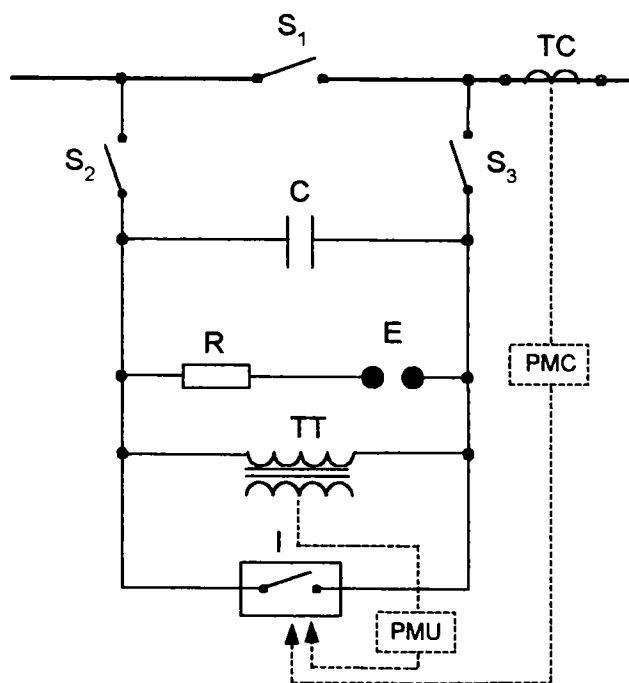


Fig.3.15 Schema de protecție a bateriei de condensatoare

În figura 3.15 protecția baterie de condensatoare împotriva supratensiunilor este realizată de către eclator [C25], care amorsează dacă tensiunea la bornele baterie de condensatoare depășește valoarea prestabilită $((1,5 \div 2)U_{nc})$. În aceste condiții, circuit format

din rezistența de amortizare R și eclator E are o impedanță mult mai mică decât cea a condensatoarelor. Curentul de scurtcircuit de valoare mare trecând prin eclator un timp mai îndelungat ar putea produce deteriorarea acestuia, de aceea este necesară șuntarea eclatorului, care este realizată de întreruptorul I a cărui bobină de declanșare este alimentată de protecțiile maximale de curent în două trepte (PMC), o treaptă rapidă pentru scurtcircuite și una temporizată pentru suprasarcini. Pentru a evita pericolul străpungerii izolației condensatoarelor în timpul arderii arcului în eclator, rezistența de amortizare R trebuie aleasă astfel încât să fie îndeplinită condiția:

$$R \cdot I_{sc} < U_{nC} \quad (3.45)$$

Protecția împotriva defectelor interne (străpungerea izolației unui condensator) este realizată de protecția minimală de tensiune temporizată, alimentată din secundarele transformatoarelor de tensiune monofazate TT legate în conexiune triunghi deschis. Transformatoarele de tensiune servesc și pentru descărcarea sarcinilor reziduale de pe condensatoare. Separatoarele S_1 , S_2 , S_3 și întreruptorul I au același nivel de izolație ca și linia electrică și permit introducerea sau scoaterea din circuit a bateriei de condensatoare.

Îmbunătățirea performanțelor bateriei de condensatoare și a creșterii siguranței în funcționare depind de sistemele de protecție adoptate. Sistemele noi de protecție, bazate pe microprocesoare realizează o monitorizare continuă a curentului prin circuitele bateriei și în cazul depășirii valorilor setate dau comandă de închidere a întreruptorului de șuntare. În schema din figura 3.15 este prezentat un astfel de sistem de protecție și control [AE89].

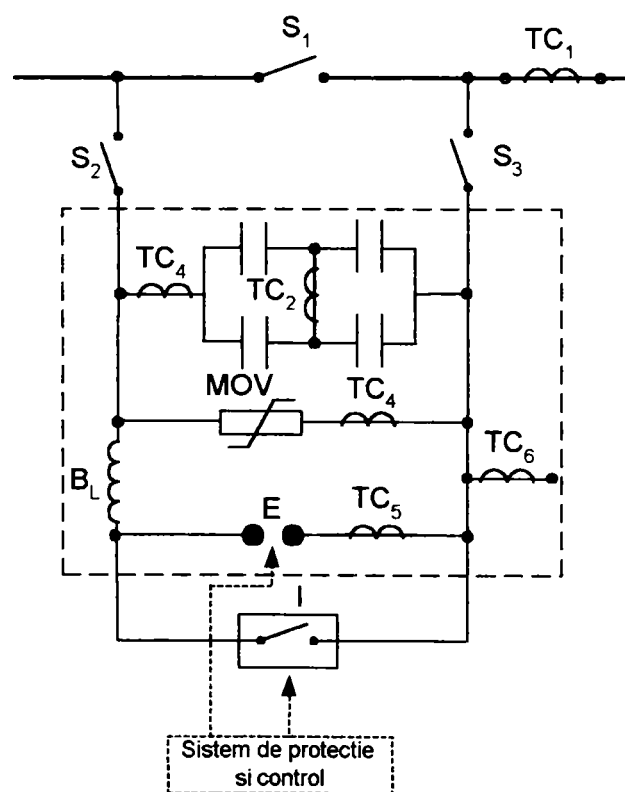


Fig. 3.15 Schema de protecție cu MOV a bateriei de condensatoare

În cazul unui scurtcircuit pe linie când tensiunea la bornele baterie de condensatoare depășește valoarea de prag a varistorului, acesta intră în conducție și preia cea mai mare parte a curentului de defect. Prin transformatorul TC_4 este monitorizat curentul prin MOV și energia absorbită de acesta. În situația în care energia absorbită de MOV depășește valoare setată este emisă o comandă de amorsare a eclatorului E , care are rol de protecție a varistorului. Pentru a evita trecerea curentului de defect un timp îndelungat prin eclator este prevăzută o protecție de curent (TC_5) care dă comandă de închidere a întreruptorului de șuntare. Protecția împotriva rezonanței subarmonice este realizată prin monitorizarea

curentului de pe linie (TC_1) și în cazul în care curentul pe o subarmonică depășește valoarea setată, bateria de condensatoare fiind șuntată de întrerupător. La sesizarea unei suprasarcini (TC_4) prin bateria de condensatoare, care depășește valoare de $1,1I_n$, se dă comandă de închidere a întrerupătorului cu o anumită temporizare, existând posibilitatea de introducere automată a bateriei în circuit. Transformatorul de curent TC_6 alimentează protecția de platformă, care în condițiile unui defect de izolație, va iniția o comandă de închidere și blocare a întrerupătorului. Împotriva defectelor interioare este prevăzută o protecție diferențială alimentată din secundarele transformatoarelor TC_2 . Pentru amortizarea și limitarea curentului de descărcare al bateriei de condensatoare în timpul funcționării eclatorului sau a închiderii întrerupătorului de șuntare este prevăzută o bobină de reactanță B_L .

Pentru a obține diferite grade de compensare a reactanței liniei, de regulă, instalațiile de compensare serie conțin un condensator de capacitate fixă și unul sau mai multe module ce permit reglarea continuă sau în trepte a capacității. Fiecare modul este prevăzut cu o protecție corespunzătoare împotriva supratensiunilor și defectelor interioare. În figura 3.16 este prezentată o schemă de protecție a unui modul TCSC [GA00]. Funcționarea schemei de protecție a acestui modul este asemănătoare cu cea descrisă anterior, deosebirea intervine prin faptul că rolul eclatoarele de protecție a varistoarelor este preluat de modulul TCR ce conține o bobină în serie cu un comutator format din două tiristoare în antiparalel.

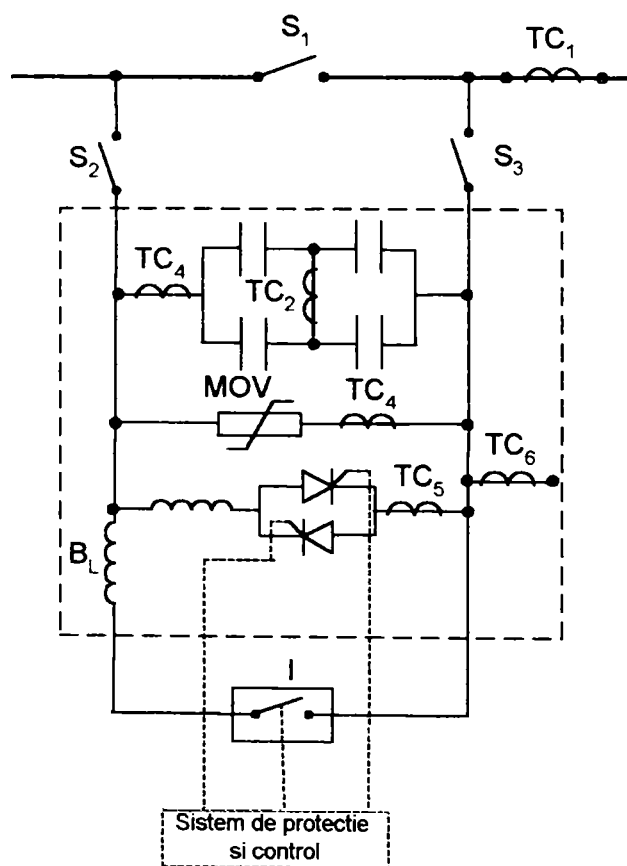


Fig.3.16 Schema de protecție a unui modul TCSC

Schemele de protecție prezentate mai sus sunt relativ complexe și ele sunt în general utilizate pentru bateriile de condensatoare amplasate pe liniile de înaltă tensiune. În cazul liniilor de medie tensiune, în funcție de puterea bateriei de condensatoare, importanța liniei, aceste scheme de protecție pot fi mult simplificate.

3.4. Reglarea reactanței bateriei de condensatoare

Compensarea capacitivă serie a liniilor de transport și distribuție a energiei electrice, după cum s-a precizat în capitolele anterioare, contribuie la îmbunătățirea performanțele

acestor rețele. Posibilitatea reglării valorii reactanței baterie de condensatoare și a valorii tensiunii la bornele acesteia prezintă o importanță deosebită în funcționare optimă a rețelelor.

Progresul neîncetat în domeniul tehnologiilor bazate pe electronica de putere a determinat apariția unor dispozitive (FACTS) ce îmbunătățesc performanțele rețelelor electrice de înaltă tensiune, acționând asupra uneia dintre mărimi: tensiune, impedanță sau unghi de fază. Dispozitivele FACTS sunt folosite, în general, pentru controlul circulației de putere, creșterea capacității de transport a liniilor, limitarea curenților de scurtcircuit, îmbunătățirea stabilității sistemelor, reducerea circulației de putere reactivă, amortizarea oscilațiilor în sistem.

La medie și joasă tensiune se folosesc dispozitive realizate pe principii de bază similare ca și FACTS, numite CUSTOM POWER, pentru creșterea siguranței în alimentare și asigurării unei calități superioare a energiei furnizate consumatorilor. Datorită dimensiunilor mult mai reduse decât a dispozitivele FACTS și ținând seama de costul, pierderile și performanțele cerute, construcția dispozitivelor CUSTOM POWER tinde să difere de cea a FACTS. Dispozitive semiconductoare utilizate la realizarea CUSTOM POWER sunt IGBT (Insulated gate bipolar transistor), care pentru frecvențe ridicate au pierderi de comutație relativ mai mici decât GTO [H97].

Dispozitivele electronice pentru reglarea reactanței bateriei de condensatoare serie folosite, în prezent, în rețele de înaltă tensiune sunt: TSSC (condensatorul serie comutat cu tiristoare), TCSC (condensatorul serie reglat cu tiristoare). Datorită vitezei de răspuns a dispozitivele TCSC, acestea sunt folosite în rețelele de înaltă tensiune cu precădere pentru amortizarea oscilațiilor de putere și a oscilațiilor subsincrone. În literatura de specialitate sunt prezentate numeroase studii privind eficiența dispozitivelor TCSC în amortizare oscilațiilor de putere și îmbunătățire a condițiilor de rezonanța subsincronă [MS99], [OA96], [PW96], [KP03], [GA00], [AG96] precum și în problemele de stabilitate a sistemelor [RC00], [CF99].

Având în vedere faptul că, rolul bateriei de condensatoare serie în rețelele de distribuție este de a îmbunătăți profilul tensiunii în nodurile de consum precum și a calității energiei furnizate consumatorilor, în condițiile unei sarcini variabile, reglarea valorii reactanței capacitive serie este importantă. Dispozitive de reglare a reactanței bateriei de condensatoare serie utilizând electronica de putere sunt puțin folosite la medie tensiune datorită costului ridicat.

În continuare sunt prezentate trei tipuri de dispozitive electronice pentru reglarea reactanței bateriei de condensatoare care pot fi folosite în rețelele de medie tensiune: condensatorul controlat prin tiristoare GTO, condensatorul serie comutat cu tiristoare TSSC și condensatorul serie reglat cu tiristoare TCSC.

3.4.1. Condensator serie controlat cu tiristoare GTO

Acest tip de compensator a fost propus de Karaday în [KO93] și constă dintr-un condensator și două tiristoare GTO conectate în antiparalel (fig. 3.17).

Tiristorul cu blocare pe poartă GTO reunește avantajele unui tiristor standard cu cele ale unui tranzistor de comutație de putere, care poate fi comandat atât pentru amorsare cât și pentru blocare. Amorsarea se realizează prin aplicarea unei tensiuni pozitive între electrodul de grilă și catod, iar blocarea prin aplicarea unei tensiuni negative [C26].

Tensiunea pe condensator poate fi modificată în mod continuu prin unghiul de întârziere a blocării α (fig. 3.18), care poate lua valori între 90° și 180° . Astfel, când unul din tiristoarele GTO este în conducție tensiunea la bornele bateriei de condensatoare este zero, iar când tiristoarele sunt blocate valoarea tensiunii depinde de unghiul de întârziere a blocării α .

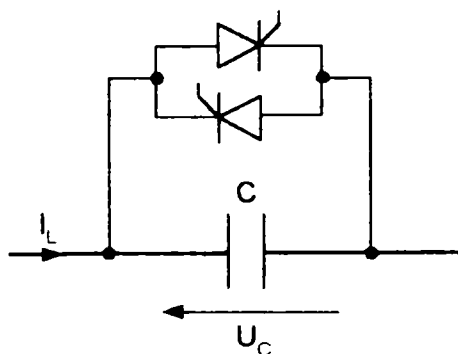


Fig.3.17 Schema simplificată a condensator comandat prin tiristoare GTO

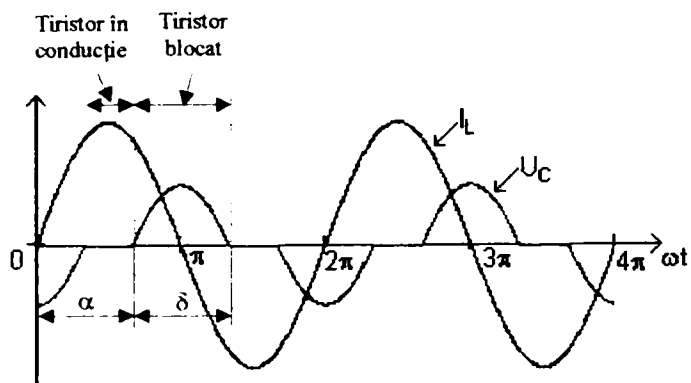


Fig. 3.18. Forma curbelor de tensiunii la bornele bateriei și a curentului

În figura 3.17 dacă se consideră curentul pe linie $i_L(t) = \sqrt{2}I_L \sin(\omega t - \varphi)$ constant și nu este afectat de compensare, atunci tensiunea la bornele baterie de condensatoare este dată de expresia:

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{\alpha}^{\omega t} i_L(t) dt = -\frac{\sqrt{2}I_L}{\omega C} [\cos(\omega t - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi)] \text{ pentru } \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \delta \quad (3.46)$$

unde: φ este defazajul dintre tensiune la borne și curent pe linie;

α - unghiul de întârziere al blocării tiristorului, în raport cu momentul trecerii prin zero a curentului pe linie;

I_L - valoarea efectivă a curentului pe linie;

C - capacitatea condensatorului;

δ - timpul cât tiristorul este blocat, în grade.

Valoarea amplitudinii componente fundamentale a tensiunii pe bateria de condensatoare se calculează cu relația:

$$U_{C_1} = \frac{\sqrt{2}I_L}{\omega C} \cdot \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \cos \omega t \cdot (\cos \omega t - \cos \alpha) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}I_L}{\omega C} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot (\delta - \sin \delta) \quad (3.47)$$

Valoarea efectivă a tensiunii pe bateria de condensatoare este:

$$U_C = \frac{\sqrt{2}I_L}{\omega C} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos \omega t - \cos \alpha)^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2}I_L}{\omega C} \cdot \sqrt{\frac{2\delta + \delta \cdot \cos \delta - 3 \sin \delta}{2\pi}} \quad (3.48)$$

Din relația (3.48) se poate determina reactanța bateriei de condensatoare pe fundamentală:

$$X_{C_1} = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot (\delta - \sin \delta) \quad (3.49)$$

Din această relație se observă că valoarea maximă a reactanței baterie de condensatoare este obținută pentru $\delta=180^\circ$, adică unghiul de întârziere a blocării tiristoarelor $\alpha=90^\circ$ (fig.3.20). Tensiunea la bornele baterie de condensatoare crește odată cu creșterea unghiului de blocare al tiristoarelor (fig.3.19).

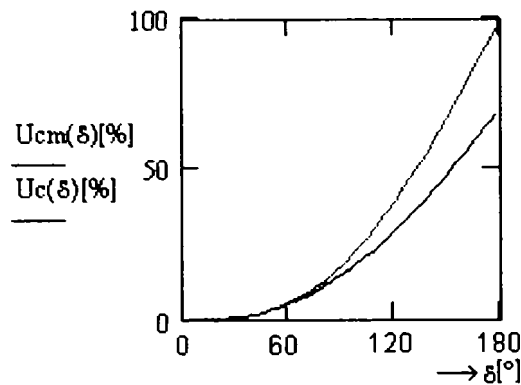


Fig. 3.19. Variația valorii maxime a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare pe fundamentală și a valorii efective, în funcție unghiul δ .

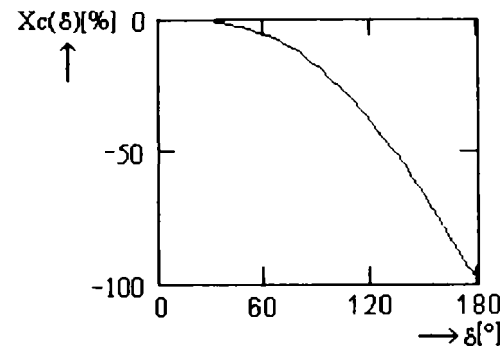


Fig. 3.20. Variația reactanței capacitive a bateriei de condensatoare în funcție unghiul δ .

În continuare se analizează funcționarea unei rețele electrice de medie tensiune prevăzută cu un dispozitiv TSC (fig. 3.21). Circuitul format din condensator în paralel cu GTO are trei stări de funcționare: GTO complet blocat, tensiunea pe bateria de condensatoare are valoarea maximă și corespunde unghiului de întârziere $\alpha=90^\circ$, curentul pe linie I_L trece prin bateria de condensatoare; GTO în conducție totală când tensiunea pe bateria de condensatoare este zero (condensatorul șuntat de circuitul GTO), ceea ce corespunde unghiului de întârziere $\alpha=180^\circ$ și cazul când tiristorul este comandat, unghiul de întârziere a blocării este $90^\circ < \alpha < 180^\circ$.

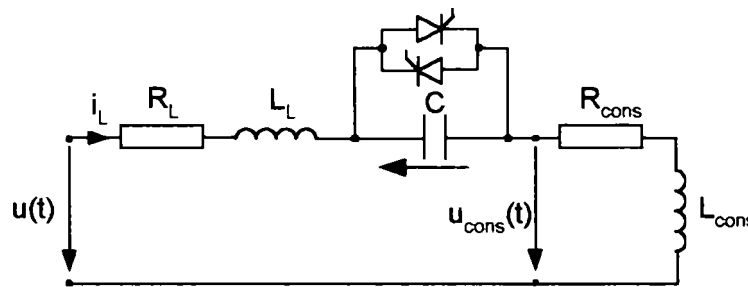


Fig. 3.21. Schema echivalentă monofazată a rețelei de distribuție cu TSC

Expresiile pentru tensiunea la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului, precum și a curentului pe linie, în regim staționar de funcționare, respectiv tranzitoriu, pentru cele trei regimuri de funcționare a schemei TSC:

- GTO complet blocat

Tensiunea sursei de alimentare este $u(t) = U_{\max} \sin(\omega t)$.

$$i_L(t) = \frac{U_{\max} \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(R_L + R_{\text{cons}})^2 + (\omega L_L + \omega L_{\text{cons}} - 1/\omega C)^2}}, \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L_L + \omega L_{\text{cons}} - 1/\omega C}{R_L + R_{\text{cons}}} \quad (3.50)$$

$$u_C(t) = -\frac{1}{\omega C} \cdot \frac{U_{\max} \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(R_L + R_{\text{cons}})^2 + (\omega L_L + \omega L_{\text{cons}} - 1/\omega C)^2}} \quad (3.51)$$

$$u_{\text{cons}}(t) = Z_{\text{cons}} \frac{U_{\max} \sin(\omega t - \varphi + \varphi_c)}{\sqrt{(R_L + R_{\text{cons}})^2 + (\omega L_L + \omega L_{\text{cons}} - 1/\omega C)^2}}, \varphi_c = \tan^{-1} \frac{\omega L_{\text{cons}}}{R_{\text{cons}}} \quad (3.52)$$

- GTO în conducție totală

$$i_L(t) = \frac{U_{\max} \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(R_L + R_{\text{cons}})^2 + (\omega L_L + \omega L_{\text{cons}})^2}}, \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L_L + \omega L_{\text{cons}}}{R_L + R_{\text{cons}}} \quad (3.53)$$

$$u_C(t) = 0 \quad (3.54)$$

$$u_{\text{cons}}(t) = Z_{\text{cons}} \frac{U_{\max} \sin(\omega t - \varphi + \varphi_c)}{\sqrt{(R_L + R_{\text{cons}})^2 + (\omega L_L + \omega L_{\text{cons}})^2}}, \varphi_c = \tan^{-1} \frac{\omega L_{\text{cons}}}{R_{\text{cons}}} \quad (3.55)$$

- GTO comandat $90^\circ < \alpha < 180^\circ$

$$i_L(t) = \frac{U_{\max} \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(R_L + R_{\text{cons}})^2 + (\omega L_L + \omega L_{\text{cons}} - (\delta - \sin \delta)/\pi\omega C)^2}}, \quad (3.56)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega(L_L + L_{\text{cons}}) - (\delta - \sin \delta)/\pi\omega C}{R_L + R_{\text{cons}}} \quad (3.57)$$

$$u_C(t) = -\frac{\delta - \sin \delta}{\pi \cdot \omega C} I_{L\max} \cos(\omega t - \varphi) \quad (3.58)$$

$$u_{\text{cons}}(t) = Z_{\text{cons}} \cdot I_{L\max} \sin(\omega t - \varphi + \varphi_c) \quad (3.59)$$

Comportamentul dinamic al TSC este modelat prin ecuația de stare neomogenă, [HP97]:

$$\dot{Y}(t) = A(t) \cdot Y(t) + B \cdot U(t) \quad (3.60)$$

Conform figurii 3.21 ecuația (3.60) se poate scrie sub forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_C(t) \\ \dot{I}_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{s(t)}{C} \\ -\frac{s(t)}{L_L + L_{\text{cons}}} & -\frac{R_L + R_{\text{cons}}}{L_L + L_{\text{cons}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_C(t) \\ I_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L_L + L_{\text{cons}} \end{bmatrix} \cdot U_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.61)$$

unde: $s(t)=1$ când tiristoarele sunt blocate și $s(t)=0$ când tiristoarele sunt în conducție.

Coefficienții matricei $A(t)$ depind de starea tiristoarelor, astfel A_1 corespunde stării blocate, iar A_2 stării de conducție a tiristoarelor:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L_L + L_{\text{cons}}} & -\frac{R_L + R_{\text{cons}}}{L_L + L_{\text{cons}}} \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_L + R_{\text{cons}}}{L_L + L_{\text{cons}}} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Ecuația diferențială de ordinul 1 liniară, neomogenă (3.60) are soluția generală de forma:

$$Y(t) = e^{\int A(t) dt} \cdot \left[K + \int B \cdot U(t) \cdot e^{-\int A(t) dt} dt \right], \quad (3.63)$$

unde K este o constantă ce se determină din condițiile inițiale, la momentul $t = t_0$, iar $A(t)$ este egală cu A_1 sau A_2 în funcție de starea tiristoarelor.

Ținând seama de condițiile inițiale soluția ecuației diferențiale (3.63) este:

$$Y(t) = e^{At} \cdot \left[e^{-At_0} \cdot Y(t_0) + \int_{t_0}^t B \cdot U(\tau) \cdot e^{-A\tau} d\tau \right] \quad (3.64)$$

în care matricea e^{At} se poate scrie sub forma [C29]:

$$e^{At} = X \cdot e^{\Lambda t} \cdot X^{-1} \quad (3.65)$$

unde: X este matricea modală care are pe coloane vectorii proprii ai matricei A ce corespund valorile proprii Λ ale acesteia.

Expresia (3.65) are forma:

$$e^{At} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} \\ x_{12} & x_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} \\ x_{12} & x_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.66)$$

Din relațiile (3.64), (3.66) rezultă vectorul mărimilor de stare de forma:

$$\begin{bmatrix} U_C(t) \\ I_L(t) \end{bmatrix} = e^{At} \cdot \left[e^{At_0} \begin{bmatrix} U_C(t_0) \\ I_L(t_0) \end{bmatrix} + \frac{U_{\max}}{L_L + L_{\text{cons}}} \cdot X \cdot \begin{bmatrix} [m_{11} & m_{12}][F_{\lambda_1}(t) - F_{\lambda_1}(t_0)] \\ [m_{21} & m_{22}][F_{\lambda_2}(t) - F_{\lambda_2}(t_0)] \end{bmatrix} \right] \quad (3.67)$$

unde: m_{ij} este element al inversei matricei modale X^{-1} ,

$$F_{\lambda_i}(t) = \frac{1}{\lambda_i^2 + \omega^2} \cdot e^{\lambda_i t} \cdot [\lambda_i \cos \omega t - \omega \sin \omega t], \quad (3.68)$$

λ_i –valorile proprii ale matricei A .

3.4.2. Condensatorul serie comutat cu tiristoare (TSSC)

Compensatorul serie cu impedanță variabilă TSSC este format din module, care conțin fiecare un condensator controlat printr-un comutator static montat în paralel [EC97]. De obicei, din motive economice instalațiile de compensare serie conțin o baterie de condensatoare cu capacitate fixă și mai multe module cu capacitate variabilă. Schema simplificată a unei astfel de instalație de compensare este prezentată în figura 3.22.

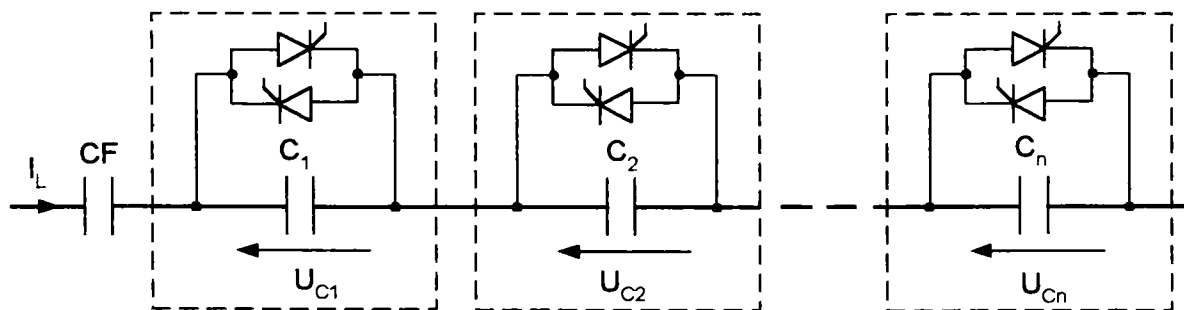


Fig. 3.22. Schema simplificată a unui compensator serie cu impedanță variabilă TSSC

Gradul de compensare al reactanței liniei este controlat în trepte prin creșterea sau descreșterea numărului de condensatoare inserate pe linie. Un condensator este inserat sau ocolit prin închiderea sau deschiderea comutatorului cu tiristoare.

3.4.3. Condensatorul controlat cu tiristoare TCSC

TCSC este alcătuit dintr-un condensator aflat în paralel cu o bobină în serie cu un comutator bidirecțional (fig. 3.23). Comutatorul bidirecțional este format din două tiristoare montate în antiparalel.

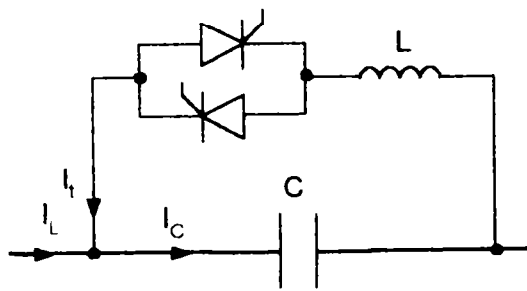


Fig.3.23. Schema simplificată a unui modul TCSC

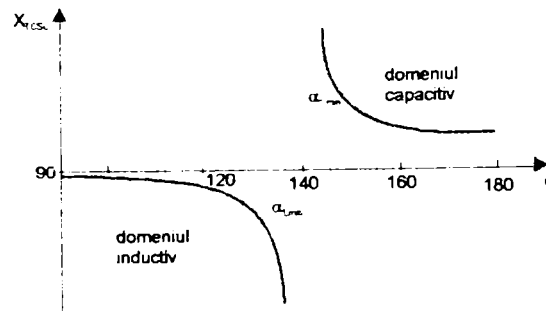


Fig.3.24. Caracteristica de impedanță a TCSC la frecvența fundamentalei

Circuitul TCSC are trei regimuri de funcționare: tiristoarele blocate, condensatorul este în circuit; tiristoarele în conducție totală, condensatorul este șuntat de bobina L de impedanță mică și regimul cu reglaj de fază a semnalelor pe poartă, când tiristoarele sunt în conducție parțială. În primul caz, impedanța TCSC are un caracter capacitiv fiind egală cu reactanța capacitivă a condensatorului. În al doilea caz, impedanța TCSC este pur inductiv egală cu reactanța bobinei L. În regimul de funcționare cu reglaj de fază, impedanța poate fi capacitivă sau inductivă în funcție de unghiul α de întârziere a aprinderii tiristoarelor. Impedanța caracteristică a TCSC în funcție de unghiul de întârziere a aprinderii al tiristoarelor, în regim staționar este [E02]:

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C}, \quad (3.69)$$

unde: X_C este reactanța capacitivă a condensatorului C;

$X_L(\alpha)$ – reactanța inductivă a TCR, care depinde de unghiul de întârziere a aprinderii al tiristoarelor se calculează cu relația:

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha}, \quad X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (3.70)$$

La funcționarea în domeniul inductiv a TCSC reactanța inductivă crește de la valoarea minimă X_L corespunzătoare unghiului de întârziere a aprinderii tiristoarelor $\alpha = 90^\circ$ până la valoarea maximă ce corespunde unghiului α_{Lmin} (fig.3.24). TCSC funcționează în domeniul inductiv atunci când este folosit pentru limitarea curenților de scurtcircuit [GI95].

În domeniul capacitiv, valoarea reactanței capacitive a TCSC crește de la valoarea $1/\omega C$ corespunzătoare unghiului de întârziere a aprinderii tiristoarelor $\alpha = 180^\circ$ la valoarea maximă ce corespunde unghiului α_{Cmin} .

Aplicație

Pentru a arăta cum influențează unghiul de întârziere a blocării tiristorului (α) valoarea tensiunii pe bateria de condensatoare și la bornele consumatorului s-a considerat o linie electrică aeriană de $20kV$, având lungimea $30km$ și secțiunea conductoarelor de $70mm^2$, care alimentează un consumator ce absoarbe o putere aparentă $S = 3,529MVA$ la un factor de putere $\cos \varphi = 0,85$. Tensiunea la începutul linie are valoare de $21 kV$. Gradul de compensare al reactanței liniei s-a considerat $Kc = 1,8$, ceea ce corespunde situației când curentul de pe linie trece complet prin bateria de condensatoare (tiristoarele sunt blocate). Schema echivalentă monofazată a rețelei de distribuție considerată este prezentată în figura 3.21. S-au analizat cazurile: 1) unghiul de întârziere a blocării tiristorului $\alpha = 90^\circ$, 2) unghiul de întârziere a blocării tiristorului $\alpha = 120^\circ$; 3) unghiul de întârziere a blocării tiristorului $\alpha = 135^\circ$. În urma efectuării calculelor cu ajutorul relațiilor stabilite în § 3.4.1, neglijându-se

componenta tranzitorie care apare la blocarea conducerii tiristoarelor, în figura 3.25 s-au trasat curbele de variație ale tensiunii la bornele consumatorului ($U_{cons}(t)$)- linie necompensată, ($UC_{cons}(t)$)- linie compensată), și ale bateriei de condensatoare ($U_c(t)$) este reglată prin unghiul de întârziere (α) a blocării tiristorului GTO.

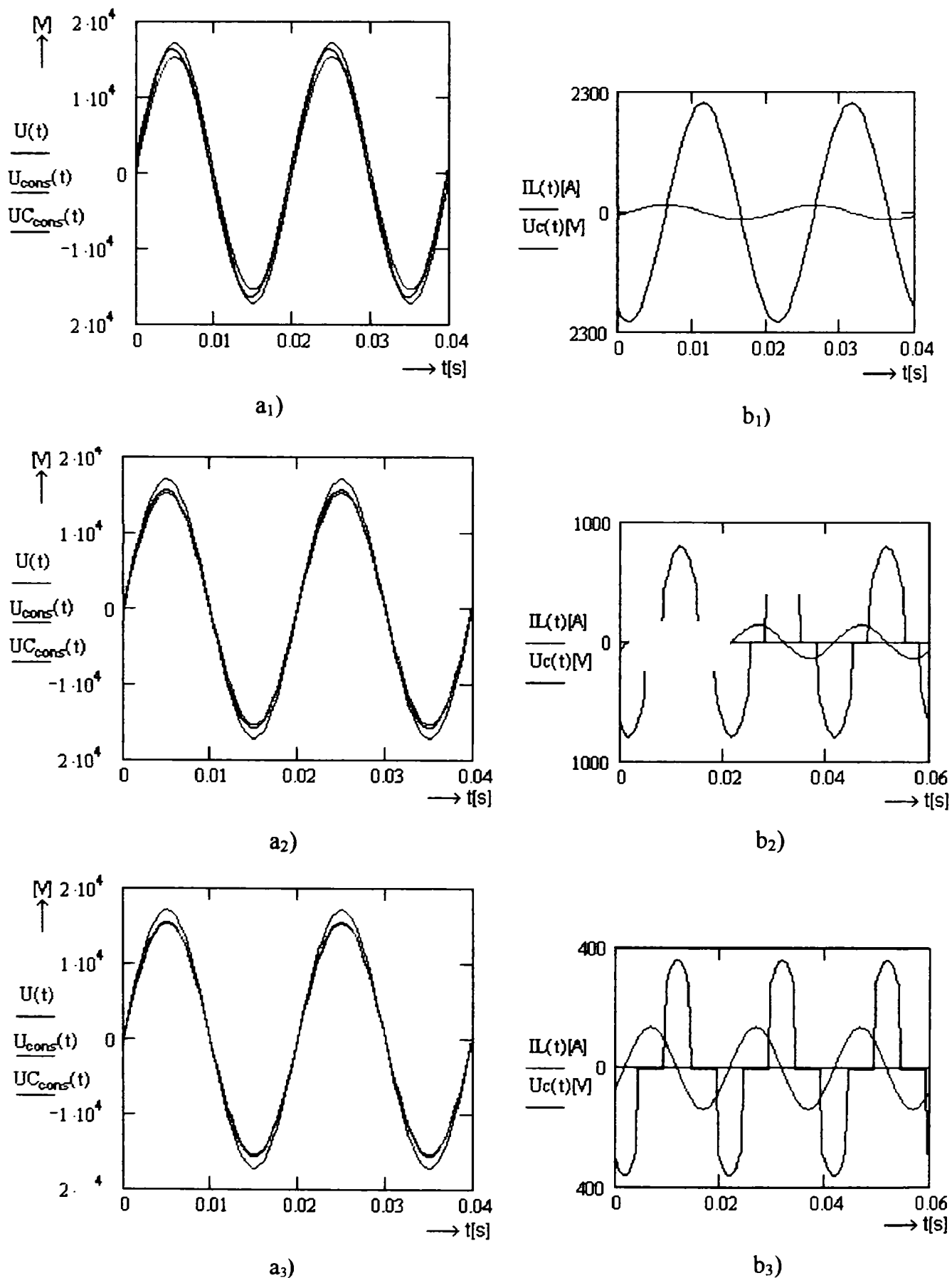


Fig.3.25. Curbele de variație a tensiunii la începutul liniei și la bornele consumatorului a_i), respectiv a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare și a curentului pe linie b_i).

Analizând cele prezentate în figura 3.25 se constată că:

- pentru unghiul de întârziere a blocării tiristoarelor $\alpha = 90^\circ$ (fig. 3.25 a₁) și b₁)) valoarea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare este maximă $2,567kV$, iar cea de la bornele consumatorului este $20,03kV$. Valoarea reactanța bateriei de condensatoare este de $14,522\Omega$;
- pentru $\alpha = 120^\circ$ (fig. 3.25 a₂) și b₂)), valoarea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare este $969,249V$, iar la bornele consumatorului este $19,35kV$. Valoarea reactanța bateriei de condensatoare este de $5,678\Omega$;
- pentru $\alpha = 135^\circ$ (fig. 3.25 a₃) și b₃)), valoarea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare este $444,743V$, iar la bornele consumatorului este $19,103kV$. Valoarea reactanța bateriei de condensatoare este de $2,368\Omega$;

Din cele prezentate mai sus rezultă că, pentru a menține tensiunea în nodul de consum la valoarea stabilită, în condițiile în care curentul pe linie variază în funcție de sarcină consumatorului este necesară reglarea continuă a reactanței bateriei. În cazul regimului minim de funcționare ($I_{L,min}$) unghiul de întârziere a blocării tiristoarelor este 180° , iar în regim maxim de funcționare ($I_{L,max}$) unghiul $\alpha = 90^\circ$.

3.6. Concluzii

În cadrul acestui capitolul s-au studiat problemele compensării capacitive serie a rețelelor de medie tensiune, și anume: amplasarea bateriei de condensatoare și determinarea valorii optime reactanței, protecția baterie și reglarea reactanței ei. De asemenea, s-a analizat influența caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare.

Pentru stabilirea locului optim de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare s-a apelat la indicatori integrali de calitate ai tensiune, și anume la abaterea medie și media pătratelor abaterilor tensiunii în noduri. O atenție deosebită a fost acordată sensibilității mediei abaterilor pătratice ale tensiunii în noduri cu locul de amplasare și valoarea reactanței bateriei de condensatoare serie.

Referitor la stabilirea locului de amplasare și a valorii reactanței baterie de condensatoare serie se pot preciza următoarele:

- locul de amplasare al bateriei de condensatoare depinde de tensiunea la începutul liniei, cu cât tensiunea este mai mare cu atât bateria de condensatoare va fi amplasată mai departe de stația de distribuție;
- reactanța bateriei de condensatoare scade odată cu creșterea tensiunii la începutul liniei;
- secțiunea conductoarelor liniei (parametrii R, X) influențează locul de amplasare și valoarea reactanței bateriei de condensatoare, pentru linii de secțiuni mici bateria va fi amplasată mai aproape de stația de distribuție, iar valoarea reactanței va fi mai mare;
- încărcarea liniilor influențează locul de amplasare și valoarea reactanței bateriei de condensatoare, cu cât liniile sunt mai încărcate cu atât bateria va fi amplasată mai aproape de începutul liniei și valoarea reactanței va fi mai mare;
- gradul de compensare al reactanței liniei scade cu odată cu scăderea factorului de putere, ceea ce înseamnă că compensarea capacitivă se va utiliza în rețele unde factorul de putere este în general scăzut;
- locul de amplasare al baterie de condensatoare depinde de lungimea liniei, cu cât linia are o lungime mai mare cu atât locul de amplasare al bateriei de condensatoare este mai aproape de stația de distribuție (începutul liniei);
- caracteristicile statice de tensiune influențează foarte puțin locul de amplasare al bateriei de condensatoare. Distanța la care este amplasată bateria de condensatoare de

începutul liniei este mai mică cu 1,128% în cazul caracteristicilor statice de tip exponențial și mai mare cu 0,3925% în cazul caracteristicilor de tip exponențial, față de situația în care puterile absorbite de consumatori sunt constante, nu depind de tensiunea de la borne;

- valoarea reactanței bateriei de condensatoare este influențată de caracteristicile statice de tensiune ale consumatorilor. Pentru caracteristica statică de tip exponențial valoarea reactanței bateriei de condensatoare este mai mare cu 7,1% față de cazul în care puterile absorbite de consumatori nu depind de tensiune. La determinarea valorii reactanței bateriei de condensatoare este necesară luarea în considerare a caracteristicilor statice de tensiune.

De remarcat că, schemele de protecție a bateriilor de condensatoare depind de puterea bateriei, valoarea de curentul de scurtcircuit pe linie și de importanța acesteia.

În ceea ce privește reglarea capacității bateriei de condensatoare aceasta se poate realiza în trepte sau continuu, folosind dispozitive electronice de putere TCS, TSSC, TCSC.

Contribuțiile aduse în acest capitol se referă la:

- întocmirea unei sinteze bibliografice privind schemele de protecție ale bateriei de condensatoare, comentarea acestora;
- determinarea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare utilizând indicatorii integrali de calitate ai tensiunii și verificarea folosind metoda sensibilității;
- studiul influenței caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- prezentarea unor aplicații prin care se evidențiază influența modului de repartiție a sarcinilor asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- prezentarea unei aplicații prin care se evidențiază influența caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- prezentarea unei aplicații prin care arată cum se realizează reglarea valorii reactanței bateriei de condensatoare folosind TSC;

Capitolul 4

COMPORTAREA REȚELELOR PREVĂZUTE CU COMPENSARE SERIE ȘI PARALEL ÎN CONDIȚIILE POLUĂRII ARMONICE

4.1. Introducere

În prezent, regimul de funcționare a rețelelor electrice este unul permanent periodic nesinusoidal. Deformarea sau distorsiunea curbei de tensiune și de curent este cauzată, în principal, de prezența consumatorilor cu caracteristica de tensiune-curent neliniară (consumatori neliniari). Acești consumatori produc curenți armonici (sau tensiuni) care se propagă prin elementele de sistem, cu riscul de a se amplifica și de a produce perturbații armonice și în alte puncte ale rețelei. Poluarea armonică care apare într-un nod al rețelei electrice, afectează un număr mare de consumatori, cu atât mai mare cu cât aceștia se racordează la o rețea cu puteri de scurtcircuit și tensiuni nominale mai mari [C1].

Un rol important în propagarea armonicilor de curent și tensiune în rețea îl au și elementele de rețea, care deși sunt concepute să funcționeze în regim permanent armonic sinusoidal, atunci când sunt străbătute de un curent nesinusoidal sau li se aplică la borne o tensiune nesinusoidală contribuie la amplificarea acestora [BB99], [B99].

Instalațiile de compensare folosite pentru îmbunătățirea performanțelor rețelelor electrice contribuie la amplificarea distorsiunii curbei de curent și tensiune [BP2001], [BB99].

În rețelele prevăzute cu compensare capacitivă, datorită prezenței condensatoarelor în serie și paralel cu elementele reactive inductive ale rețelei pot să apară fenomene de rezonanță serie sau paralel, care să conducă la amplificări importante ale curenților și tensiunilor armonice [BB99], [BB2000].

În cadrul acestui capitol sunt analizate efectele compensării capacitive serie și derivație a rețelelor de distribuție asupra propagării poluării armonice. În acest scop s-a calculat impedanța armonică în punctul de conectare a unui consumator deformant, care prezintă o importanță deosebită pentru cunoașterea efectelor amplificării și propagării armonicilor asupra calității energiei electrice furnizate consumatorilor; s-au determinat coeficienții de transfer de curent și tensiune în funcție de frecvență, care arată efectul fiecărui element de rețea sau a unei părți din sistem asupra fenomenului de propagare.

Aceste mărimi sunt determinate pe baza unui calcul de circulație de curenți și tensiuni armonice în schema de secvență directă a rețelei, prin adoptarea unor ipoteze simplificatoare privind reprezentarea consumatorului deformant ca sursă de armonici, comportarea elementelor de rețea și a consumatorilor liniari.

4.2. Probleme generale ale regimului nesinusoidal

Așa cum s-a menționat în paragraful anterior responsabili de deformarea curbei de curent și tensiune sunt, în principal, consumatorii neliniari. Aceștia absorb din rețea curenți nesinusoidali distorsionând curba de tensiune.

O sursă majoră de armonici în sistemul electroenergetic o constituie aplicațiile industriale ce utilizează electronica de putere, acestea reprezentând cele mai mari sarcini

neliniare. În această categorie intră redresoarele trifazate cu tiristoare, punțile trifazate cu diode și sarcină capacitivă și variatoarele de tensiune alternativă.

O altă sursă importantă de armonici în sistem o reprezintă aparatele electrocasnice moderne, care deși sunt de puteri mici ($0,1 \div 10$ kW), prin însumare, puterea lor este comparabilă cu cea a marilor consumatori. Din această categorie fac parte sursele de iluminat (lămpi fluorescente, lămpi cu vapori de sodiu, lămpi cu vapori de mercur), mașinile de spălat, televizoarele, cuptoarele cu microunde, instalațiile de aer condiționat, calculatoarele, fax-urile, imprimantele etc., care reprezintă principala sursă de poluare armonică a rețelelor de joasă tensiune [C17], [C20].

Domeniul de frecvență corespunzător acestor armonici este în general cuprins între 100 Hz și 2000 Hz, adică armonici de rang $ke[2;40]$, dar între acestea pot apărea și interarmonice, iar limita superioară poate atinge și 10 kHz [C1]. Oricum, spectrul de armonice depinde de natura receptoarelor racordate la rețea, de nivelul tensiunii al acestora și de particularitățile funcționale ale elementelor de rețea (gradul de încărcare al transformatoarelor, prezența bateriilor de condensatoare etc.) [C26].

Elementele liniare din sistemul electroenergetic, cum ar fi condensatoarele, bobinele de reactanță, nu reprezintă surse de armonici, dar pot contribui direct la amplificarea regimului deformant [C4]. Elemente de rețea care funcționează în regimuri perturbate cum ar fi mașinile electrice și transformatoarele supraîncărcate, liniile electrice supratensionate prin efectul corona etc., pot reprezenta surse de poluare armonică în sistem [C1].

Prezența regimului nesinusoidal conduce la apariția unor efecte nedorite în funcționarea elementelor de rețea: pierderi suplimentare de putere, reducerea randamentelor instalațiilor, fenomene de rezonanță armonică, solicitări ale izolațiilor unor echipamente, ieșirea aparatelor de măsură din clasa de precizie, acționări false ale protecțiilor, etc.

Având în vedere aceste considerații, prezența regimului nesinusoidal în sistemul electroenergetic impune efectuarea unor studii și cercetări privind identificarea surselor de poluare armonică, a efectelor acestuia asupra consumatorilor și elementelor de rețea, precum și luarea de măsuri pentru limitarea efectelor negative ale acestui regim asupra funcționării elementelor de rețea [C5], [C13], [AG00].

În scopul limitării poluării armonice a rețelelor electrice au fost elaborate reglementări și recomandări privind [C26]:

- tensiunile armonice admisibile pe barele de alimentare;
- curenții armonici admisibili;
- puteri deformante admisibile.

În studiul propagării poluării armonice a rețelelor electrice un rol important îl are stabilirea domeniului frecvențelor de rezonanță armonică, determinate în special de instalațiile de compensare capacitivă. În acest sens, în studiile de analiză armonică rețelelor interesează răspunsul elementelor de rețea pe fiecare frecvență pentru a determina impactul consumatorului deformat asupra elementelor de rețea.

4.2.1. Indicatori de apreciere a regimului nesinusoidal

Indicatori de calitate ai tensiunii și curentului în rețele poluate armonic pun în evidență impactul poluării armonice asupra funcționării sistemului energetic. În standardele naționale [N3] și europene sunt prevăzuți următorii indicatori caracteristici regimului nesinusoidal:

- nivelul armonicilor de rang k , notat cu γ_k se definește ca raportul dintre valoarea efectivă a armonicii de rang k (Y_k) și a fundamentalei (Y_1):

$$\gamma_k = \frac{Y_k}{Y_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

- factorul de formă este raportul dintre valoarea efectivă Y a mărimii și valoarea medie Y_{med} pe o perioadă a modului mărimii considerate:

$$k_f = \frac{Y}{Y_{med}} \quad (4.2)$$

- factorul de vârf

$$k_v = \frac{Y_{max}}{Y} \quad (4.3)$$

- factorul de distorsiune armonică

$$\delta_Y = \frac{Y_d}{Y_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N Y_k^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad (4.4)$$

- coeficientul de influență telefonică TIF :

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N (U_k \cdot k_k \cdot p_k)^2}}{\sqrt{\sum_{k=2}^N (U_k)^2}}, \quad (4.5)$$

în care: k_k este factor de cuplaj; p_k – factor de ponderare cu valoarea 1 la 1000Hz și <1 pentru alte frecvențe, U_k - valoarea efectivă a armoniciei de rang k .

$$IT = \sqrt{\sum_{k=2}^N (I_k \cdot k_k \cdot p_k)^2} \quad (4.6)$$

- impedanța armonică a rețelei, văzută din punctul în care se racordează consumatorul deformant.

4.2.2. Efectele regimului deformant

Prezența armonicilor de curent și tensiune în rețea electrică are o influență negativă asupra performanțelor rețelei, modului de funcționare a echipamentelor electrice de putere, măsură și protecție. Circulația curenților armonici prin elementele sistemului electroenergetic determină pierderi suplimentare, care conduc la creșterea consumurilor proprii tehnologice, reducerea randamentului mașinilor electrice, solicitări suplimentare ale bateriilor de condensatoare, creșterea potențialului punctului neutru. În cele ce urmează se vor prezenta principalele efecte negative ale poluării armonice asupra rețelelor electrice: creșterii pierderilor de putere activă, apariția supratensiunilor de rezonanță, apariția supracurenților și suprasolicitățile bateriei de condensatoare.

Circulația curenților nesinusoidali în elementele de rețele electrice determină creșterea pierderilor de putere activă în materialele conductoare p_{Cu} , în materialele magnetice p_{Fe} și în cele dielectrice p_d .

Pierderile suplimentare de putere activă în materialele conductoare p_{Cu} sunt determinate de curenții armonici care parcurg elementele longitudinale ale rețelelor și de rezistența electrică a acestora, care crește cu rangul armonic datorită efectului pelicular și a celui de proximitate. În ipoteza neglijării componentei continue aceste pierderi de putere activă se calculează cu relația [C1], [C7]:

$$P_{Cu} = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} R_k \cdot I_k^2 \quad (4.7)$$

Ținând seama de variația rezistenței cu rangul armonicii, care se consideră proporțională cu \sqrt{k} [C5], [C23], relația de calcul a pierderilor de putere activă în conductoare (4.7) devine:

$$P_{Cu} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \cdot \left[1 + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{k} \cdot \gamma_k^2 \right], \quad (4.8)$$

unde γ_k este nivelul armonicii de curent de rang k .

Din relația (4.8) se observă că pierderile de putere activă longitudinale în regim nesinusoidal pot crește sensibil față de cele din regim sinusoidal pe frecvența fundamentală.

Pierderile de putere activă în materialele magnetice depind de frecvență și sunt datorate atât magnetizării miezului (pierderi prin histerezis p_H) cât și curenților turbionari (pierderi Foucault p_F). Pentru echipamente monofazate care funcționează pe porțiunea liniară a caracteristicii de magnetizare, pierderile în materialele feromagnetice se calculează cu relația [C1], [C7]:

$$P_{Fe} = \sum_{k=1}^{\infty} (P_{H_k} + P_{F_k}) = \eta \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot B_{km}^n + \xi \cdot f^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k^2 \cdot B_{km}^2 \quad (4.9)$$

unde: n este un exponent care depinde de natura materialului și are valori între 1,5 și 2,5;

B_{km} - inducția maximă în planul armonicii k ,

η, ξ - constante care depinde de natura materialului feromagnetic.

Ținând seama de relația dintre tensiunea pe fundamentală, inducția maximă corespunzătoare acesteia și tensiunea pe armonică k respectiv inducția ce corespunde acesteia:

$$B_{km} = \frac{U_k}{U_1} \cdot \frac{B_{1m}}{k}, \quad (4.10)$$

relația (4.9) de calcul a pierderilor de putere activă în materiale magnetice devine:

$$P_{Fe} = P_{H_1} \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} k^{1-n} \cdot \gamma_{U_k}^n \right) + P_{F_1} \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \gamma_{U_k}^2 \right), \quad (4.11)$$

unde: P_{H_1}, P_{F_1} sunt pierderile de putere prin histerezis, respectiv prin curenți turbionari la frecvența fundamentalei;

$\gamma_{U_k} = U_k / U_1$ - nivelul armonicii de tensiune de rang k .

Pierderile de putere activă în materialele dielectrice p_d sunt localizate în principal în dielectricul condensatoarelor, izolația mașinilor și aparatelor electrice și izolația liniilor electrice. Aceste pierderi sunt determinate de componenta activă a curentului electric prin izolație, de polarizarea electrică (pierderi prin histerezis dielectric) și de conductivitatea materialului dielectric. Valoarea componentei active a curentului electric este influențată de temperatură și umiditatea mediului înconjurător.

Pierderile de putere activă în dielectricul unui condensator electric liniar cărui i se aplică o tensiune nesinusoidală pot fi deduse cu relația [C7]:

$$P_d = \pi \cdot f \cdot C \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot U_k^2 \cdot \tan \delta_k \quad (4.12)$$

unde: C este capacitatea electrică a condensatorului;

U_k – tensiunea pe armonica de rang k .

Pentru liniile electrice, care funcționează în condiții normale de temperatură și umiditate și în absența descărcării corona, pierderile dielectrice se pot exprima sub forma [C1], [C7]:

$$p_d = 3 \cdot \pi \cdot f \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot C_k \cdot U_k^2 \cdot \tan \delta_k, \quad (4.13)$$

unde: C_k este capacitatea liniei pe fază corespunzătoare armonicii de rang k , fiind de capacitatea de secvență directă, inversă sau homopolară, după cum $k = 3p \pm 1$ sau $k = 3p$, $p = 1, 2, 3, \dots$

Supratensiuni de rezonanță armonică

Dacă într-o rețea electrică apare o latură formată din elemente liniare R, L, C care nu variază cu frecvența (fig.4.1), iar potențialul nodului M față de pământ este nesinusoidal,

$u_M = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(k\omega t + \alpha_k)$, curentul electric pe armonica k ce străbate această latură este:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_k}{\underline{Z}_k} = \frac{U_k e^{j\alpha_k}}{R + j \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C} \right)} \quad (4.14)$$

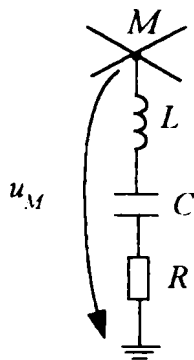


Fig.4.1. Latură pasivă de rețea cu elementele R, L, C

Dacă în relația (4.14) este îndeplinită condiția de rezonanță armonică $k\omega L = 1/k\omega C$, curentul armonic este limitat doar de rezistența R și la bornele bobinei și condensatorului din latură apar supratensiuni mari:

$$\underline{U}_{L_k} = -\underline{U}_{C_k} = \frac{k\omega L}{R} \cdot U_k \cdot e^{j(\alpha_k + \pi/2)} \quad (4.15)$$

Aceste supratensiuni pot periclita izolația bobinei și să compromită dielectricul condensatorului.

Supracurenți de rezonanță armonică pot să apară în circuitele de alimentare ale unui consumator industrial în cazul în care pe barele de alimentare ale acestuia sunt racordate atât receptoare liniari cât și neliniari, precum și baterii de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere (fig.4.2). Schema electrică echivalentă în planul armonicii de rang k a rețelei se prezintă în figura 4.3. Curentul armonic ce străbate circuitul bateriei de condensatoare expresia:

$$\underline{I}_{C_k} = \underline{I}_k \cdot \frac{1}{\frac{k^2 \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot C - 1}{k^1 \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot C} - j \frac{1}{k \cdot \omega^2 \cdot R \cdot C}}, \text{ unde } \lambda = \frac{L \cdot L_s}{L + L_s} \quad (4.16)$$

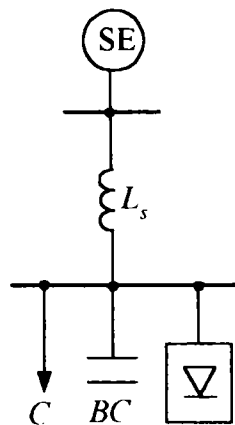


Fig.4.2. Rețeaua de alimentare a unui consumator liniar și deformant

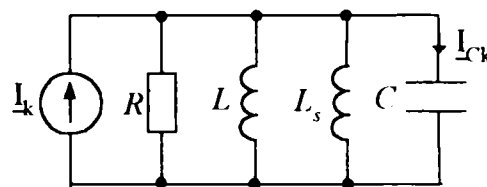


Fig.4.3 Schema echivalentă a rețelei din figura 4.2

În condițiile de rezonanță armonică, când $k^2 \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot C = 1$, curentul prin bateria de condensatoare are expresia:

$$\underline{I}_{C_k} = j \cdot \underline{I}_k \cdot R \cdot \omega \cdot C \cdot \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q} \cdot \frac{L + L_s}{L}}, \quad (4.17)$$

unde S_{sc} puterea de scurtcircuit pe barele consumatorului la frecvența fundamentală, iar Q puterea reactivă a bateriei de condensatoare la aceeași frecvență.

Din relația (4.17) se observă că $I_{C_k} > I_k$, ceea ce determină suprasolicitarea bateriei de condensatoare.

4.3. Răspunsul în frecvență al bateriei de condensatoare

Condensatorul, în studiile din domeniul energetic este considerat, în majoritatea cazurilor, ca un condensator ideal reprezentat printr-o capacitate. În realitate, condensatoarele sunt caracterizate de pierderi de putere activă în dielectric corespunzătoare polarizării și conducției electrice. Un condensator cu pierderi (real) poate fi reprezentat la o frecvență dată printr-o schemă electrică echivalentă derivație sau serie.

Dacă condensatorul real se consideră reprezentat printr-un condensator cu dielectric ideal, având capacitatea C_p conectat în paralel cu o rezistență R_p în care se dezvoltă pierderile de putere activă egale pe armonica de rang k cu cele din dielectric, schema echivalentă și diagrama fazorială sunt prezentate în figura 4.4.

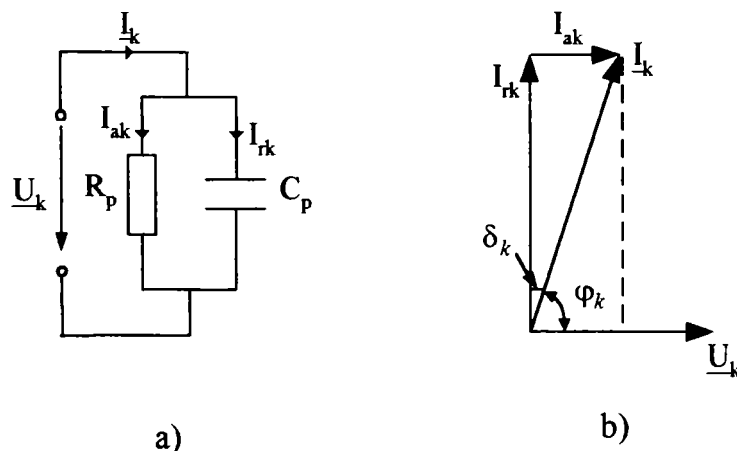


Fig. 4.4. Schema electrică echivalentă a unui condensator real a) și diagrama fazorială corespunzătoare b), pentru armonica de rang k

Curentul electric prin circuit pe armonica de rang k se calculează din relația:

$$\underline{I}_k = \underline{U}_k \left(\frac{1}{R_p} + jk\omega C_p \right) = U_k \cdot Y_k \cdot e^{j\varphi_k} = U_k \cdot Y_k \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta_k\right)}, \quad (4.18)$$

unde: $Y_k = k \cdot \omega \cdot C_p \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \delta_k}$ este modul admitanței echivalente pe armonica de rang k ,

$$\tan \delta_k = \frac{1}{k \cdot \omega \cdot R_p \cdot C_p} \text{ reprezintă tangenta unghiului de pierderi pe armonica de rang } k.$$

Tangenta unghiului de pierderi $\tan \delta$ reprezintă în mod real o măsură a pierderilor de energie în dielectric, este mărimea prin care se apreciază calitatea acestuia, prin urmare valoarea acesteia trebuie să fie cât mai mică.

Din expresia tangentei unghiului de pierderi se observă că aceasta scade cu rangul armonicii ca în figura 4.5.

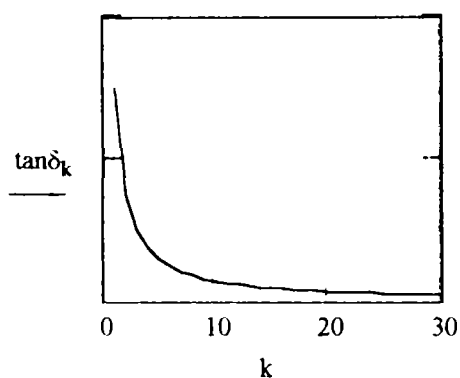


Fig. 4.5. Variația tangentei unghiului de pierderi în funcție de rangul armonicii k

Pierderea de putere activă în dielectricul condensatorului pe armonica de rang k este:

$$p_k = U_k^2 \cdot k \cdot \omega \cdot C_p \cdot \tan \delta_k \quad (4.19)$$

Analizând relația (4.19) se poate menționa că valoarea pierderii de putere activă în dielectricul condensatorului scade odată cu creșterea rangului armonicii, chiar în condițiile în care tensiunea pe armonica de rang k se menține constantă. Admitanța echivalentă a condensatorului pe armonica de rang k are un caracter "pur" capacitiv, având în vedere faptul că tangenta unghiului de pierdere are o valoare mică (de ordinul 10^{-4}) la frecvența fundamentală și aceasta scade cu creșterea frecvenței.

Schema electrică echivalentă serie a unui condensator real și diagrama fazorială corespunzătoare în planul armonicii k sunt reprezentate în figura 4.6.

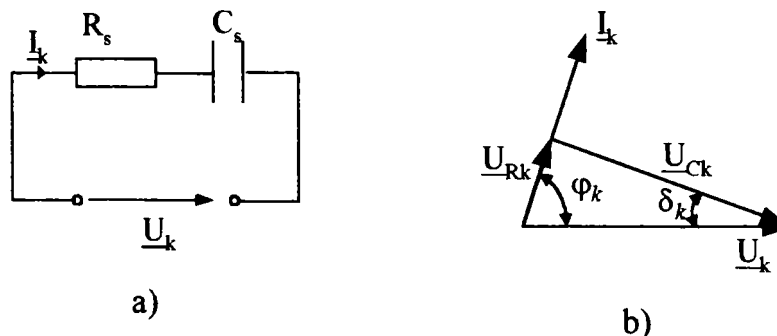


Fig.4.6. Schema electrică echivalentă serie a unui condensator real a) și diagrama fazorială corespunzătoare b) în planul armonicii de rang k

Curentul electric pe armonica de rang k este:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_k}{R_s - \frac{j}{\omega \cdot k \cdot C_s}} = \frac{U_k}{Z_k} \cdot e^{j\varphi_k}, \quad (4.20)$$

unde: $Z_k = \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_k}}{k \cdot \omega \cdot C_s}$ este modul impedanței echivalente pe armonica de rang k ;

$\tan \delta_k = k \cdot \omega \cdot R_s \cdot C_s$ reprezintă tangenta unghiului de pierderi pe armonica de rang k .

Pierderea de putere activă pe armonica k în dielectricul condensatorului este dată de expresia:

$$P_k = U_k^2 \cdot k \cdot \omega \cdot C_s \cdot \frac{\tan \delta_k}{1 + \tan^2 \delta_k} \quad (4.21)$$

Între mărimile celor două scheme echivalente pentru condensatoarele reale există o corespondență:

$$C_s = C_p (1 + \tan \delta), \quad R_s = R_p \frac{\tan^2 \delta}{1 + \tan^2 \delta} \quad (4.22)$$

În acest caz, impedanța echivalentă a condensatorului real pe armonica k , practic, este egală cu reactanța capacitivă a condensatorului, cu toate că tangenta unghiului de pierderi crește cu rangul armonicii, valoarea ei foarte mică și nu influențează valoarea impedanței.

4.4. Modelarea armonică a elementelor de rețea

În schemele de calcul a circulațiilor de curenți și a tensiunilor armonice, *sistemul electroenergetic* se reprezintă printr-o reactanță [RD96], [C2]:

$$X_k = X_1 \cdot k \quad (4.23)$$

unde: $X_1 = \frac{U_n^2}{S_{sc}}$ este reactanța de secvență directă pe fundamentală.

Transformatorul electric prezintă o comportare diferită în regim nesinusoidal în funcție de tipul acestuia mono sau trifazat, de mărimea și caracterul sarcinii conectate. Dacă se presupune că transformatorul nu funcționează saturat, la modelarea acestuia, în regim simetric nesinusoidal, trebuie să se țină seama de variația parametrilor cu frecvența. Transformatorul electric trifazat cu două înfășurări se reprezintă printr-o schemă echivalentă, de obicei în Γ , în care impedanța longitudinală și admitanța transversală depind de frecvență (fig.4.7), [C1], [C7].

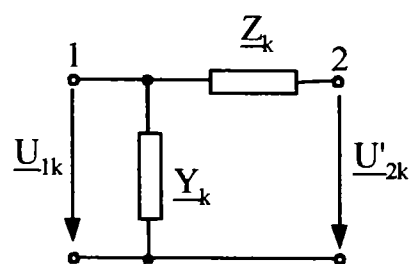


Fig.4.7. Schema echivalentă de modelarea armonică a transformatorului

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k \quad (4.24)$$

$$\underline{Y}_k = G_k - jB_k \quad (4.25)$$

unde: $R_k = R_{sc} \sqrt{k}$, R_{sc} este rezistența echivalentă a ambelor înfășurări ale transformatorului redusă la un singur nivel de tensiune, determinată din puterea activă trifazată absorbită de acesta la proba de nominală scurtcircuit;

\sqrt{k} - indică influența efectului pelicular asupra valorii rezistenței.

$X_k = kX_{sc}$, $X_{sc} = 2\pi fL_{\sigma}$ - este reactanța de dispersie echivalentă a transformatorului redusă la un singur nivel de tensiune, determinată din tensiunea procentuală de scurtcircuit de la proba nominală de scurtcircuit.

Inductanța de dispersie L_{σ} se presupune că nu variază cu frecvența. În realitate ea nu este constantă, scade pe măsură ce crește frecvența, însă această micșorare este nesemnificativă după cum este indicat în literatură [C2].

Conductanța echivalentă a transformatorului corespunde pierderilor de putere activă în miezului feromagnetic. Aceste pierderi depind de frecvență și sunt datorate atât magnetizării miezului (pierderi prin histerezis p_H) cât și curenților turbionari (pierderi Foucault p_F). Astfel, la frecvența industrială pierderile în fier sunt [C10]:

$$P_{Fe_1} = P_{H_1} + P_{F_1} = \eta f B_{1m}^n + \xi f^2 B_{1m}^2 \quad (4.26)$$

unde: $n = 1,6 \dots 3$ și depinde de inducția maximă B_m și de material;

η - constantă care depinde de materialul feromagnetic;

ξ - constantă care depinde de material și de construcția tolelor.

În regim nesinusoidal conductanța transformatorului se va determina cu relația [C1]:

$$G_k = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{Fe_k}}{U_k^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta f k B_{km}^n + \xi f^2 k^2 B_{km}^2}{U_k^2}, \quad (4.27)$$

unde: P_{Fe_k} sunt pierderile în fier corespunzătoare armonicii de rang k ;

B_{km} - inducția maximă în planul armonicii k ,

U_k - tensiunea pe armonica k .

Relația dintre tensiunea nominală, inducția maximă corespunzătoare acesteia și tensiunea pe armonica k respectiv inducția ce corespunde acesteia este:

$$B_{km} = \frac{U_k}{U_n} \cdot \frac{B_m}{k}, \quad (4.28)$$

Ținând seama de relațiile (4.26) și (4.28) expresia conductanța echivalentă a transformatorului pe armonica de rang k devine:

$$G_k = \frac{P_{F_1} + P_{H_1} \cdot k^{n-2} \cdot \left(\frac{U_k}{U_n}\right)^{n-2}}{U_n^2} = \frac{G_1}{P_{Fe_1}} \left[P_{F_1} + P_{H_1} \cdot k^{n-2} \cdot \left(\frac{U_k}{U_n}\right)^{n-2} \right], \quad (4.29)$$

unde indicele "1" este destinat mărimilor la frecvența fundamentalei.

Susceptanța corespunzătoare armonicii de rang k este:

$$B_k = \frac{1}{2\pi f \cdot k \cdot L_{\mu}} = \frac{B_1}{k}, \quad (4.30)$$

unde: L_{μ} este inductanța corespunzătoare fluxului util din transformator,

B_1 - susceptanța inductivă a miezului feromagnetic, determinată din valoarea procentuală a curentului absorbit de transformator la proba nominală de mers în gol.

În cazul în care un transformator funcționează în gol sau slab încărcat, el trebuie considerat ca o sursă de armonici pentru rețeaua electrică [C2].

În schemele echivalente de calcul a propagării poluării armonice în rețelele electrice, transformatorul este reprezentat simplificat, printr-o impedanță armonică longitudinală

formată dintr-o rezistență R_s în serie cu un ansamblu ce conține o rezistență R_p în paralel cu o reactanță X_k , (fig.4.2) [C2], [RD96].

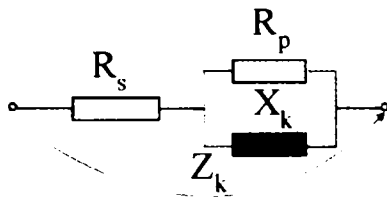


Fig. 4.8. Schema echivalentă de modelare armonică a transformatorului electric

Impedanța armonică a transformatorului este dată de expresia:

$$\underline{Z}_k = R_s + \frac{R_p(jkX_{sc})}{R_p + jkX_{sc}} = R_s + \frac{R_p \cdot k^2 \cdot X_{sc}^2}{R_p^2 + k^2 X_{sc}^2} + j \frac{R_p^2 \cdot k \cdot X_{sc}}{R_p^2 + k^2 X_{sc}^2} \quad (4.31)$$

Rezistențele R_s și R_p nu depind de frecvență și valorile lor sunt obținute cu ajutorul relațiilor:

$$R_s = \frac{X_{sc}}{\operatorname{tg}\Psi}, \quad R_p = 10 \cdot X_{sc} \cdot \operatorname{tg}\Psi \quad (4.32)$$

unde: $\operatorname{tg}\Psi = \exp\left[0,693 + 0,796 \cdot \ln S_n - 0,0421 \cdot (\ln S_n)^2\right]$

S_n este puterea aparentă nominală a transformatorului.

La modelarea armonică a transformatorului nu s-a ținut seama de capacitățile înfășurărilor față de pământ și cele dintre înfășurări, deoarece au un efect redus asupra fenomenului de propagare armonică în domeniul de interes al armonicilor [C2]. Frecvența de rezonanță armonică a transformatorului considerat cu capacitate de intrare este mai mare de 2kHz (domeniul de interes) [C7].

Linia electrică aeriană în regim nesinusoidal se reprezintă printr-o schemă echivalentă „ π ” cu parametrii dependenți de frecvență (fig. 4.9).

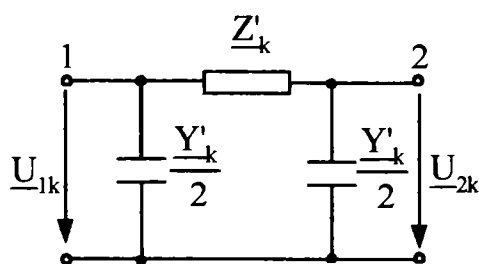


Fig.4.9. Modelarea armonică a liniei electrice aeriene

$$\underline{Z}'_k = \underline{Z}_k \cdot k_z,$$

$$\underline{Y}'_k = \underline{Y}_k \cdot k_y \quad (4.33)$$

unde: \underline{Z}_k , \underline{Y}_k corespund parametrilor liniei la armonică de rang k

k_z , k_y - coeficienții lui Kennelly pentru impedanța și admitanța la armonică k .

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k, \quad \underline{Y}_k = G_k + jB_k \quad (4.34)$$

$$k_z = \frac{\sinh \sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k}}{\sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k}}, \quad k_y = \frac{\tanh \sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k} / 2}{\sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k} / 2} \quad (4.35)$$

Rezistența armonică R_k a liniei electrice corespunde pierderilor de putere activă pe linie și se determină din rezistența în curent continuu R_{cc} . Pierderile de putere activă în conductoarele liniilor electrice corespund efectului pelicular, efectului de proximitate, de răsucire și fenomenelor magnetice ce apar în inima conductoarelor funie de aluminiu-oțel. Aceste pierderi de putere cresc odată cu creșterea frecvenței și implicit va crește și rezistența

liniei electrice. Pentru armonici de rang $k < 30$, efectul de proximitate la conductoarele multifilare [C15], [C9] precum și fenomenele magnetice armonice pot fi neglijate [C7]. Efectul pelicular se accentuează odată cu creșterea frecvenței și va determina creșterea valorii rezistenței cu rangul armonicii.

În literatură sunt prezentate diferite relații de calcul a rezistenței armonice ținând seama de influența efectului pelicular. Astfel, pentru conductoare din materiale nemagnetice, monometalice, funie, rezistenței electrice lineice pe armonică de rang k se determină cu relația [C9]:

$$R_k = R_{cc} \cdot K_p, \quad (4.36)$$

unde: K_p este coeficientul de amplificare care depinde de rangul armonicii și se determină din tabele în funcție de valoarea lui α_k [C9]:

$$\alpha_k = 0,05013 \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r \cdot k}{R_{cc}}} \quad (4.37)$$

unde: μ_r este permeabilitatea relativă a materialului conductorului care se presupune constantă pentru frecvențe mai mici de 2 kHz [C9],

f - frecvența industrială.

Pentru valori a lui α_k mai mari de 6, coeficientul de amplificare K_p se calculează cu relația:

$$K_p = \frac{\alpha_k}{2\sqrt{2}} + \frac{1}{4} \quad (4.38)$$

În cazul conductoarelor funie Al-Ol, rezistența electrică armonică pe unitatea de lungime se calculează cu relația [C1]:

$$R_k = R_{cc} \cdot \left[1 + 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{\delta f k}{d \cdot R_{cc}} \right)^2 \right], \quad (4.39)$$

în care: δ reprezintă grosimea straturilor din Al, iar d diametrul exterior al conductorului.

În [RD96] se prezintă o metodologie asemănătoare de calcul a rezistenței armonice a conductoarelor liniilor electrice aeriene. Coeficientul α_k se calculează cu expresia:

$$\alpha_k = 0,3545 \sqrt{\frac{k}{R_{cc}}} \quad (4.40)$$

și pentru $\alpha_k \leq 2,4$ rezistența armonică este:

$$R_k = R_{cc} \cdot (0,035 \cdot \alpha_k^2 + 0,938) \quad (4.41)$$

iar pentru $\alpha_k \geq 2,4$

$$R_k = R_{cc} \cdot (0,35 \cdot \alpha_k + 0,3) \quad (4.42)$$

Inductivitatea conductorului scade cu accentuarea efectului pelicular și de proximitate, deci cu creșterea frecvenței. Această scădere este mai puțin pronunțată decât creșterea rezistenței conductorului determinată de aceste efecte [C9].

Reactanța armonică de secvență directă se calculează cu relația [C7]:

$$X_k = \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot k}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{D_m}{r_m} + \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot h_m \cdot \alpha_k \right], \quad (4.43)$$

unde: r_m - raza medie geometrică echivalentă a conductorului,

D_m - distanța medie geometrică,

h_m - înălțimea medie geometrică a conductoarelor,

$1/\alpha_k = 1/\sqrt{\omega \cdot k \cdot \sigma \cdot \mu}$ - adâncimea de pătrunderea curentului de frecvență $k \cdot f$ în pământ;

σ, μ - conductivitatea electrică și permeabilitatea magnetică a pământului.

Pentru simplificarea calculului reactanța armonică a liniei se poate considera egală cu reactanța de secvență directă X_1 înmulțită cu rangul armonicii k [RD96], [BB96]:

$$X_k = 2\pi f \cdot k \cdot L = X_1 \cdot k \quad (4.44)$$

Conductanța liniei corespunzătoare pierderilor de putere activă transversale, în condițiile în care se presupune că acestea sunt determinate numai de curenții de conducție prin dielectric este [C1]:

$$G_k = 2\pi f \cdot k \cdot \tan \delta \cdot C_k, \quad (4.45)$$

unde: $\tan \delta$ este tangenta unghiului de pierderi în dielectric

C_k - capacitățile electrice corespunzătoare armonicilor de rang k .

Susceptanța armonică a liniei electrice este [C7]:

$$B_k = 2\pi f \cdot k \cdot C_1, \quad (4.46)$$

unde: C_1 este capacitatea de secvență directă a liniei pe fundamentală.

Liniile electrice în cablu în regim nesinusoidal se modelează printr-o schemă echivalentă în "π" (fig.4.3), asemănător cu liniile electrice aeriene. Comparativ cu liniile electrice aeriene, dificultatea la modelarea LES este de a determina exact parametrii corespunzători schemei echivalente.

Rezistența armonică a cablului ținând seama de influența efectului pelicular și de proximitate, fără a lua în considerare pierderile în ecranul cablului și mantaua acesteia, se determină cu relația [C1]:

$$R_k = [1 + A \cdot (y_{s_k} + y_{a_k})] \cdot R_{cc} \quad (4.47)$$

unde: R_{cc} este rezistența electrică a cablului în curent continuu;

A - coeficient de amplificare a rezistenței datorită efectului pelicular și de proximitate cauzat de prezența tuburilor protectoare din oțel.

y_{s_k} - coeficient de creștere a rezistenței electrice datorită efectului pelicular la trecerea curentului armonic de rang k și se calculează cu relația [C1]:

$$y_{s_k} = y_{s_1} + 0,0527 \cdot k_{s_1}^2 (k-1) - 0,054 \cdot k_{s_1} (\sqrt{k} - 1) \quad (4.48)$$

în care: y_{s_1} este coeficientul de creștere a rezistenței electrice datorită efectului pelicular la trecerea curentului de armonică fundamentală și valoarea lui se dă în tabele, în funcție coeficientul k_{s_1} [C4]:

$$k_{s_1} = 0,159 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{f \cdot K_s}{R_{cc}}} \quad (4.49)$$

în care: K_s este un coeficient ce depinde de forma secțiunii conductoarelor cablului.

y_{a_k} - coeficient de creștere a rezistenței datorita efectului de proximitate, ce poate fi determinat cu relația [C1]:

$$y_{a_k} = F_k \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^2 \cdot \left[\frac{1,18}{F_k + 0,27} + 0,321 \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^2 \right] \quad (4.50)$$

unde: d este diametrul exterior al conductorului cablului;

s - distantele între axele conductoarelor cablului;

F_k - coeficient de creștere a rezistenței electrice datorită efectului pelicular la trecerea curentului armonic de rang k și se calculează cu relația [C1]:

$$F_k = F_1 + 0,0527 \cdot F_1^2 (k-1) - 0,054 \cdot F_1 \cdot (\sqrt{k} - 1) \quad (4.51)$$

F_1 - corespunde fundamentalei și se valoarea lui se dă în tabele, în funcție de coeficientul k_{a1} [C5]:

$$k_{a1} = 0,159 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{f \cdot K_a}{R_{cc}}} \quad (4.52)$$

în care: K_a este un coeficient ce depinde de forma secțiunii conductoarelor cablului.

În [RD96] se prezintă o metoda simplificată de calcul a rezistenței armonice cablului considerând aceleași relații de calcul ca și pentru liniile electrice la care se adaugă un termen ce ține seama de prezența ecranului metalic:

$$\Delta R_k = p \cdot R_s \quad (4.53)$$

unde: R_s este rezistența ecranului;

p - coeficient ce se calculează cu relația:

$$p = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{k \cdot X_{s1}} \right)} \quad (4.54)$$

X_{s1} - reactanța mutuală dintre conductor și circuitul ecranului pe fundamentală, calculată cu relația:

$$X_{s1} = 2\pi f \cdot l \cdot 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d_m}{r_s} \quad (4.55)$$

unde: d_m este distanța medie geometrică între conductoare;

r_s - raza ecranului;

Pentru cabluri monofazate dispuse în treflă sau de tipul H, $d_m/r_s = 2$, iar relația (4.54) devine:

$$p = \frac{1}{1 + 526 \cdot R_s / k^2} \quad (4.56)$$

Reactanța cablului se calculează cu relația [RD96]:

$$X_k = X_1 \cdot k - p \cdot k \cdot X_{s1}, \quad (4.57)$$

unde: X_1 este reactanța de secvență directă pe fundamentală, iar X_{s1} și p sunt mărimile determinate cu relațiile de mai sus.

Bateria de condensatoare serie este reprezentată printr-un condensator ideal [RD96], care în schema echivalentă armonică a rețelei se introduce prin impedanța:

$$\underline{Z}_k = -j \frac{1}{2\pi k f C} \quad (4.58)$$

Bateria de condensatoare derivație este reprezentată printr-un condensator ideal [RD96], care în schema echivalentă armonică a rețelei se introduce admitanța:

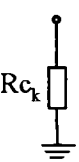
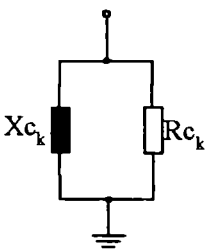
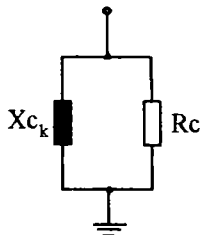
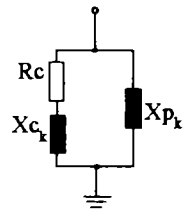
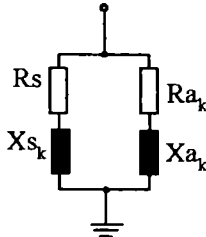
$$\underline{Y}_k = j2\pi k f C \quad (4.59)$$

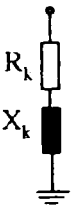
O influență semnificativă asupra impedanței armonice și implicit asupra curentilor și tensiunilor armonice din nodurile rețelei o au consumatorii. Ei nu constituie numai elemente

de amortizare, ci afectează condițiile de rezonanță armonică, în special la frecvențe ridicate [RD96], [C3].

Având în vedere multitudinea receptoarelor ce formează un consumator, ce au un comportament diferit în regim nesinusoidal, este dificilă stabilirea unui model armonic bazat pe analiza teoretică. În literatură se conturează două direcții în stabilirea modelului armonic al consumatorului liniar: una analitică care sintetizează două modele principale, unul corespunzător sarcinilor statice și altul celor rotative și alta experimentală, prin care se identifică experimental parametrii diferitelor scheme adoptate pentru consumatori. În tabelul 4.1 sunt indicate câteva din modele armonice pentru sarcinile liniare, prezentate în literatură [C2], [RD96], [C7].

Tabelul 4.1. Modele armonice pentru sarcini liniare

Nr. crt.	Schema echivalentă	Relații de calcul a parametrilor modelului armonic
1		Modelul de sarcină pur rezistiv, cu rezistența dependentă de frecvență. $Rc_k = k_R \frac{U_1^2}{P_1}, \quad k_R = 1,125 + 0,879k$ unde: U_1 și P_1 - corespund fundamentalei.
2		Modelul de sarcină sugerat de Pesonen $Rc_k = \frac{U_1^2}{p \cdot P_1}, \quad Xc_k = \frac{U_1^2}{p \cdot Q_1}, \quad p = 0,1 \cdot k + 0,9$ unde: U_1 , P_1 și Q_1 - corespund fundamentalei.
3		Modelul de sarcină R/L. $Rc = \frac{U_1^2}{P_1}, \quad Xc_k = k \frac{U_1^2}{Q_1}$
4		Modelul CIGRE. $Rc = \frac{U_1^2}{P_1}, \quad Xc_k = 0,073 \cdot k \cdot Rc, \quad Xp_k = \frac{k \cdot Rc}{6,7 \cdot \left(\frac{Q_1}{P_1} - 0,74 \right)}$
5		$Rs = \frac{U_1^2}{P_1(1-\alpha)}, \quad Ra_k = R_m \left[1 + \gamma \cdot (50 \cdot k)^{0,5} \right],$ $Xs_k = k \frac{Q_1}{P_1} Rs, \quad Xa_k = \frac{U_1^2}{P_1 \cdot \alpha} X_r \cdot k \cdot \left[2 \cdot (50 \cdot k)^\beta \right],$ <p>α - ponderea motoarelor asincrone; $R_m = (0,15 \div 0,2) X_r$ - rezistența echivalentă serie a motoarelor pe fundamentală; $X_r = 0,15 \div 0,2$ - reactanța medie echivalentă a rotorului pe fundamentală; $\beta = -0,2 \div -0,1$; $\gamma = 0,15 \div 0,25$</p>

6		<p>Modelul MOTOR</p> $X_k = kX_1, \quad R_k = \sqrt{k}R_1, \quad X_1 = \frac{U_1^2}{S_p}$ <p>S_p - puterea aparentă la pornire cu rotorul blocat; $R_1 = X_1/3$ - corespunde la $\cos \varphi_p = 0,32$.</p>
---	---	--

Impactul modelării sarcinii asupra curenților și tensiunilor armonice este deosebit de relevant la frecvențele de rezonanță paralel în nodul sistemului considerat. Diferențele în calculul impedanțelor armonice la frecvența de rezonanță poate varia semnificativ în funcție de modelul armonic al sarcinii [BB99].

4.5. Calculul circulației curenților armonici și a căderilor de tensiune

În rețelele electrice circulația de curenți armonici și căderile de tensiune provocate de aceștia pot conduce la efecte nedorite: amplificări ale armonicilor de curent (ce produc supraîncărcarea electrică a căilor de curent), amplificări ale armonicilor de tensiune (fenomene de rezonanță), pierderi suplimentare pe elementele rețelei electrice, reducerea randamentului mașinilor electrice, solicitări suplimentare a condensatoarelor electrice, supratensiuni, influență electromagnetică asupra rețelelor de telecomunicații. Amplificarea armonicilor de curent se datorează suprapunerii frecvenței proprii a circuitelor formate din bobine și condensatoare cu frecvența corespunzătoare uneia din armonicile care apar în rețeaua electrică.

Pentru calculul circulației de curenți armonici și determinarea tensiunilor armonice în noduri rețelei se impun adoptarea unor ipoteze simplificatoare, referitoare la consumatorii deformanți [C1], [C3], [C4], [C7], [C18]:

- consumatorul deformant se consideră fie ca o sursă ideală de curent, valoarea curentului pe armonica de rangul k este constantă, fie ca o sursă ideală de tensiune $U_k = ct$.
- consumatorul deformant se consideră că funcționează pe o caracteristică de impedanță constantă pe fundamentală $Z_1 = ct$.
- consumatorul deformant se ia în considerare prin caracteristica sa neliniară care stabilește relația dintre valoarea instantanee a tensiunii la borne $u(t)$ și valoarea corespunzătoare a curentului $i(t)$.

În ceea ce privește elementele de rețea, se pot face următoarele ipoteze:

- parametrii elementelor de rețea nu depind de frecvență, adică rezistența și inductivitatea conductoarelor liniilor și transformatoarelor este independentă de frecvență și deci nu se consideră prezența efectului pelicular și a celui de proximitate. Calculul este acoperitor, întrucât de regulă conduce la amplitudini ale curenților armonici mai mari decât cele obținute în realitate.
- parametrii elementelor de rețea depind de frecvență după o lege de variație simplă, aceeași pentru toate liniile, cablurile sau transformatoarele. Pentru rezistențe se admite o dependență $R_k = \sqrt{k} \cdot R_1$, iar pentru reactanțele inductive $X_k = k \cdot X_1$. Legea de dependență cu frecvența este valabilă însă numai pe intervale de frecvență.

Fiecare dintre ipotezele prezentate este folosită în cazuri specifice întâlnite în sistemele electroenergetice. Astfel, dacă se dorește analiza propagării regimului nesinusoidal în rețea, se pot efectua unele simplificări privind reprezentarea elementelor de rețea sau a consumatorilor deformanți, dacă se dorește însă stabilirea frecvențelor la care apar rezonanțe armonice într-o porțiune de rețea, calculul trebuie să fie mai precis și pentru această trebuie considerate

modele mai exacte atât pentru sursele de armonice cât și pentru elementele de transfer și consumatorii liniari [C1].

Cunoscându-se schemele electrice echivalente armonice ale rețelei 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 :

- se admite liniarizarea pe porțiuni sau în jurul unui punct de funcționare a caracteristicii de sarcina 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 $k\omega$ (pe baza unei transformate de tip Fourier) ;
- se efectuează calculele pentru un număr limitat de armonici și se asigură ordonarea ecuațiilor cu ajutorul relațiilor matriciale.

În calculul circulației de curenți armonici și a tensiunilor armonice în nodurile rețelei electrice de distribuție prevăzute cu compensare capacitivă serie, ipoteza reprezentării consumatorului deformant ca sursă de tensiune, constantă pe armonică de rang k , este acoperitoare în studiul fenomenelor de rezonanță armonică și subarmonică ce pot să apară în rețea [C1]. Sursele de tensiune armonică într-o rețea de medie tensiune pot fi reprezentate de consumatorii neliniari care generează curenți nesinusoidali ce se propagă pe circuitele rețelei de alimentare și vor determina deformarea corespunzătoare a tensiunii, datorită căderilor de tensiune pe impedanțele armonice echivalente ale rețelei. De asemenea, surse de tensiune armonică pot fi transformatoarele și bobinele de reactanță cu miezul saturat [C1], [C18], [C30].

Prezența consumatorului deformant afectează defavorabil atât funcționarea consumatorilor liniari cât mai ales cea a bateriilor de condensatoare derivație, care sunt sensibil solicitate [C1], [C6], [C16]. În rețelele cu compensare serie prezintă interes amplificarea tensiunii la bornele acesteia datorată propagării armonicilor de curent și tensiune care pot determina apariția unor supratensiuni periculoase pentru izolației acesteia. De asemenea prezintă interes și modul în care distorsiunea curbei curentului și/sau a tensiunii determinată de consumatorul neliniar se propagă în sistem.

În acest scop se consideră schema electrică echivalentă a unei rețele prevăzute cu compensare capacitivă serie din figura 4.10, în care consumatorul deformant este prezentat ca sursă de tensiune constantă pe armonică k . Linia electrică se consideră cu parametrii uniform distribuiți și sistemul este reprezentat, pentru armonici de rang $k \geq 2$, printr-o reactanță armonică X_{Sk} .

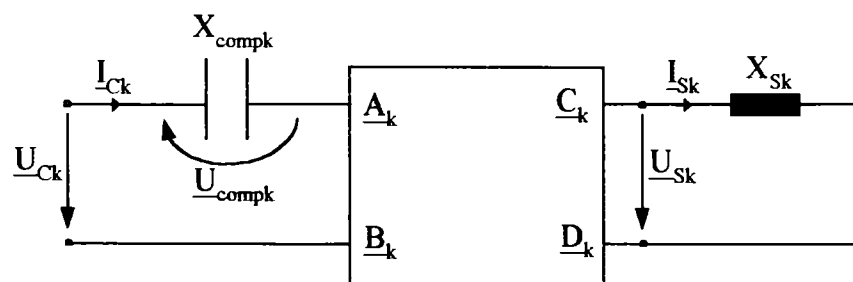


Fig.4.10. Schema electrică echivalentă pentru studiul propagării poluării armonice într-o rețea prevăzută cu compensare capacitivă serie

Pentru schema echivalentă din figură se poate scrie relația:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{Ck} \\ \underline{I}_{Ck} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_{compk} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_k & \underline{B}_k \\ \underline{C}_k & \underline{D}_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & jX_{Sk} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I}_{Sk} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

unde: \underline{I}_{Sk} este curentul electric de armonică k la bornele sistemului;

X_{compk} reactanța bateriei de condensatoare pe armonică k ,

A_k, B_k, C_k, D_k sunt coeficienții liniei lungi, corespunzători armonicii k :

$$\underline{A}_k = \cosh \sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k}, \underline{B}_k = \underline{Z}_{C_k} \sinh \sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k}, \underline{C}_k = \underline{Y}_{C_k} \sinh \sqrt{\underline{Z}_k \underline{Y}_k}, \underline{A}_k = \underline{D}_k \quad (4.61)$$

Impedanța armonică văzută de la bornele consumatorului neliniar este:

$$\underline{Z}_k = \frac{\underline{U}_{C_k}}{\underline{I}_{C_k}} = \frac{X_{comp_k} \cdot (X_{S_k} \cdot \underline{C}_k - j \cdot \underline{D}_k) + (\underline{B}_k + jX_{S_k} \cdot \underline{A}_k)}{\underline{D}_k + jX_{S_k} \cdot \underline{C}_k} \quad (4.62)$$

Din relația (4.62) se observă că la rezonanță armonică, când este îndeplinită condiția $\underline{D}_k + jX_{S_k} \cdot \underline{C}_k = 0$, tensiunea la bornele consumatorului neliniar are valoare foarte mare (teoretic infinit). În realitate, această valoare este mult mai mică datorată atenuărilor din rețea și interdependențelor dintre armonici [C1].

Coeficientul de transfer al curentului armonic la bornele sistemului este:

$$\underline{\alpha}_{Isk} = \frac{\underline{I}_{S_k}}{\underline{I}_{C_k}} = \frac{1}{\underline{D}_k + jX_{S_k} \cdot \underline{C}_k}, \quad (4.63)$$

În condițiile de rezonanță armonică, curentul propagat la bornele sistemului poate atinge valori mari.

Coeficientul de amplificarea a tensiunii la bornele sistemului:

$$\underline{\beta}_{Usk} = \frac{\underline{U}_{S_k}}{\underline{U}_{C_k}} = \frac{jX_{S_k}}{X_{comp_k} \cdot (X_{S_k} \cdot \underline{C}_k - j \cdot \underline{D}_k) + (\underline{B}_k + jX_{S_k} \cdot \underline{A}_k)} = \frac{jX_{S_k}}{\underline{Z}_k} \cdot \underline{\alpha}_{Isk} \quad (4.64)$$

Analizând expresia (4.64) se constată că tensiunea armonică la bornele sistemului poate să aibă valori mari în condițiile în care reactanța sistemului are valoare mare și impedanța armonică a rețelei, văzută ce la bornele consumatorului neliniar, are o valoare mică (sunt îndeplinite condițiile de rezonanță serie).

Coeficientul de amplificarea a tensiunii la bornele sistemului:

$$\underline{\beta}_{Ucompk} = \frac{\underline{U}_{comp_k}}{\underline{U}_{C_k}} = \frac{-jX_{comp_k}}{\underline{Z}_k} \quad (4.65)$$

Din relația (4.65) se observă că amplificări importate ale tensiunii la bornele bateriei de condensatoare serie pot să apară în condițiile în care reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare are o valoare mare pe armonica de rang k , iar impedanța armonică a rețelei are valoarea mică. Acest lucru se poate întâmpla în regimul subsincron, când reactanța capacitivă a bateriei crește cu rangul armonicii. Deci, în rețelele prevăzute cu compensare capacitivă serie este necesar să se analizeze și fenomenul de propagare a subarmonicilor.

Pentru calculul circulației de curenți armonici și a tensiunilor armonice în nodurile unei rețele electrice neliniare se apelează la metodele de analiză a rețelelor liniare. Metoda tensiunilor în noduri, pentru armonica k ne permite determinarea tensiunilor armonice în nodurile rețelei în condițiile în care se cunosc curenți armonici injectați în rețea:

$$[\underline{J}_k] = [\underline{Y}_k] \cdot [\underline{U}_k] \quad (4.66)$$

unde: $[\underline{J}_k]$ este matricea vector de ordinul n a curenților armonici injectați în rețea (n numărul de noduri);

$[\underline{Y}_k]$ - matricea pătratică de ordinul n a admitanțelor nodale ale rețelei electrice;

$[\underline{U}_k]$ - matricea vector de ordinul n a tensiunilor în nodurile rețelei (n numărul de noduri);

Din relația (4.66) se obține vectorul tensiunilor în noduri pe armonica de rang k :

$$[\underline{U}_k] = [\underline{Y}_k]^{-1} \cdot [\underline{J}_k] \quad (4.67)$$

Elementele diagonale ale matricei inverse a admitanțelor $[\underline{Y}_k]^{-1}$ reprezintă impedanțele armonice văzute din acele noduri. Cunoscând tensiunile în noduri și impedanțele laturilor se pot determina curenții armonici prin laturi:

$$\underline{I}_{-k}^{ij} = \frac{\underline{U}_k^i - \underline{U}_k^j}{\underline{Z}_k^{ij}} \quad (4.68)$$

4.6. Aplicații

4.6.1. Studiul propagării armonicilor superioare în rețele cu compensare serie

Pentru a analiza efectul compensării serie asupra fenomenului de propagare a poluării armonice se consideră rețeaua de distribuție din figura 4.11, ce funcționează în regim simetric și echilibrat, unde la barele de MT ale stației sunt racordate: o linie electrică aeriană prevăzută cu compensare capacitivă serie ce alimentează un consumator deformant, o baterie de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere, două linii în cablu și trei linii aeriene ce alimentează consumatori liniari. Rețeaua funcționând în regim simetric și echilibrat, elementele acesteia se vor reprezenta în schema echivalentă armonică prin impedanțele și/sau admitanțele armonice de secvență directă. Pentru simplificare nu s-a notat indicele ce desemnează rangul armonicii, iar acesta s-a considerat că este diferit de multiplu de 3, adică $k \neq 3p$, ($p=1, 2, \dots$). Consumatorul deformant este considerat ca sursă de tensiune constantă pe armonica k .

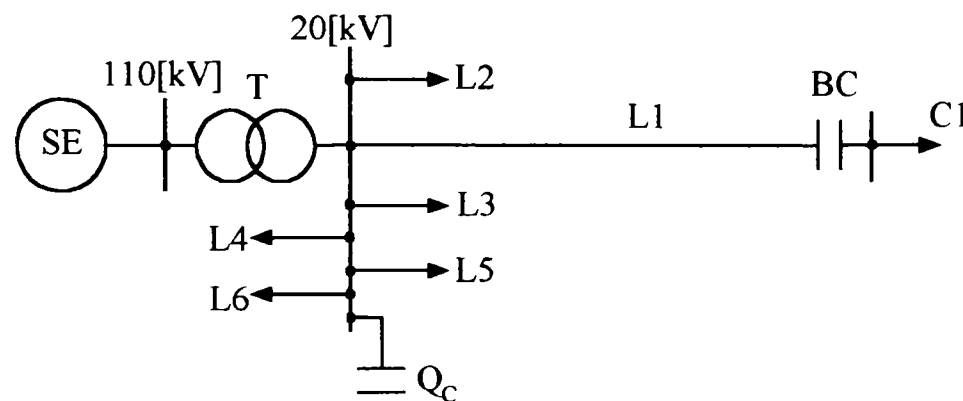


Fig.4.11. Schema monofilară a unei rețele electrice de distribuție

Sunt analizate următoarele situații: a) consumatorul deformant este conectat la linia prevăzută cu compensare serie; b) consumatorul deformant conectat la barele de medie tensiune ale stației.

a) Consumatorul deformant este conectat la linia prevăzută cu compensare serie

Schema electrică echivalentă a rețelei electrice din figura 4.11, în cazul în care consumatorul deformant este alimentat prin linia electrică L1 prevăzută cu compensare capacitivă serie este prezentată în figura 4.12. Prin admitanța \underline{Y}_{cecv} s-au echivalat toate plecările de bara de MT tensiune a stației, mai puțin linia care alimentează consumatorul deformant.

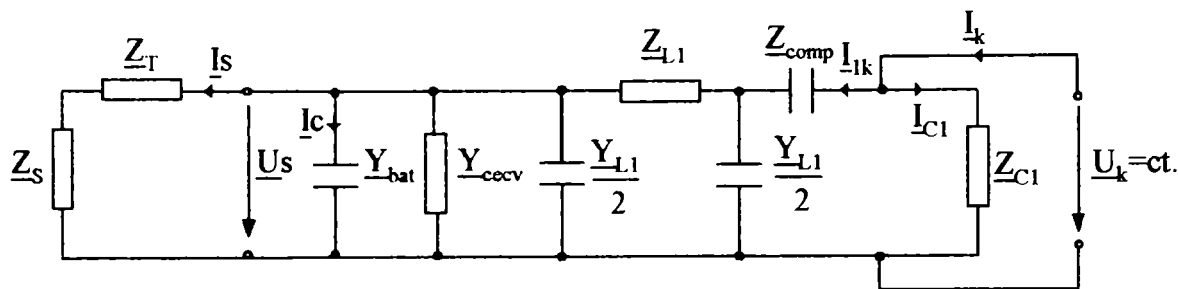


Fig. 4.12 Schema electrică echivalentă de calcul a rețelei din figura 4.11, când sursa de poluare armonică este racordată la linia aeriană compensată serie

Impedanța armonică a rețelei, văzută de la bornele consumatorului deformant este dată de expresia:

$$\underline{Z}_k = \frac{\{(\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{L1} + 2)(\underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{echiv} + 1) + \underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{L1} \} \underline{Z}_{comp} + 2 \underline{Z}_{ST} (\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{echiv} + 1) + 2 \underline{Z}_{L1}}{[(\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{L1} + 2)(\underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{echiv} + 1) + \underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{L1}] (\underline{Z}_{comp} + \underline{Z}_{C1}) + 2 \underline{Z}_{ST} (\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{echiv} + 1) + 2 \underline{Z}_{L1}} \cdot \underline{Z}_{C1}$$

unde: $\underline{Y}_{echiv} = \underline{Y}_{bat} + \underline{Y}_{cecv} + \underline{Y}_{L1}/2$

$$\underline{Z}_{ST} = \underline{Z}_S + \underline{Z}_T$$

Coeficienții de transfer a curentului armonic la barele de MT ale stației α_{I_s} , la bornele bateriei de condensatoare derivație pentru compensarea puterii reactive α_{I_c} , coeficientul de amplificare a tensiunii armonice la bornele bateriei de condensatoare serie $\beta_{U_{comp}}$ și coeficienții de propagare a tensiunii armonice la barele de medie tensiune ale stației β_{U_s} se calculează cu relațiile:

$$\beta_{U_s} = \frac{U_s}{U_k} = \frac{2 \cdot \underline{Z}_{ST}}{[(\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{L1} + 2)(\underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{echiv} + 1) + \underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{L1}] \underline{Z}_{comp} + 2 \underline{Z}_{ST} (\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{echiv} + 1) + 2 \underline{Z}_{L1}}$$

$$\alpha_{I_s} = \frac{I_s}{I_k} = \beta_{U_s} \cdot \frac{\underline{Z}_k}{\underline{Z}_{ST}} \quad (6.71)$$

$$\beta_{U_{comp}} = \frac{\underline{Z}_{comp}}{\underline{Z}_{comp} + 2 \cdot \frac{\underline{Z}_{ST} (\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{echiv} + 1) + \underline{Z}_{L1}}{(\underline{Z}_{L1} \underline{Y}_{L1} + 2)(\underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{echiv} + 1) + \underline{Z}_{ST} \underline{Y}_{L1}}} \quad (6.72)$$

$$\alpha_{I_c} = \frac{I_c}{I_k} = \underline{Y}_{bat} \cdot \beta_{U_s} \cdot \underline{Z}_k \quad (6.73)$$

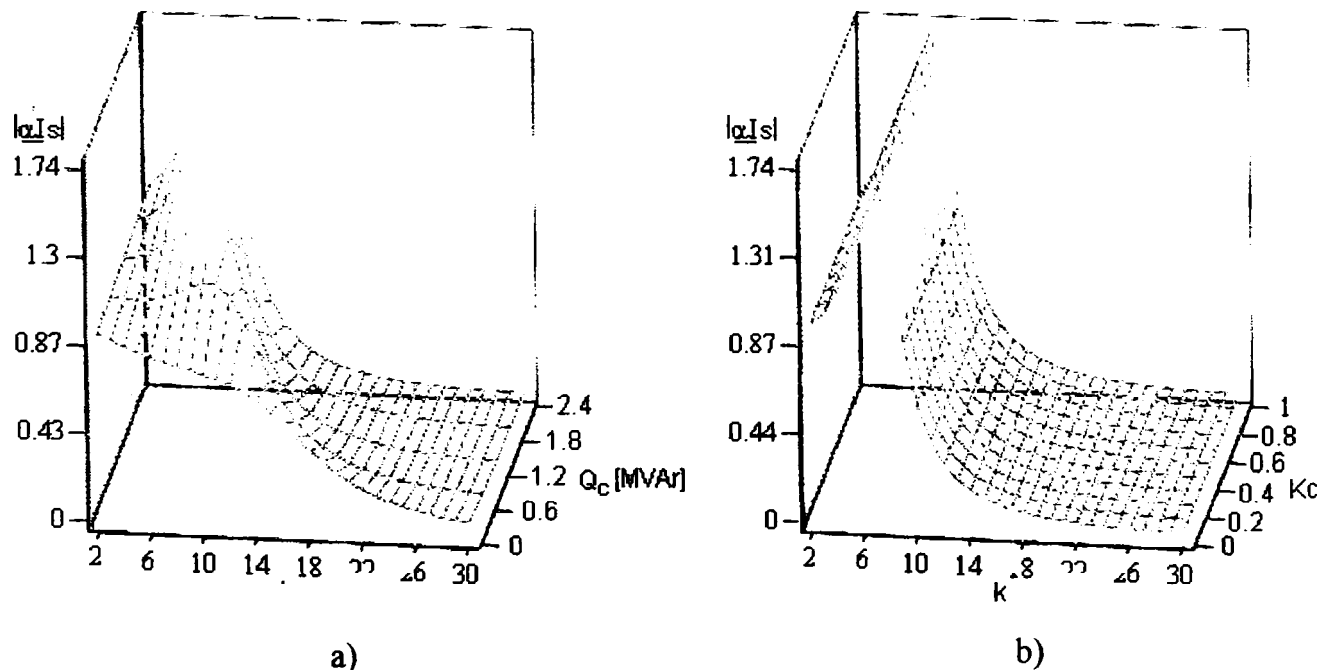
Analizând expresia impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului deformant și având în vedere faptul că reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare serie scade cu creșterea rangului armonicilor, rezultă că impedanța armonică a rețelei este influențată de prezența bateriei de condensatoare serie doar pentru armonici de rang scăzut. La fel se întâmplă cu coeficienții de transfer de curent și de tensiune.

În condițiile în care se are în vedere o situație concretă, caracteristicile tehnice și informații despre modele armonice adoptate pentru elementele de rețea sunt date în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2.

Element	Caracteristici tehnice	Modelare armonică	Observații
Sistemul	$S_{sc} = 800MVA, U_n = 110kV$	- prin reactanța armonică calculată cu relația (4.7)	
Trafo	$S_n = 25MVA, U_{ni} = 110kV$ $U_{nj} = 22kV, p_{scn} = 130kW$ $p_{gn} = 30kW, u_{scn} = 11\%$ $i_{gn} = 1\%$	- printr-o impedanță armonică, relația (4.14).	
LEA L1	$l = 25km, S_{Al-Ol} = 95mm^2$	Schema echivalentă armonică în „ π ”, impedanța respectiv admitanța armonică se calculează cu relațiile (4.17), (4.18). - rezistența cu relațiile (4.26), (4.27) - reactanța cu relația (4.28)	alimentează C1
LEA L2	$l = 12km, S_{Al-Ol} = 70mm^2$		alimentează C2
LEA L3	$l = 14km, S_{Al-Ol} = 95mm^2$		alimentează C2
LEA L4	$l = 10km, S_{Al-Ol} = 70mm^2$		alimentează C4
LES L5	$l = 12km, A2YSY 12/20kV$ $S_{Al-Ol} = 95mm^2$	Schema echivalentă armonică în „ π ”, impedanța respectiv admitanța armonică se calculează cu relațiile (4.17), (4.18). $R_k = R_1 \cdot \sqrt{k} + \Delta R_k$ X_k și B_k cu relațiile (4.42), (4.31)	alimentează C5
LES L6	$l = 15km, A2YSY 12/20kV$ $S_{Al-Ol} = 95mm^2$		alimentează C6
C1	$S = 3,33MVA, \cos \varphi = 0,9$	Modelul Pesonen – tabelul 4.1	
C2	$S = 2,201MVA, \cos \varphi = 0,9085$	Modelul R/L – tabelul 4.1	
C3	$S = 1,949MVA, \cos \varphi = 0,9233$		
C4	$S = 1,683MVA, \cos \varphi = 0,8913$		
C5	$S = 3,5MVA, \cos \varphi = 0,8571$	Modelul rezistiv – tabelul 4.1	
C6	$S = 2,773MVA, \cos \varphi = 0,9015$		
Qc	$Q_c = 2.4MVar, U_n = 20kV$	$\underline{Y}_{bat} = j\omega kC$	

Bateria de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere Q_c s-a considerat formată din 4 trepte de putere $0,6MVar$ fiecare.

Fig.4.13 Variația coeficientului de transfer α_{Is} cu rangul armonicii k :

- a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $Kc = 0,5$;
b) pentru diferite grade de compensare Kc la $Qc = 2,4MVar$.

Analizând cele prezentate în figura 4.13.a) se constată că, coeficientul de transfer al curentului pe bara de MT a stației este influențat de prezența baterie de compensare a puterii reactive, astfel pentru $Q_c = 2,4MVar$ și $K_c = 0,5$, pe armonica de rang 7 curentul debitat de consumatorul deformant este amplificat de elementele de sistem de 1,738 ori. Valorile maxime ale coeficientului de transfer al curentului α_{I_s} scad cu micșorarea puterii reactive a baterie de condensatoare derivație și totodată crește rangul armonicilor k pe care apar aceste valori. Din figura 4.13.b) se observă că bateria de condensatoare serie are o influență nesemnificativă în propagarea armonicilor de curent: nu modifică rangul armonicilor pe care apare valoarea maximă a coeficientului de transfer, iar valoarea acestuia se modifică foarte puțin cu gradul de compensare al liniei, de la 1,735 pentru $K_c = 0$ la 1,742 pentru $K_c = 1$.

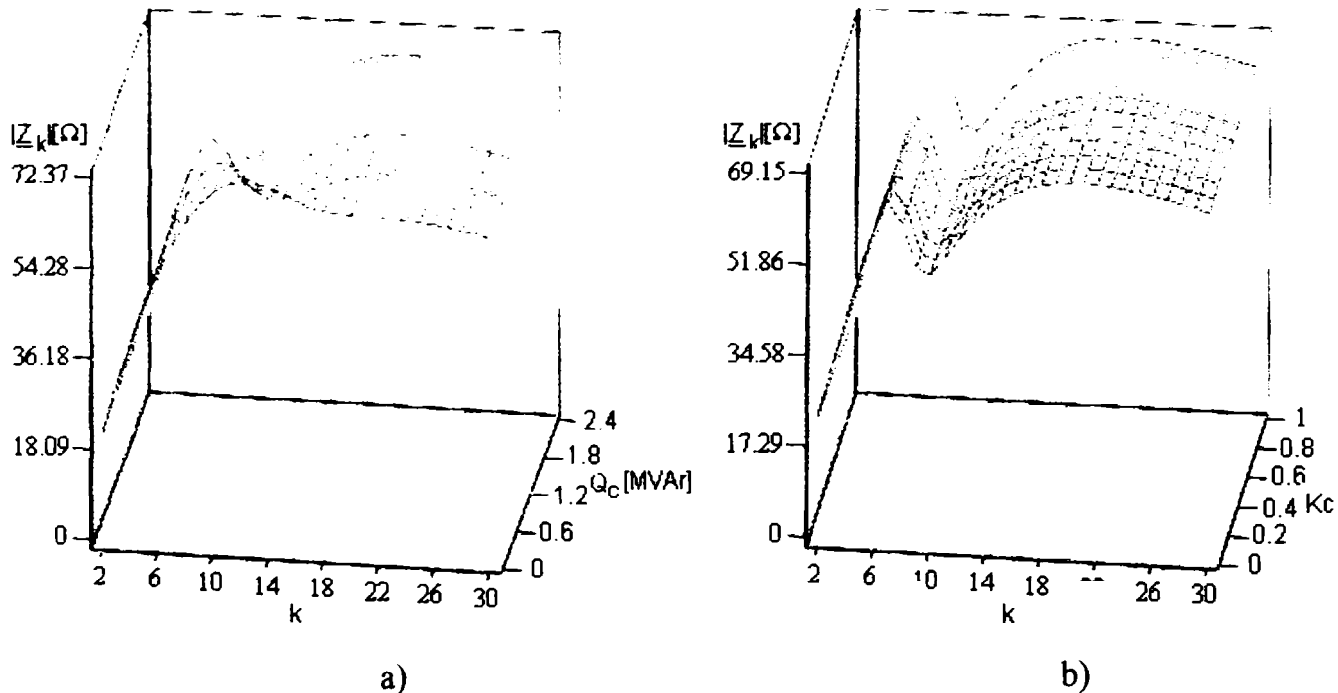


Fig. 4.14. Variația modului impedanței armonice a rețelei cu rangul armonicilor k :
 a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $K_c = 0,5$;
 b) pentru diferite grade de compensare K_c la $Q_c = 1,8MVar$.

Din analiza celor prezentate în figura 4.14 se deduc următoarele observații:

- prezența bateriei de condensatoare pentru compensarea puterii reactive influențează sensibil variația impedanței armonice a rețelei, rangul armonicilor pe care apare valoarea maximă a impedanței crește cu scăderea puterii baterie de condensatoare;
- gradul de compensare al reactanței liniei electrice K_c nu influențează variația impedanței armonice a rețelei cu rangul armonicilor k ;
- valoarea impedanței armonice a rețelei scade cu creșterea gradului de compensare K_c , dar această scădere este nesemnificativă. Diferența dintre impedanța armonică a rețelei în cazul linie fără compensare și a liniei cu compensare scade cu creșterea rangului armonicilor, astfel pentru armonica a 2 această diferență este de $3,365\Omega$, pentru $k = 7$ de $0,54\Omega$, iar pentru $k = 19$ este de $0,066\Omega$.

Informații interesante privind impedanța armonică a rețelei se obțin din reprezentarea acesteia în planul complex (fig. 4.15). Din figura 4.14 se observă că, pentru $Q_c = 1,8MVar$, la $k = 7$ valoarea impedanței armonice atinge primul maxim cu toate că partea reactivă a impedanței are o valoare mare, de fapt nu se poate spune că apare rezonanța paralel pe această armonică. Partea imaginară a impedanței scade cu creșterea rangului armonicilor, dar rămâne cu caracter inductiv. Analizând figura 4.15 se constată în acest caz că nu apare rezonanța armonică paralel respectiv serie, ci amplificări ale impedanței pe unele armonici.

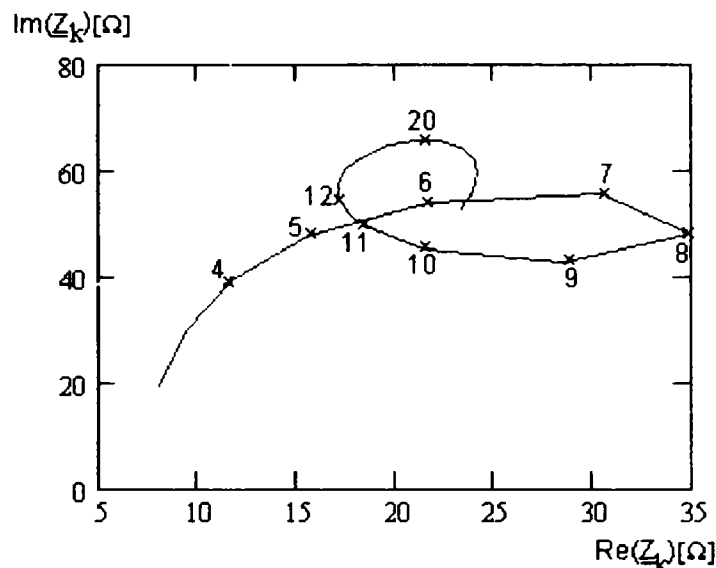


Fig. 4.15. Reprezentarea impedanței armonice a rețelei în planul complex, pentru $Q_c = 1,8MVar$.

Coeficientul de transfer β_{Us} de tensiune armonică pe bara de MT a stației de distribuție are o variație asemănătoare cu cea a coeficientului de transfer de curent α_{Is} (fig. 4.16), cu observația că rangul armonicilor pentru care se obțin valorile maxime crește, deci elementele de sistem contribuie la deplasarea spectrului armonicilor pentru care apar amplificări importante ale tensiunii. Totodată, se observă că valoarea maximă a coeficientului de transfer a tensiunii crește cu puterea bateriei de condensatoare derivație. Din figura 4.16 b) se observă că reactanța armonică a bateriei de condensatoare serie influențează foarte puțin coeficientul de transfer β_{Us} pentru armonici de rang $k < 8$, în timp ce pentru armonici superioare practic nu are nici o influență.

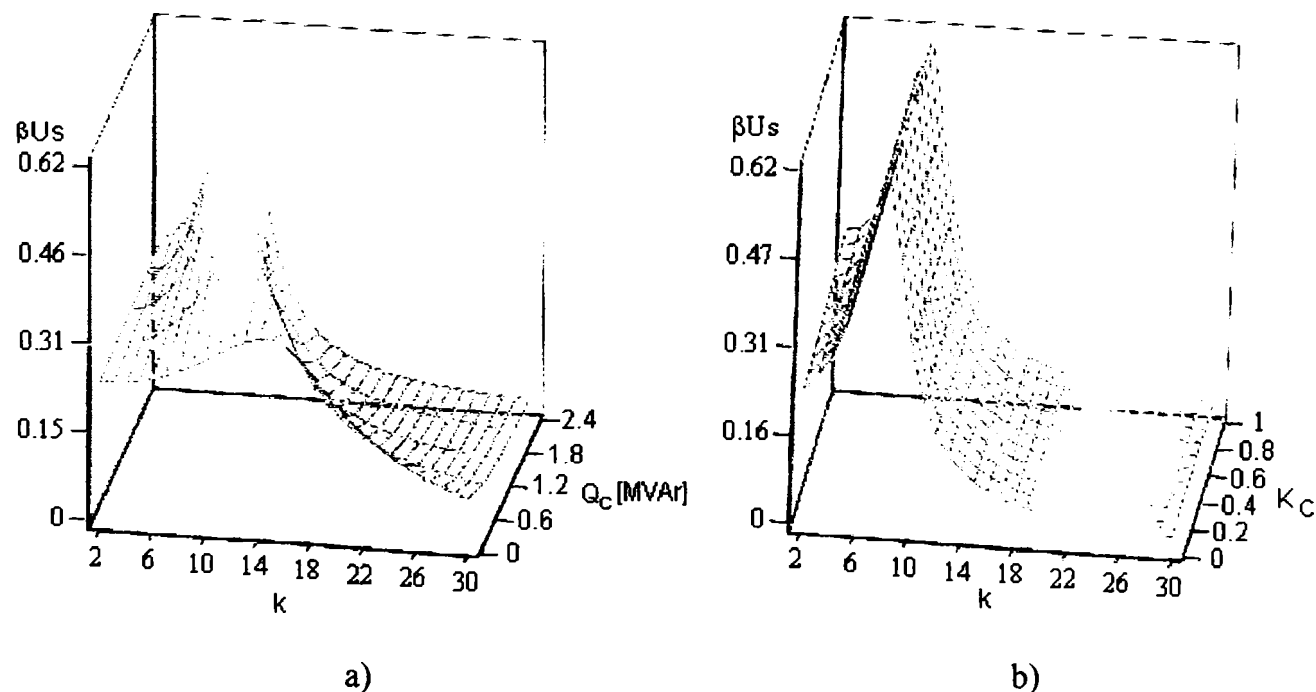


Fig.4.16. Variația coeficientului de amplificare β_{Us} a tensiunii pe bara de MT a stației cu rangul armonicii k : a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $K_c = 0,5$; b) pentru diferite grade de compensare K_c la $Q_c = 2,4MVar$.

Bateria de condensatoare derivație contribuie la amplificarea armonicilor de curent și în același timp este parcursă de un curent armonic important. Valoarea coeficientului de amplificare a curentului armonic prin bateria de condensatoare crește cu puterea bateriei de

condensatoare, iar rangul armonicii la care apare fenomenul de rezonanță paralel scade cu creșterea puterii bateriei. Pentru $Q_c = 2,4MVar$ fenomenul de rezonanță paralel apare pe armonica 7 și valoarea coeficientului α_{IC} este 1,396; pentru $Q_c = 0,6MVar$ valoarea maximă a coeficientului este 0,478 și apare la $k = 13$ (fig. 4.17 a)). Bateria de condensatoare serie nu modifică rangul armonicii pe care apare valoarea maximă a coeficientului de transfer α_{IC} , iar valoarea acestuia se crește nesemnificativ cu gradul de compensare a reactanței liniei (fig. 4.17b)).

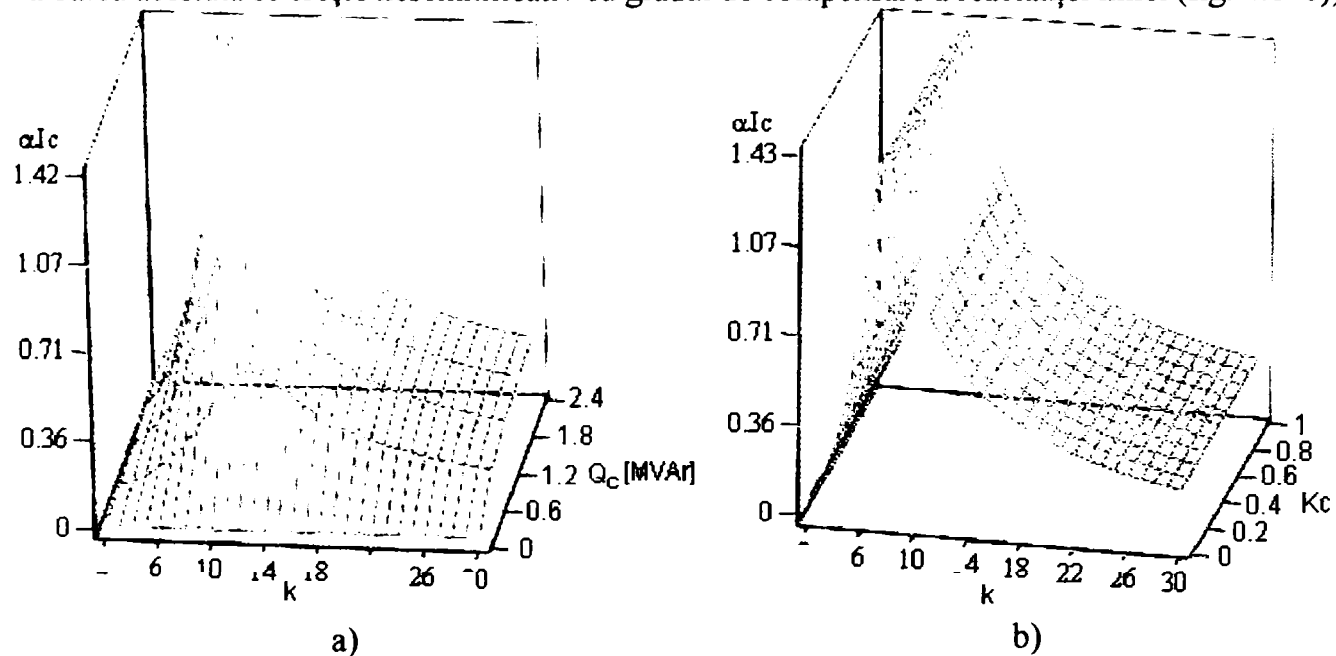


Fig.4.17 Variația coeficientului de transfer α_{IC} la bornele bateriei de condensatoare cu rangul armonicii k : a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $K_c = 0,5$; b) pentru diferite grade de compensare K_c la $Q_c = 2,4MVar$.

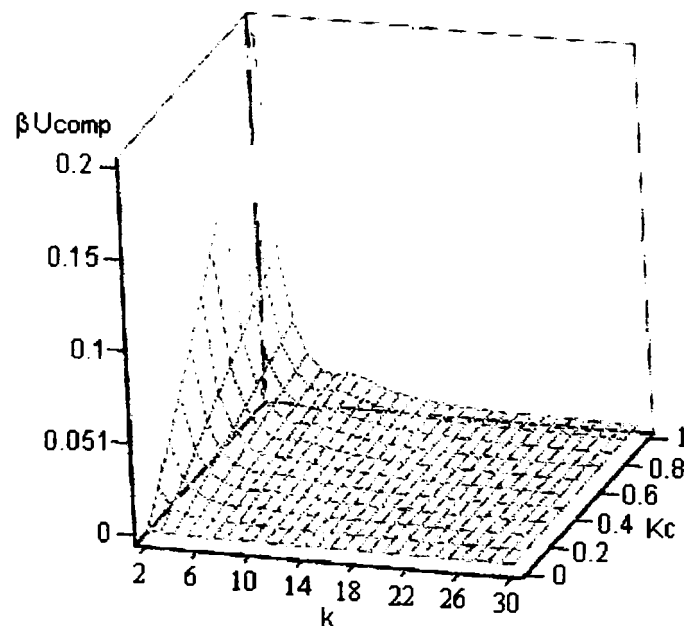


Fig.4.18 Variația coeficientului de amplificare $\beta_{U_{comp}}$ a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare serie cu rangul armonicii k și gradul de compensare al liniei K_c .

Din figura 4.18 se observă că pentru armonici de rang inferior ($k < 10$) tensiunea armonică la bornele baterie de condensatoare crește cu gradul de compensare a liniei. În aceste condiții pot să apară solicitări ale izolației bateriei de condensatoare, tensiunea poate să depășească valoarea maximă admisă. Pentru armonici superioare $k > 10$ coeficientul de amplificare a tensiunii armonice este foarte mic, practic, gradului de compensare K_c al reactanței liniei nu mai afectează valoarea acestuia.

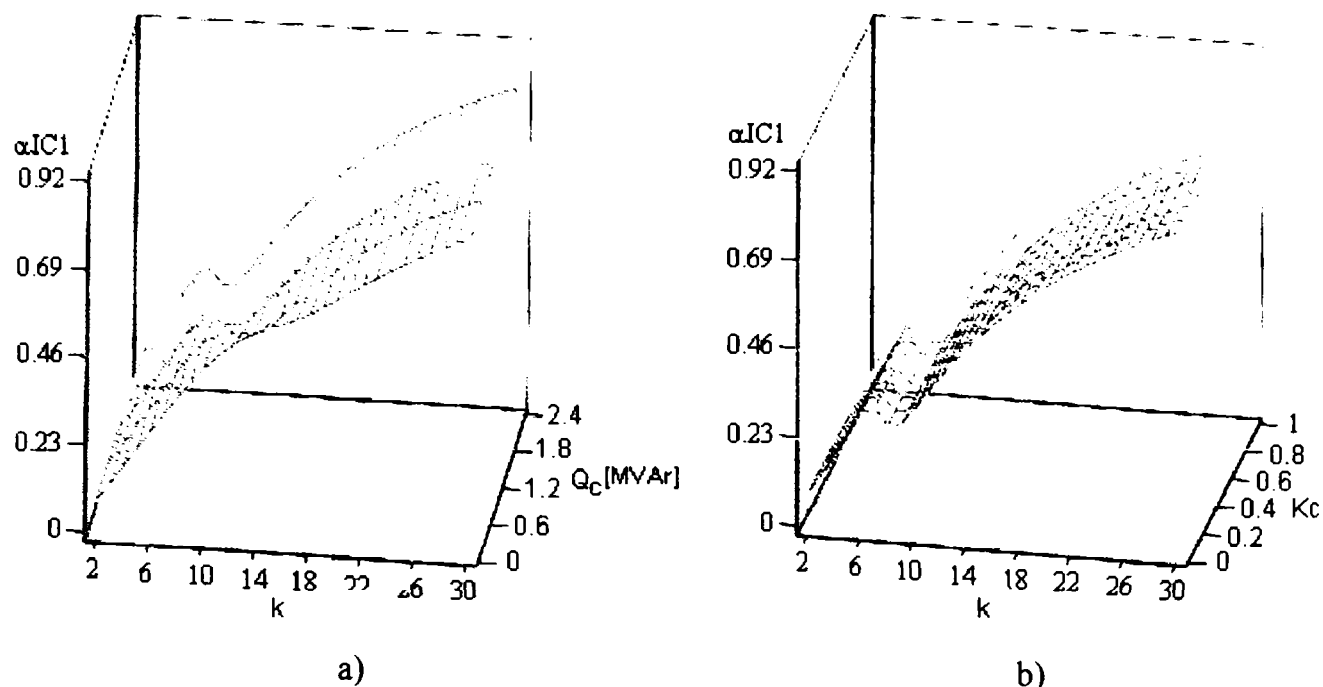
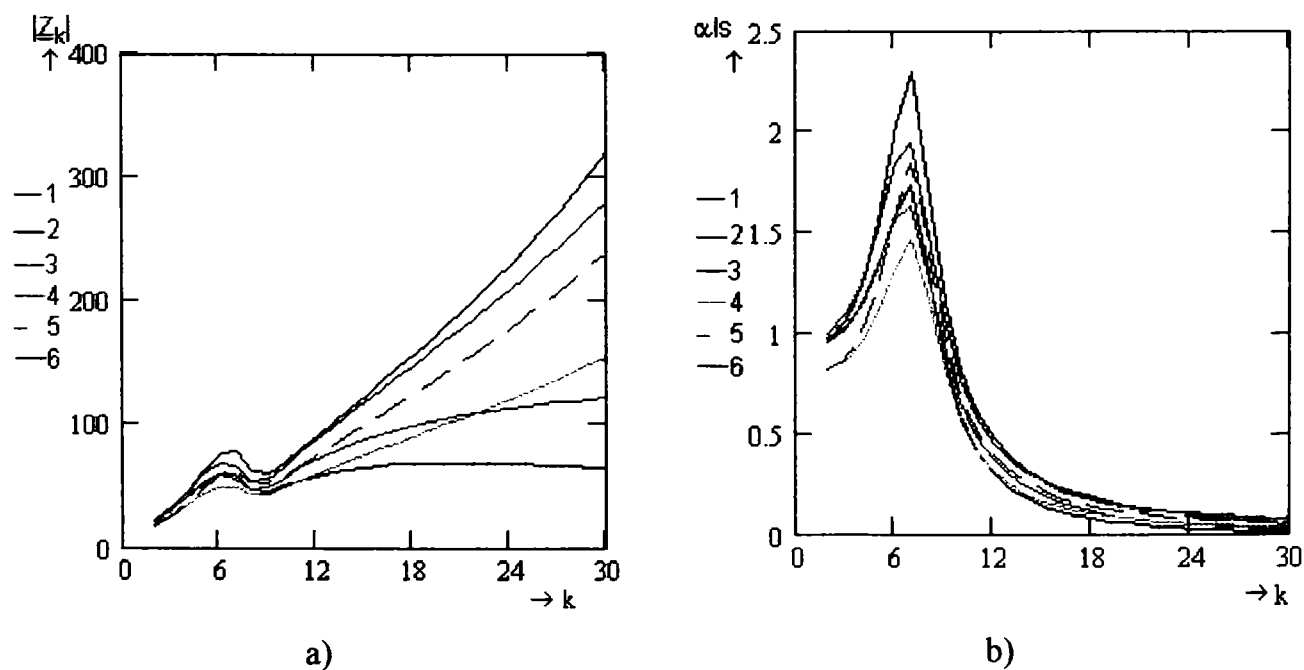


Fig. 4.19. Variația coeficientului de transfer al curentului la consumatorul liniar C1 cu rangul armonicii k : a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $K_c = 0,5$; b) pentru diferite grade de compensare K_c la $Q_c = 2,4 \text{ MVar}$.

Coeficientul de transfer al curentului armonic la consumatorul liniar crește cu rangul armonicii, astfel încât la frecvența de 1500Hz valoarea acestuia este de 0,92, practic din curentul armonic debitat de consumatorul deformant 92% este absorbit de consumatorul liniar C1. În domeniul de frecvențe 350÷850 Hz se constată o reducere a coeficientului de transfer determinată de prezența bateriei de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere (fig. 4.19 a)), în timp ce bateria de condensatoare serie practic nu are nici o influență asupra acestui coeficient de transfer (fig. 4.19 b)).

Pentru a evidenția influența consumatorului liniar C1 asupra impedanței armonice și a coeficienților de transfer în figura 4.20 s-au reprezentat variațiile acestor mărimi pentru cele șase modele armonice prezentate în tabelul 4.1.



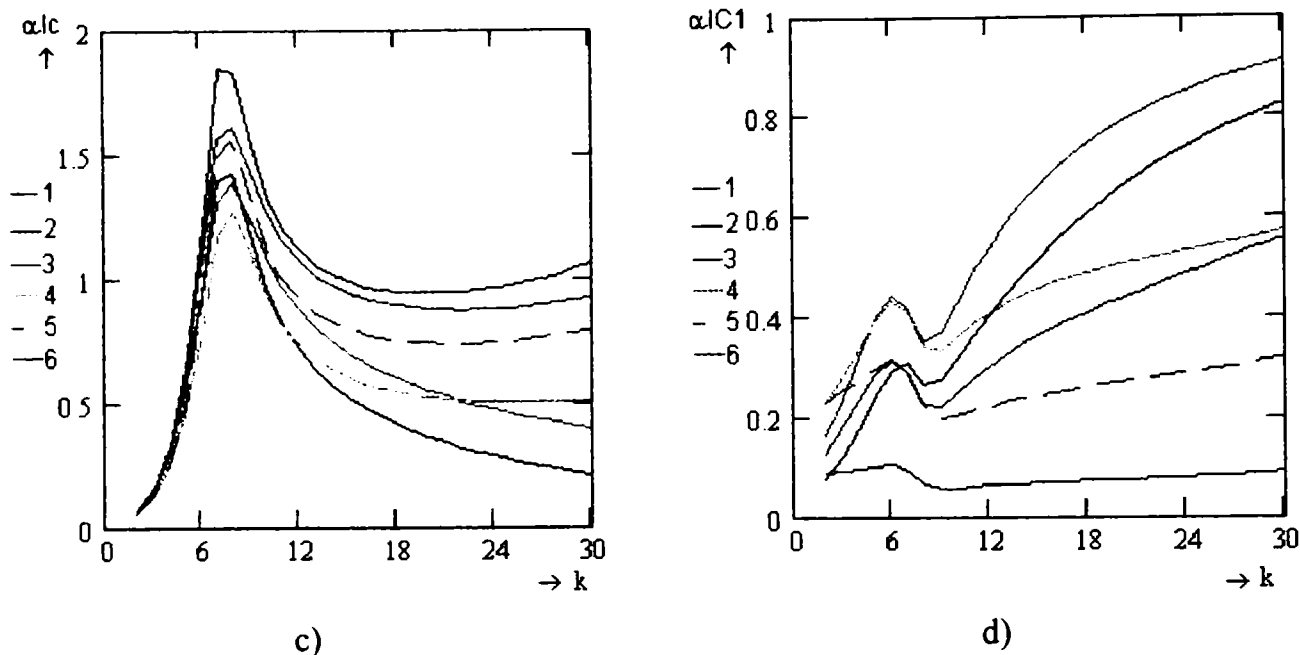


Fig. 4.20 Variația modului impedenței armonice a) și a coeficienților de transfer α_{I_s} b), α_{I_C} c) și $\alpha_{I_{C1}}$ d) pentru cele 6 modele armonice ale consumatorului liniar C1.

Din analiza celor prezentate în figura 4.20 se deduc următoarele observații:

- modelul armonic al consumatorului liniar influențează sensibil valorile coeficienților de transfer;
- modelul de tip CIGRE pentru consumatorul liniar conduce la cele mai mici valori ale coeficienții de transfer α_{I_s} și α_{I_C} (de 1,465 respectiv 1,271);
- cele mai mari valori ale coeficienților de transfer α_{I_s} și α_{I_C} (2,294 respectiv 1,842) se obțin pentru modelul de tip MOTOR;
- modelul armonic al consumatorului, în acest caz, influențează foarte puțin frecvența de rezonanță armonică;
- valoarea cea mai mare a coeficientului de amplificare al curentului absorbit de consumatorul C1 se obține pentru modelul de tip R/L, iar cea mai mică pentru modelul de tip MOTOR.

b) Sursa de poluarea armonică este racordată la bara de MT a stației. În acest caz schema echivalentă armonică a rețelei din figura 4.11 este:

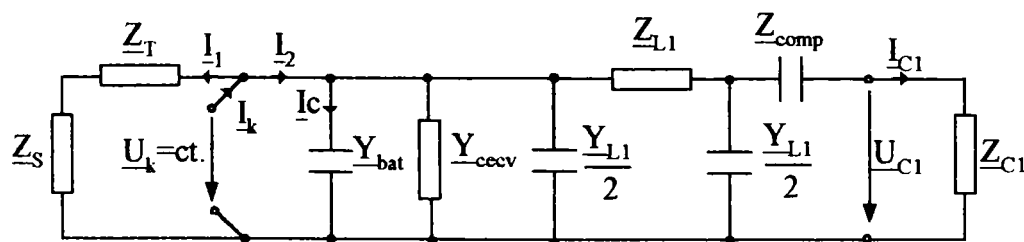


Fig. 4.21 Schema electrică echivalentă de calcul a rețelei din figura 4.11, când sursa de poluare armonică este racordată la barele stației

Impedanța armonică a rețelei văzută la bornele consumatorului deformant are expresia:

$$\underline{Z}_k = \frac{\underline{Z}_{ST} [(Z_{L1} Y_{L1} + 2)(Z_{comp} + Z_{C1}) + 2Z_{L1}]}{(\underline{Z}_{comp} + Z_{C1}) [(Z_{L1} Y_{L1} + 2)(Z_{ST} Y_{echiv} + 1) + Z_{ST} Y_{L1}] + 2Z_{ST} (Z_{L1} Y_{echiv} + 1) + 2Z_{L1}}$$

Coeficientul de transfer al curentului și cel de propagare a tensiunii armonice la bornele consumatorului alimentat prin linia prevăzută cu compensare capacitivă serie:

$$\underline{\alpha}_{IC1} = \frac{I_{C1}}{I_k} = \underline{\beta}_{UC1} \cdot \frac{Z_k}{Z_{C1}} \quad (4.75)$$

$$\underline{\beta}_{UC1} = 2 \frac{Z_{C1}}{(Z_{L1} Y_{L1} + 2)(Z_{C1} + Z_{comp}) + 2Z_{L1}} \quad (4.76)$$

Din relația de calcul a coeficientului de propagare a tensiunii armonice la bornele consumatorului liniar C1 se observă că acesta depinde de impedanța consumatorului și parametrii liniei electrice. Deci, o influență semnificativă asupra coeficientului de propagare a tensiunii $\underline{\beta}_{UC1}$ o are modelul armonic ales pentru consumatorul liniar. Bateria de condensatoare serie contribuie la reducerea acestui coeficient doar pe armonicile inferioare, având în vedere faptul că reactanța armonică a baterie este invers proporțională cu rangul armonicii.

$$\underline{\beta}_{Ucomp} = 2 \frac{Z_{comp}}{(Z_{L1} Y_{L1} + 2)(Z_{C1} + Z_{comp}) + 2Z_{L1}} \quad (4.77)$$

Din analiza expresiei (4.77) se constată că valoarea coeficientului de amplificare a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare serie depinde de gradul de compensare al liniei, de impedanța consumatorului liniar și parametrii liniei. Ținând seama de faptul că impedanța liniei crește cu rangul armonicii, iar reactanța baterie scade, valoarea coeficientului $\underline{\beta}_{Ucomp}$ este mică și scade cu creșterea rangului armonicii.

$$\underline{\alpha}_{IC} = \frac{I_C}{I_k} = Y_{bat} \cdot Z_k \quad (4.78)$$

Pentru aplicația considerată, pe baza relațiilor (4.74)÷(4.78) s-au efectuat calculele prezentate în Anexa 2 și s-au reprezentat grafic variațiile impedanței armonice și a coeficienților de transfer de curent și tensiune în nodurile rețelei.

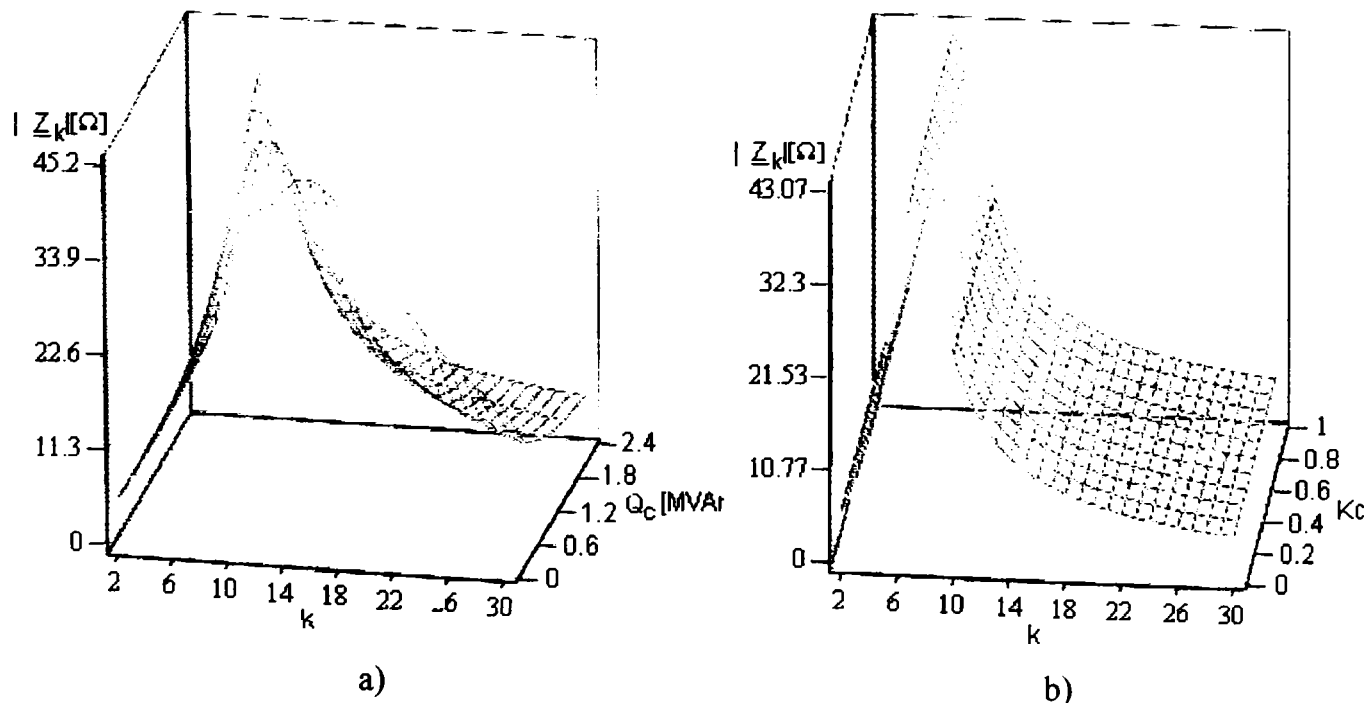


Fig. 4.22. Variația modulului impedanței armonice a rețelei cu rangul armonicii k :
a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $Kc = 0,5$;
b) pentru diferite grade de compensare Kc la $Qc = 2,4MVar$.

Din analiza celor prezentate în figura 4.22 se deduc următoarele:

- domeniul frecvențelor de rezonanță depinde de puterea bateriei de condensatoare folosite pentru îmbunătățirea factorului de putere; cu cât puterea bateriei este mai mare cu atât rangul armonicii la care apare rezonanța paralel scade: pentru $Q_c = 2,4MVar$ rezonanța armonică apare la $k = 7$, pentru $Q_c = 1,2MVar$ rezonanța armonică apare la $k = 10$, iar în lipsa baterie de condensatoare rezonanța apare la $k = 16$.
- valoarea modulului impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului deformant nu se modifică în limite largi odată cu creșterea puterii bateriei de condensatoare derivație: pentru $Q_c = 2,4MVar$ modul impedanței armonice este $43,052\Omega$, pentru $Q_c = 1,2MVar$ este $44,054\Omega$, iar pentru $Q_c = 0MVar$ este $44,086\Omega$.
- compensarea capacitivă serie nu influențează frecvențele de rezonanță armonică, iar valoarea modulului impedanței armonice se modifică foarte puțin cu gradul de compensare al liniei și doar pentru armonicile $k < 10$: impedanța armonică pentru linia fără compensare la $k = 7$ este $43,066\Omega$, iar pentru $K_c = 1$ este de $43,037\Omega$. Deci, valoarea modulului impedanței armonice a rețelei scade cu creșterea gradului de compensare a liniei.

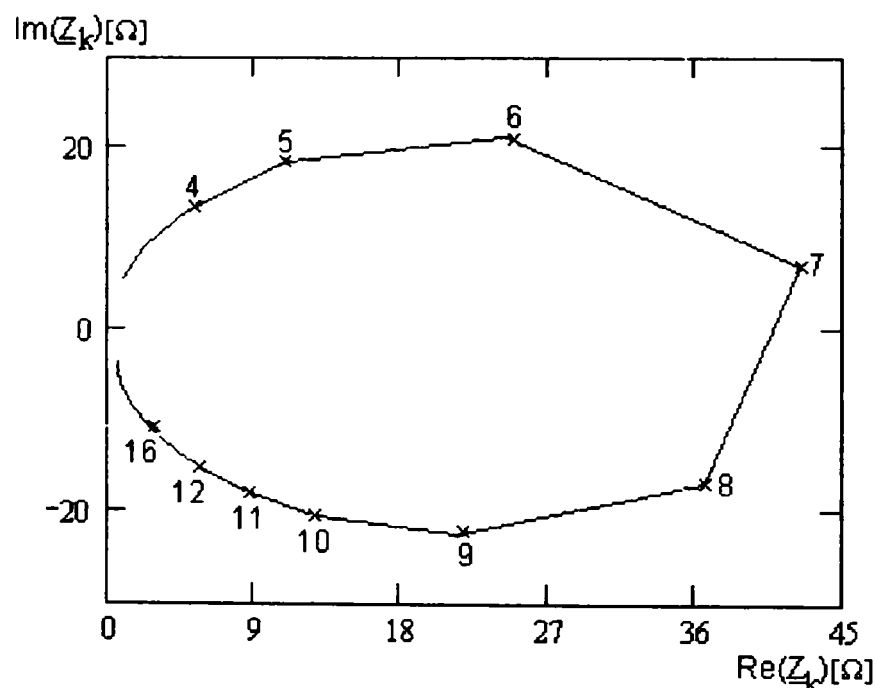


Fig.4.23 Reprezentarea impedanței armonice a rețelei în planul complex, pentru $Q_c=2,4MVar$.

Analizând curba impedanței armonice din figura 4.23 se constată că pe armonica de rang 7 apare o rezonanță paralel, impedanța atinge valoarea maximă, însă această rezonanță nu este netă, parte imaginară a impedanței nu este nulă. Acesta se explică prin faptul că apar de interdependențe între armonicile din circuitul neliniar. De la acest punct, odată cu creșterea rangului armonicii, impedanța armonică are un caracter capacitiv. Se constată că nu apar rezonanțe serie.

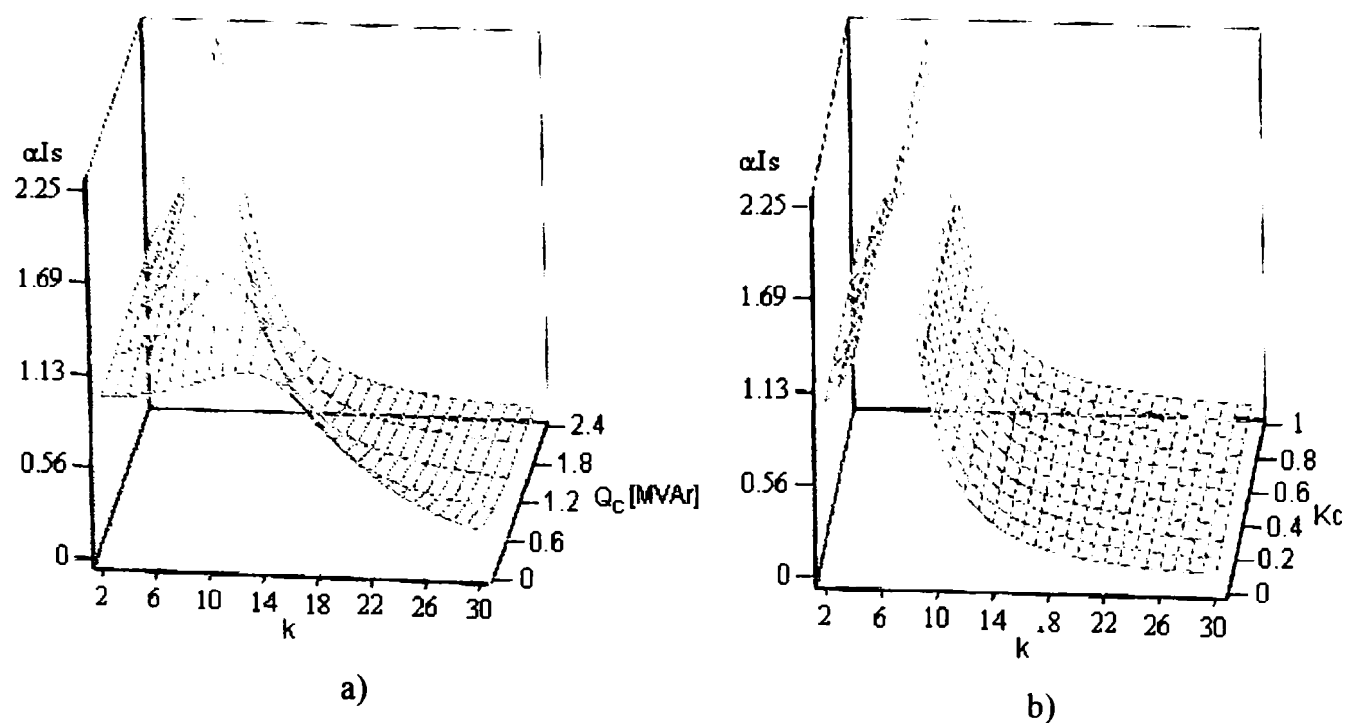


Fig. 4.24 Variația coeficientului de transfer α_{Is} cu rangul armonicii k :

- a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $Kc = 0,5$;
 b) pentru diferite grade de compensare Kc la $Qc = 2,4MVar$.

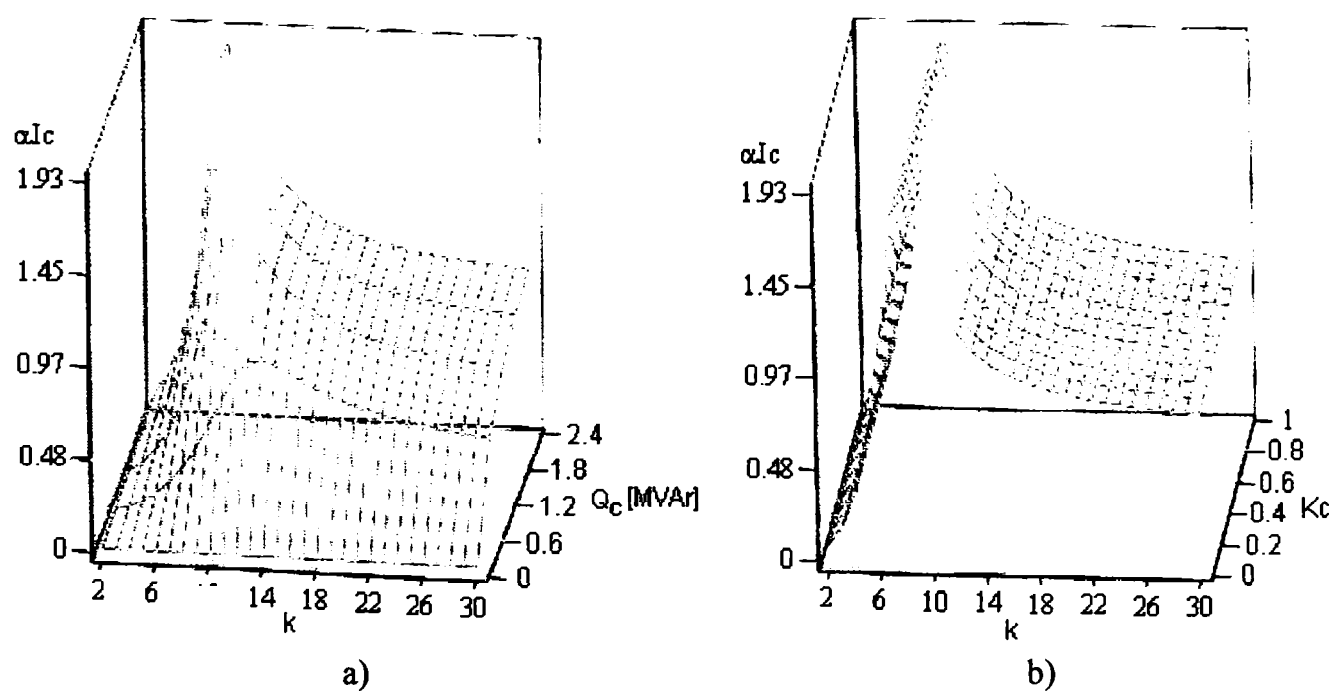


Fig.4.25 Variația coeficientului de transfer α_{Ic} la bornele bateriei de condensatoare cu rangul armonicii k : a) pentru diferite trepte de compensare a puterii reactive la $Kc = 0,5$;
 b) pentru diferite grade de compensare Kc la $Qc = 2,4MVar$.

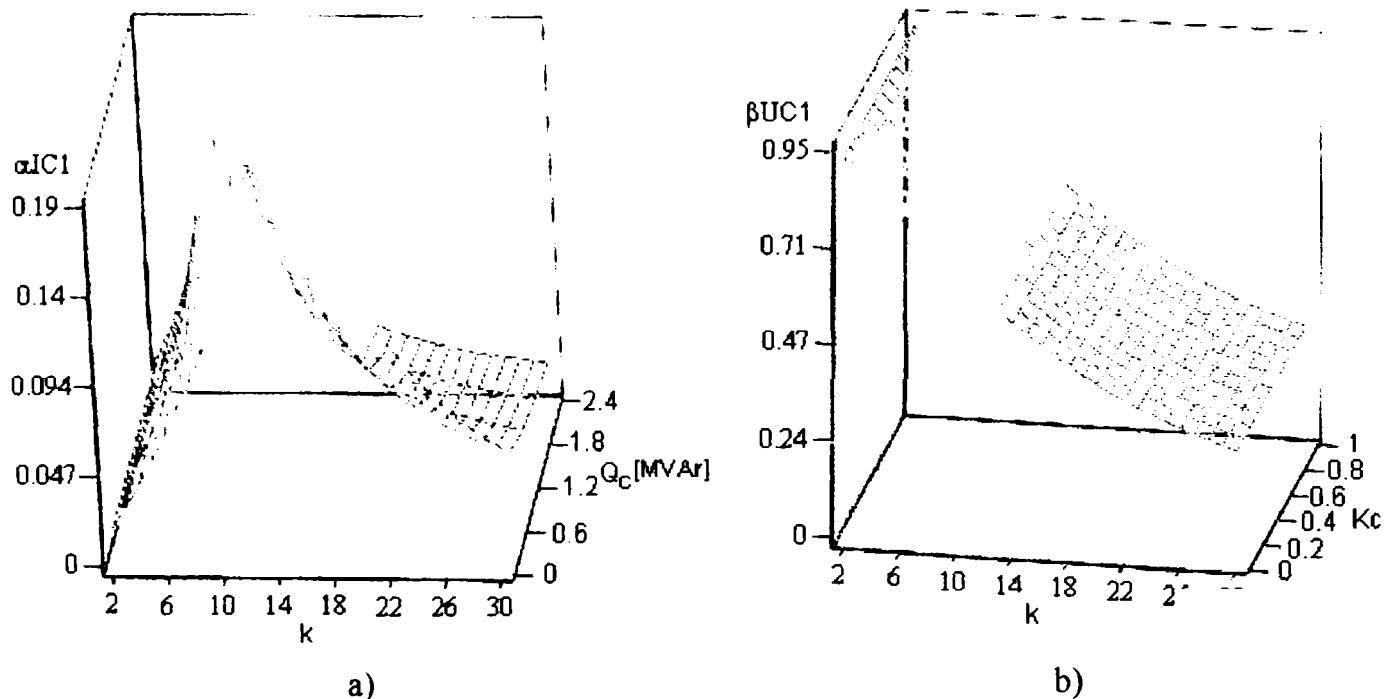


Fig. 4.26 Variația coeficienților de transfer cu rangul armonicii k :

- a) α_{IC1} , pentru diferite puteri ale bateriei de condensatoare derivație la $Kc = 0,5$;
 b) β_{UC1} , pentru diferite ale gradului de compensare Kc , la $Qc = 2,4MVar$.

Analizând cele prezentate în fig.4.24, fig.4.25 și fig. 4.26 se deduc următoarele observații:

- valoarea coeficientului de transfer al curentului armonice spre sistem α_{Is} și domeniul frecvențelor de rezonanță depind de puterea bateriei de condensatoare derivație: pentru $Qc=2,4MVar$ coeficientul α_{Is} are valoarea maximă de 2,252 la $k=7$; pentru $Qc=0,6MVar$ coeficientul α_{Is} are valoarea maximă de 1,5 la $k=11$.
- valoarea coeficientului de transfer α_{Is} scade cu creșterea gradului de compensare al liniei pentru armonici de rang $k < 10$: pentru linia fără compensare coeficientul α_{Is} are valoarea 2,2528 la $k=7$, iar pentru $Kc=1$ la aceeași armonică are valoarea 2,2513 (valorile sunt obținute pentru $Qc=2,4MVar$). Pentru armonici de rang $k > 10$ coeficientul de transfer α_{Is} nu se mai modifică cu gradul de compensare.
- coeficientul de amplificarea al curentului la bornele bateriei de condensatoare și domeniul frecvențelor de rezonanță depind de puterea bateriei de condensatoare derivație. Valoarea coeficientului α_{IC} crește cu creșterea puterii bateriei de condensatoare, iar rangul armonicii de rezonanță scade cu creșterea puterii bateriei: pentru $Qc=2,4MVar$ pe armonică $k=7$ valoarea maximă a coeficientului α_{IC} este de 1,8082, iar pentru $Qc=0,6MVar$ la armonică de rezonanță $k=13$ are valoarea de 0,83062.
- coeficientul de transfer α_{IC1} al curentului la bornele consumatorului liniar are valori mult mai reduse decât α_{IC} : pentru $Qc=2,4MVar$ pe armonică de rezonanță $k=7$ are valoarea 0,1738, iar pentru $Qc=1,2MVar$ la armonică de rezonanță $k=10$ are valoarea de 0,18318.
- coeficientul de transfer a tensiunii la bornele consumatorului liniar nu depinde de puterea bateriei de condensatoare derivație și scade cu rangul armonicii. Pentru armonici de rang $k < 10$, valoarea coeficientul de transfer β_{UC1} crește odată cu creșterea gradului de compensare al liniei: pentru linia fără compensare la $k=5$, β_{UC1} are valoarea 0,83949, iar pentru $Kc=1$ la aceeași armonică are valoarea 0,84452.

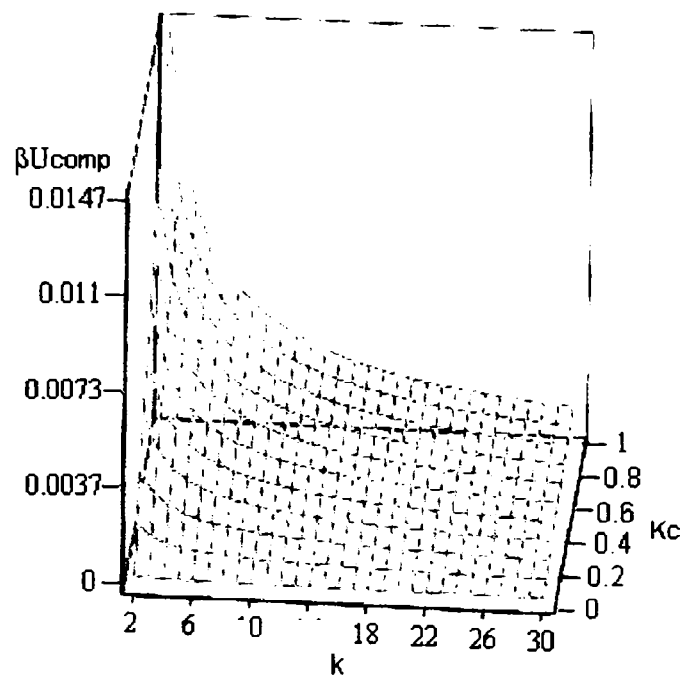
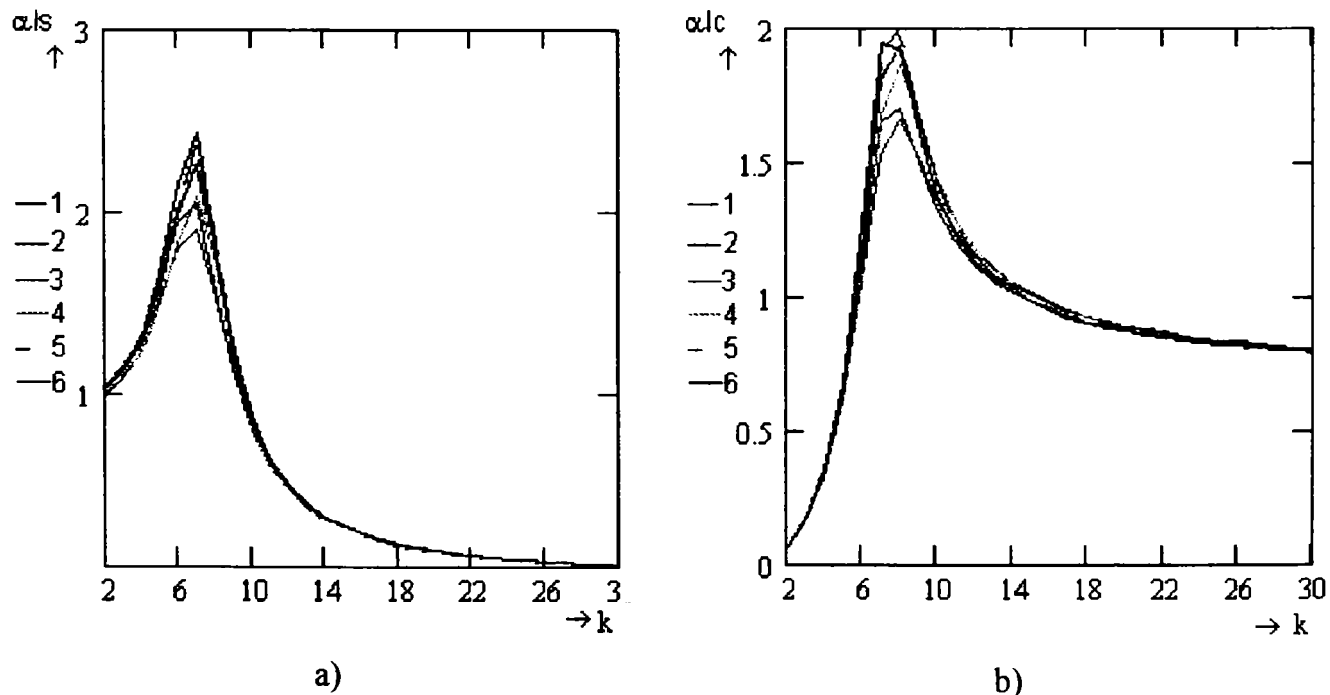


Fig. 4.27 Variația coeficientului de amplificare $\beta_{U_{comp}}$ a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare serie cu rangul armonicii k și gradul de compensare al liniei Kc .

Amplificarea tensiunii armonice la bornele baterie de condensatoare scade cu rangul armonicii și crește cu gradul de compensarea. Ca și valoarea coeficientului de amplificare este mult mai redus decât în cazul a), 0,0066 pentru $k = 5$ și $Kc = 1$ și această valoare scade cu creșterea rangului armonicii. Deci, pentru a se evita solicitarea izolației bateriei de condensatoare serie, soluția ar fi amplasarea acestora cât mai departe de sursa de poluare armonică.

În continuare sunt reprezentate grafic variația impedanței armonice și a coeficienților de transfer cu rangul subarmonicii pentru cele 6 modele armonice ale consumatorului liniar.



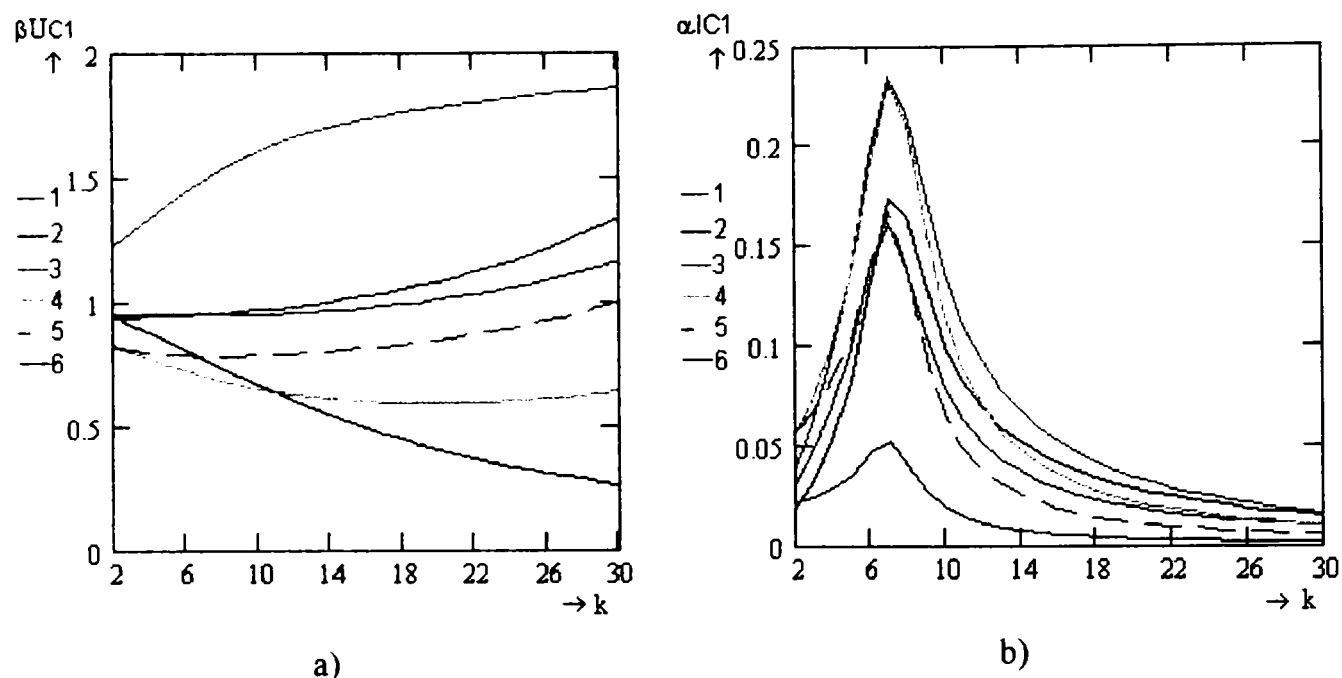


Fig. 4.28 Variația coeficienților de transfer cu rangul armonicii k , la $Kc = 0,5$ și $Qc = 2,4MVar$, pentru diferite modele armonice ale sarcinii liniare:

a) α_{Is} , b) α_{IC} , c) β_{UC1} , d) α_{IC1}

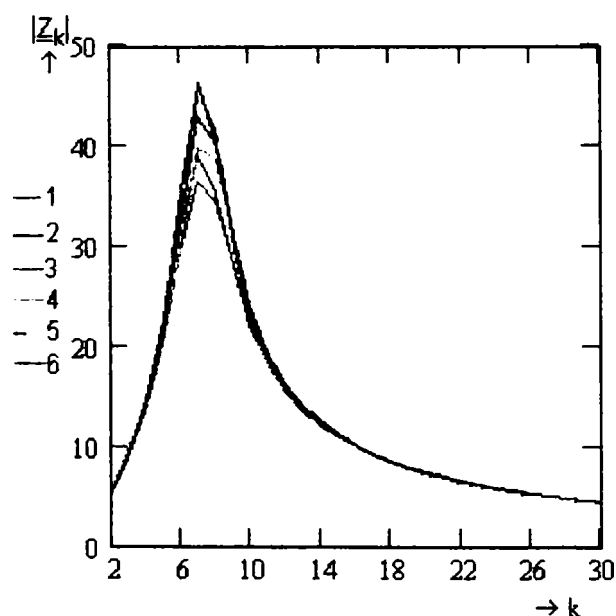


Fig. 4.29. Variația modului impedanței armonice cu rangul armonicii k , pentru diferite modele armonice ale sarcinii liniare, la $Kc = 0,5$ și $Qc = 2,4MVar$.

Din analiza celor prezentate în figura 4.28 și figura 4.29 se constată următoarele:

- modelul armonic al consumatorului liniar influențează sensibil valorile coeficienților de transfer și a impedanței armonice: modelul armonic de tip MOTOR al consumatorului liniar conduce la cele mai mari valori ale impedanței armonice ($46,3\Omega$) și a coeficientului α_{Is} ($2,42$) pentru armonica de rezonanță $k = 7$, în timp ce, modelul de tip R/L conduce la cele mai mici valori ale acestor mărimi: $\alpha_{Is} = 1,9085$; $\alpha_{IC} = 1,658$ și $|Z_k| = 36,484\Omega$.
- modelul armonic al consumatorului liniar influențează atât valoarea coeficientului de amplificare a armonicilor de curent prin bateria de condensatoare derivație cât și frecvența de rezonanță la care apar amplificări maxime: pentru modelul de tip MOTOR armonica la care apare fenomenul de rezonanță este 7 ($\alpha_{IC} = 1,945$), pentru celelalte fenomenul de rezonanță apare pe armonica de rang $k = 8$.

- coeficientul de transfer a tensiunii armonice la bornele consumatorului liniar depinde de modelul armonic al consumatorului: pentru modelul de tip R/L coeficientul $\beta_{U_{C1}}$ prezintă o variație crescătoare mai pronunțată cu creșterea rangului armonicii, în timp ce pentru modelul de tip Pesonen coeficientul $\beta_{U_{C1}}$ prezintă o variație descrescătoare mai pronunțată cu creșterea rangului armonicii.
- coeficientul de transfer α_{IC1} al curentului armonic la bornele consumatorului liniar are cea mai mare valoare pentru modelele armonice de tip R/L și CIGRE (0,2344 pentru armonica 7), iar cea mai mică valoare pentru modelul de tip MOTOR (0,052).

4.6.2. Studiul propagării subarmonicilor în rețele prevăzute cu compensare capacitivă serie

Transformatoarele electrice și bobinele cu miez feromagnetic care funcționează în zona saturată a curbei de magnetizare pot determina apariția și amplificarea subarmonicilor în rețelele electrice [C1]. În cazul rețelele ce dispun de compensare capacitivă serie fenomenul de propagare a acestor subarmonici poate cauza apariția unor supratensiuni periculoase la bornele bateriei.

Pentru a evidenția efectul compensării serie asupra fenomenului de propagare a subarmonicilor în rețelele electrice, se consideră aplicația prezentată în § 4.6.1 cu observația că, parametrii armonici ai elementelor de rețea s-au calculat pentru subarmonicile de rang $2/k$, unde $k \geq 2$. Relațiile pentru calcul impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului deformant și a coeficienților de transfer de curent și tensiune stabilite pentru domeniul suprasincron rămân valabile și pentru domeniu subsincron. În anexa 3 sunt prezentate relațiile de calcul și valorile parametrilor elementelor de rețea. Studiul s-a realizează pentru cele două cazuri: a) sursa de poluare este conectată la capătul liniei prevăzută cu compensare capacitivă serie, b) sursa de poluare conectată la barele stație de distribuție.

a) *Sursa de poluare este conectată la capătul liniei prevăzute cu compensare capacitivă serie*

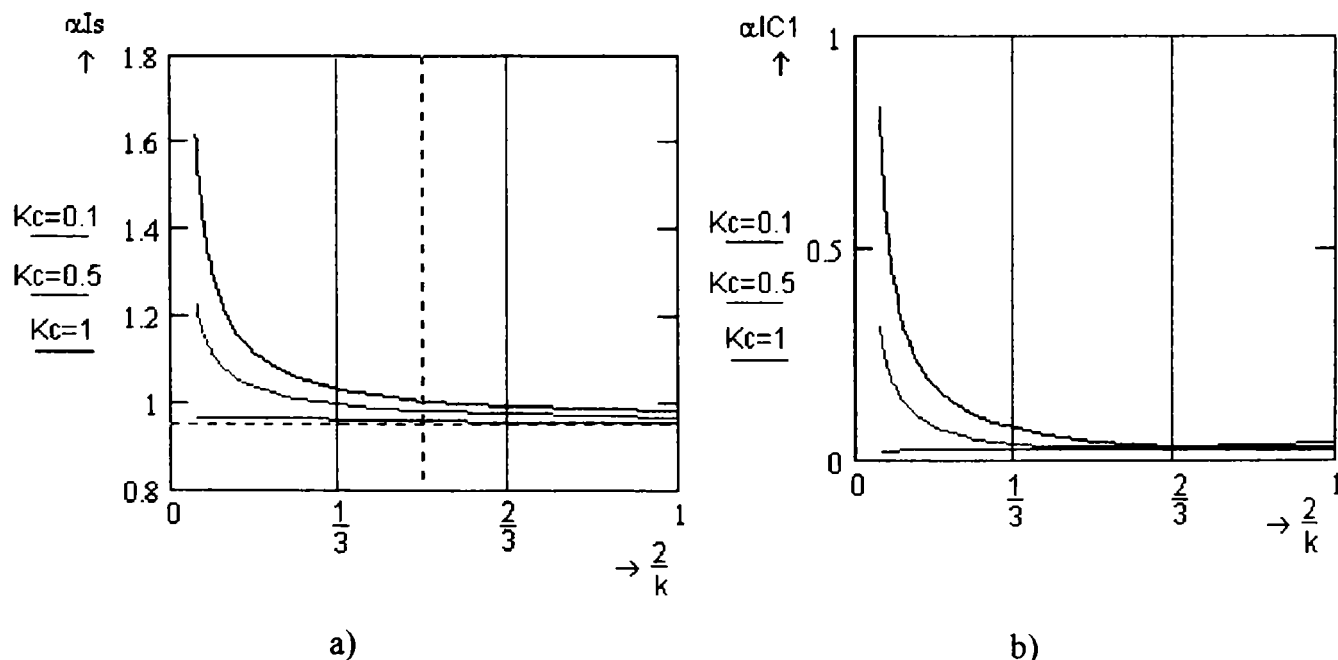


Fig.4.30 Variația coeficienților de transfer α_{Is} și α_{IC1} cu rangul subarmonicilor, pentru $Q_c = 2,4MVar$

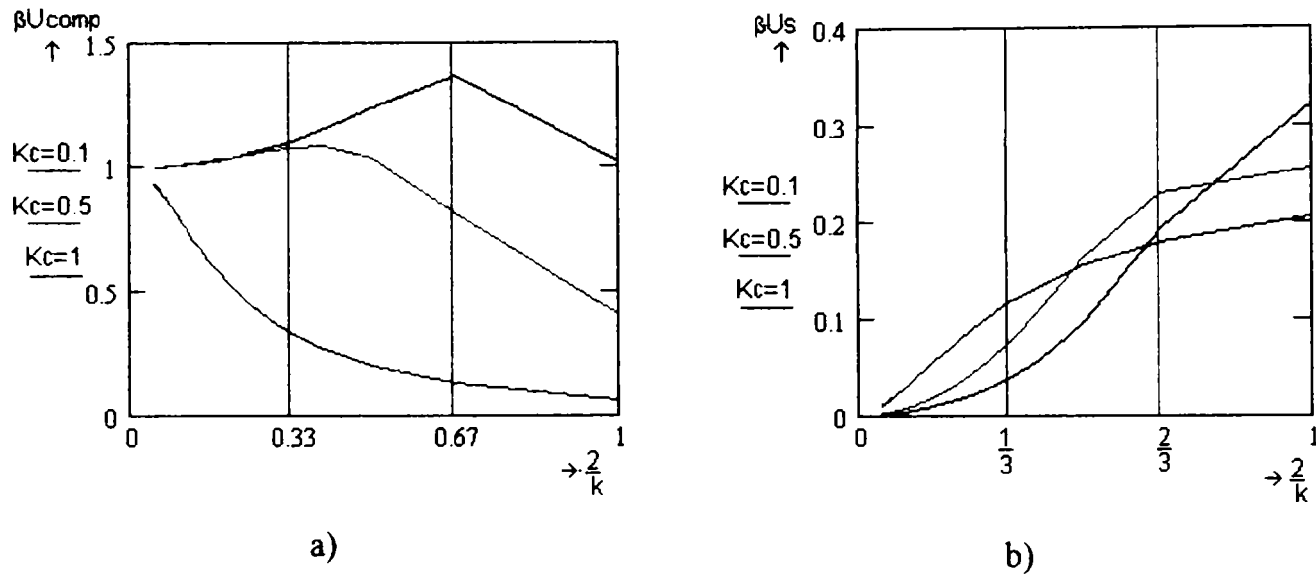


Fig. 4.31. Variația coeficientului de transfer de tensiune armonică pe barele stației și la bornele bateriei de condensatoare serie cu rangul subarmonicii, pentru $Q_c = 2,4MVar$

Din analiza celor prezentate în figurile 4.30 și 4.31 se deduc următoarele:

- coeficientul de transfer a curentului la bara de MT a stației scade cu creșterea rangului subarmonicii și crește cu gradul de compensare al liniei K_c . Astfel, pentru subarmonica $1/3$ α_{I_s} are valoarea 1,032 la $K_c = 1$ și 0,9889 la $K_c = 0,5$ și scade cu creșterea subarmonicii.
- coeficientul de amplificare al curentului armonic absorbit de consumatorul C1 scade de asemenea cu creșterea rangului subarmonicii și crește cu gradul de compensare al liniei K_c . Pentru subarmonica de rang $1/3$ coeficientul α_{IC1} are valoarea 0,0756 pentru $K_c = 1$ și 0,0368 pentru $K_c = 0,5$. Se observă că acest coeficient scade până la subarmonica de $2/3$ când ia valoarea de 0,0335 apoi are o ușoară tendință de creștere.
- coeficientul de amplificare a tensiunii la bornele baterie de condensatoare serie este sensibil influențat de gradul de compensare a liniei. Pentru $K_c = 1$ pe subarmonica $2/3$ apare o amplificare a tensiunii la bornele acesteia de 1,369 ori. Pentru grade de compensare mai mici valorile acestui coeficient sunt mai reduse și apar la subarmonici de rang inferior;
- coeficientul de propagare a tensiunii armonice pe barele de MT ale stație crește cu rangul subarmonicii și pentru subarmonici de rang $<$ de $2/3$ valoarea acestuia scade cu creșterea gradului de compensare al liniei.

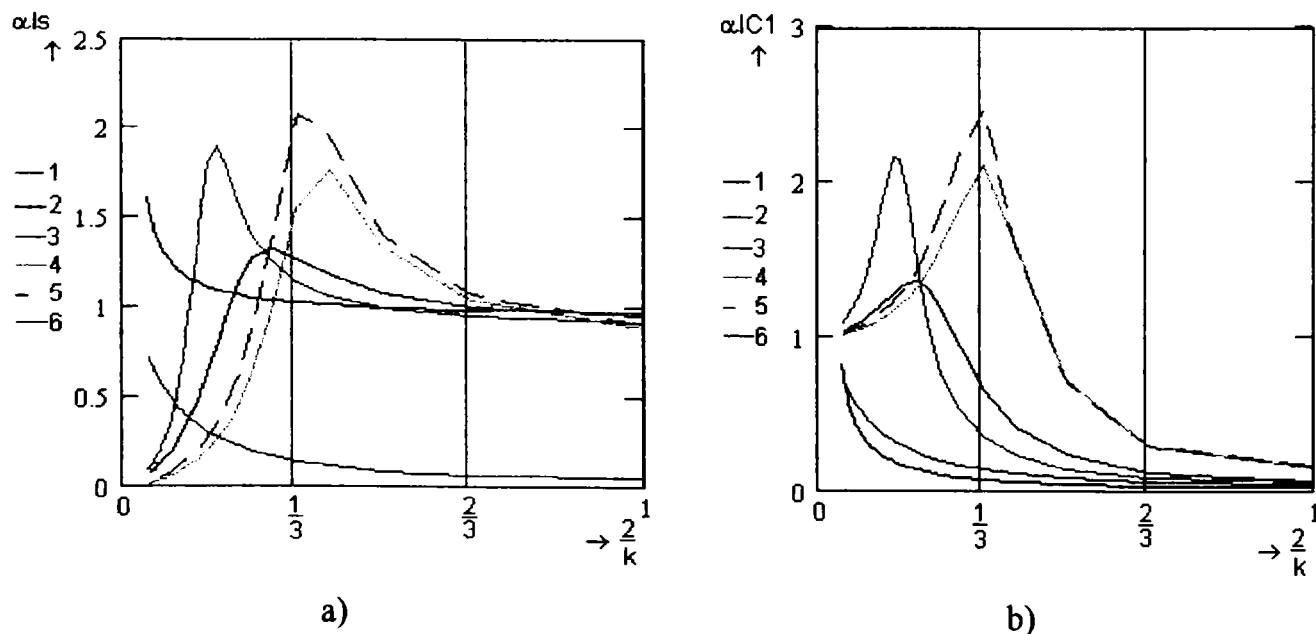


Fig. 4.32. Variația coeficienților de transfer α_{I_s} și α_{IC1} cu rangul subarmonicii, pentru diferite modele armonice ale sarcinii liniare, la $K_c = 1$ și $Q_c = 2,4MVar$.

Din figura 4.32 se observă că în domeniul subsincron modelul armonic al consumatorului liniar influențează sensibil atât valoarea coeficienților de transfer cât și frecvențele de rezonanță subarmonică. Modelul armonic 5 pentru consumator liniar conduce la cele mai mari valori pentru coeficienții de transfer: $\alpha_{Is}=2,098$ și $\alpha_{IC1}=2,466$ pentru subarmonica 1/3. Modelul de sarcină pur rezistiv (1) se comportă cel mai bine în domeniul subsincron, nu determină creșteri importante ale curenților armonici. Regimul deformant produs de consumatorul neliniar se manifestă la bornele consumatorului liniar și ale sistemului prin amplificări semnificative ale subarmonicilor de curent.

b) Sursa de poluare este conectată la barele stației de distribuție

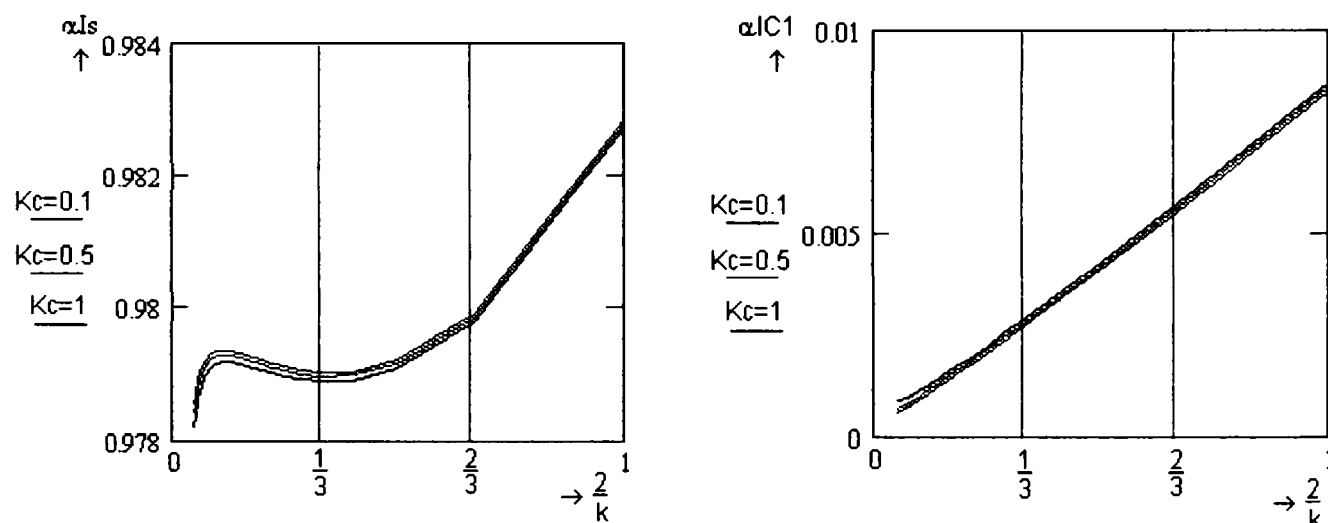


Fig.4.33 Variația coeficientul de transfer α_{Is} și α_{IC1} cu rangul subarmonicii, pentru diferite valori ale lui Kc și $Qc = 2,4MVar$.

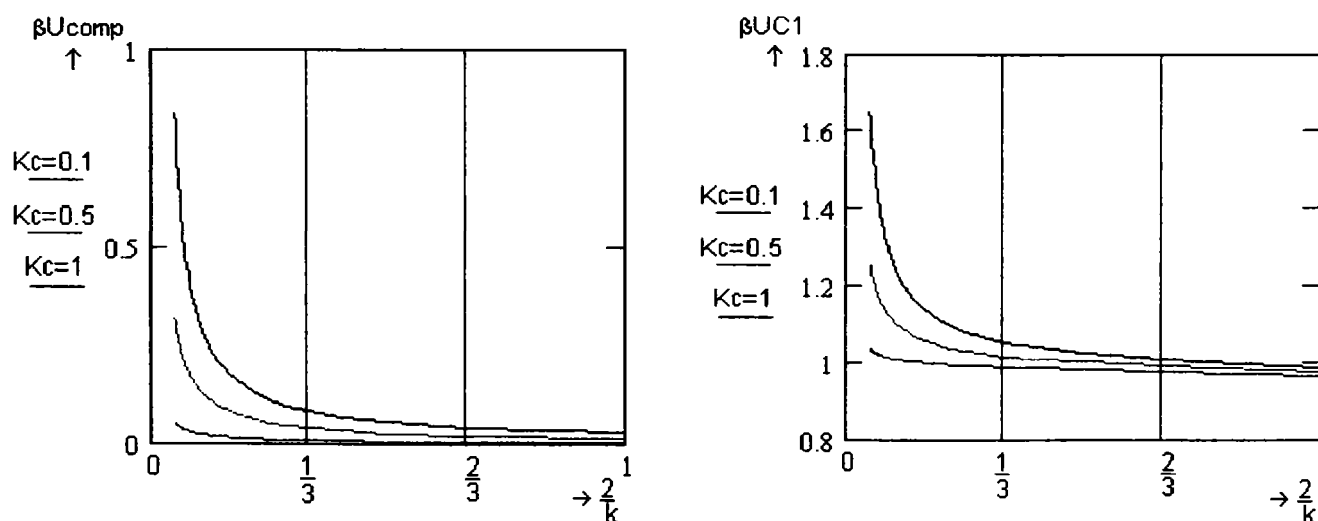


Fig. 4.34 Variația coeficientului de transfer β_{Ucomp} și β_{UC1} cu rangul subarmonicii, pentru diferite valori ale lui Kc și $Qc = 2,4MVar$.

Din analiza celor prezentate în fig. 4.33 și fig.4.34 rezultă următoarele:

- coeficientul de transfer al curentului spre sistem crește cu rangul subarmonicii și valoarea lui este foarte puțin influențată de gradul de compensare al reactanței liniei: la armonica 1/3 pentru $Kc=1$ are valoarea 0,097889 și pentru $Kc = 0,5$ are valoarea 0,97897. Domeniul de valori pentru coeficientul α_{Is} este între 0,9784 și 0,9828, deci aproape de 1. Prin urmare, regimul deformant produs de consumatorul neliniar este refulat spre sistem sub forma de subarmonici de curent.
- coeficientul de transfer α_{IC1} al curentului subarmonic la bornele consumatorului liniar crește liniar cu rangul subarmonicilor, dar valoarea lui este mai mică de 0,01.

- coeficientul de amplificarea a tensiunii la bornele baterie de condensatoare scade cu creșterea rangului subarmonic. În domeniul $(0, 1/3)$, în funcție de gradul de compensare și amplitudinile armonicilor de tensiune ale sursei de poluare, valoarea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare serie poate să atingă valori periculoase pentru izolația acesteia.
- coeficientul de transfer a tensiunii la bornele consumatorului liniar are o variație descrescătoare mai pronunțată cu creșterea rangului subarmonic și tinde către valoarea 1. Valorile coeficientului de transfer depind de gradul de compensare al reactanței liniei: la subarmonica $1/20$ pentru $K_c = 1$ are valoarea 1,657 și pentru $K_c = 0,5$ are valoarea 1,2613; la subarmonica $1/3$ pentru $K_c = 1$ are valoarea 1,054 și pentru $K_c = 0,5$ are valoarea 1,0171. Deci, regimul deformant produs de consumatorul neliniar se manifestă la bornele consumatorului liniar prin amplificarea subarmonicilor de tensiune.

Pentru a evidenția influența modelului armonic al consumatorului liniar asupra valorilor coeficienților de transfer și frecvențele de rezonanță subarmonică pentru aplicația prezentată, în continuare se prezintă curbele de variație ale acestor mărimi pentru cele 6 tipuri de modele armonice ale sarcinii liniare.

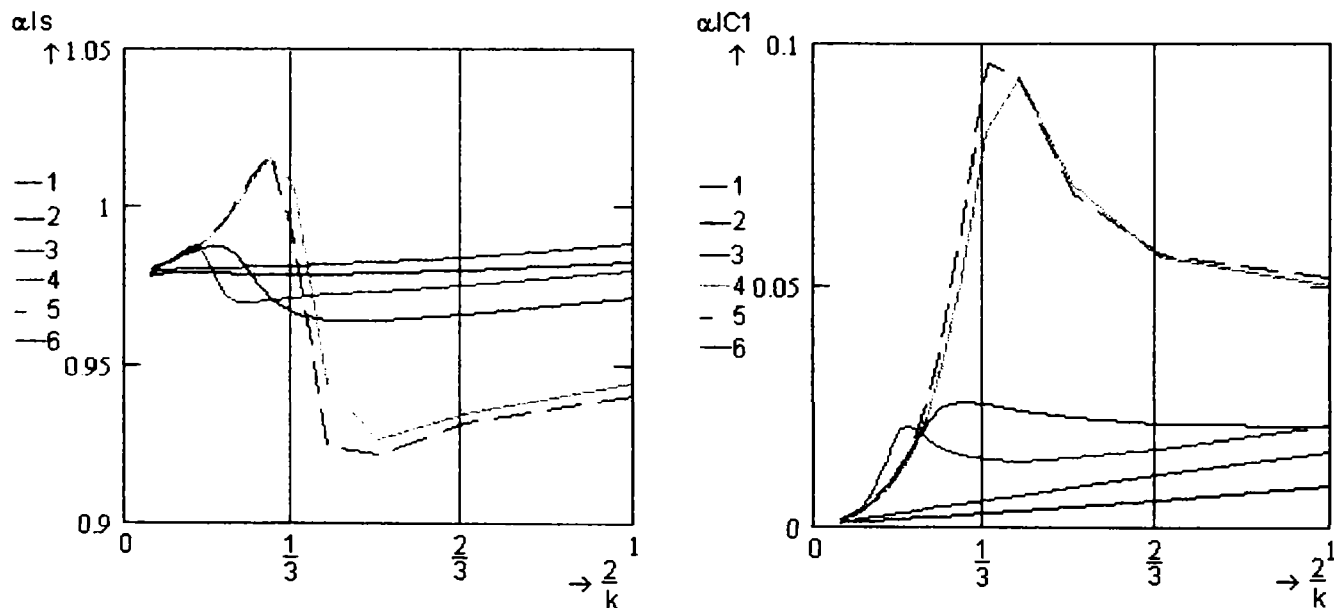


Fig. 4.35 Variația coeficienților de transfer α_{Is} și α_{IC1} cu rangul subarmonic, pentru diferite modele armonice ale sarcinii liniare, la $K_c = 1$ și $Q_c = 2,4MVar$.

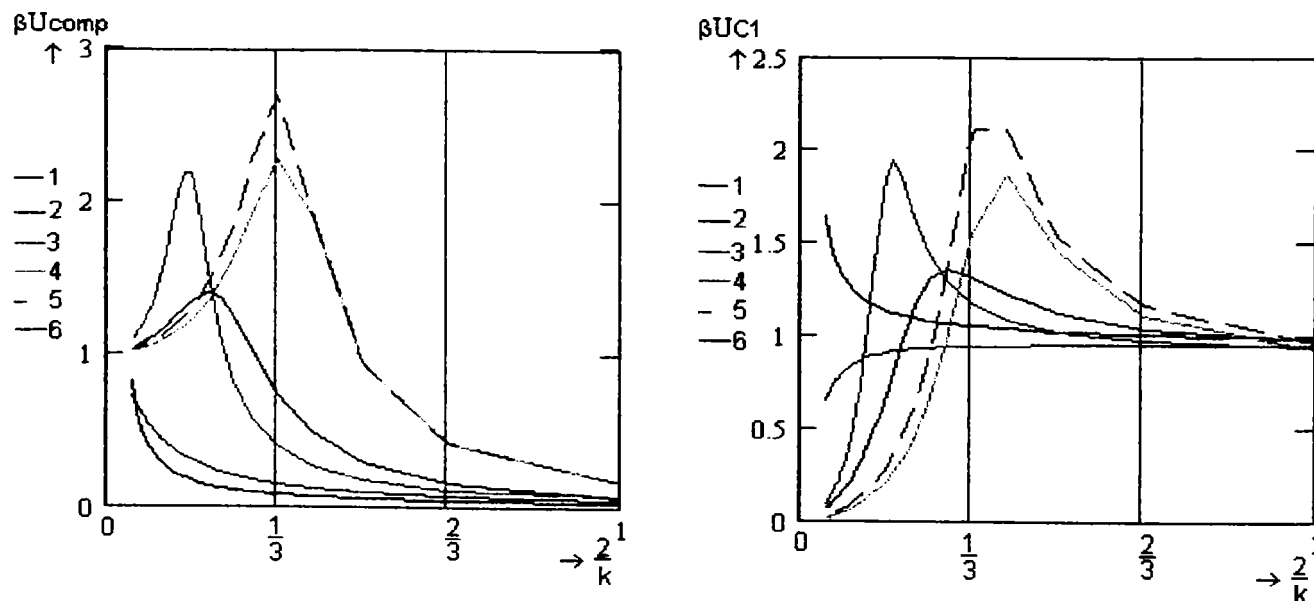


Fig. 4.36 Variația coeficientului de transfer β_{Ucomp} și β_{UC1} cu rangul subarmonic, pentru diferite modele armonice ale sarcinii, la $K_c = 1$ și $Q_c = 2,4MVar$.

Analizând cele prezentate în fig. 4.35 și fig. 4.36 se deduc următoarele observații:

- coeficientul de transfer al curentului armonic spre sistem prezintă variații diferite în funcție de modelul armonic al consumatorului liniar: pentru modelele 1 și 2 are o variație crescătoare, mai puțin pronunțată, cu creșterea rangul subarmonicii (în cazul modelului 1 la subarmonica 1/20 are valoarea 0,98, iar pentru subarmonica 2/3 are valoarea 0,984, în cazul modelului 2 are valoarea 0,9792 pentru subarmonica 1/20 și 0,9797 pentru subarmonica 2/3); pentru modelele 3, 4, 5 și 6 coeficientul prezintă valori maxime la rezonanța paralel și valori minime pentru rezonanța serie. În cazul modelului 3 coeficientul α_{I_S} are o valoare maximă de 0,989 pe subarmonica 2/13 și o valoare minimă de 0,97 la subarmonica 1/4; pentru modelul 4 la subarmonica 2/7 are valoarea maximă de 1,017 și valoarea minimă de 0,9266 la subarmonica 1/2; la modelul 5 pe subarmonica 2/7 are valoarea maximă de 1,017 și valoarea minimă 0,9245 la subarmonica 2/5; la modelul 6 pe subarmonica 2/11 coeficientul α_{I_S} are valoarea de 0,987 și la subarmonica 1/2 are valoarea minimă de 0,963. Coeficientul de transfer al curentului spre sistem α_{I_S} are valorile cuprinse în intervalul (0,924 – 1,017), prin urmare regimul deformant produs de consumatorul neliniar în domeniul subsincron este refulat în sistem sub formă de subarmonici de curent.
- variația coeficientului de transfer α_{IC1} al curentului subarmonic la bornele consumatorului liniar este influențată de modelul armonic al acestuia. Amplificări mai mari ale curentului subarmonic propagat la bornele consumatorului liniar apar pentru modelele 4 și 5. Valorile coeficientului este de 0,957 pe subarmonica 1/3 pentru modelul 5 și 0,0929 pe subarmonica 2/5 pentru modelul 4. Pentru celelalte modele armonice ale consumatorului liniar coeficientul α_{IC1} are valori mai mici de 0,03. Prin urmare, se poate spune că nu apar amplificări semnificative ale subarmonicilor de curent propagate la bornele consumatorului liniar.
- variația coeficientului de amplificare a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare serie depinde de modelul armonic al consumatorului liniar. Pentru modelul armonic 5 apare rezonanță pe subarmonica 1/3 și tensiunea la bornele bateriei de condensatoare pe această subarmonică este amplificată de 2,706 ori, pentru modelul de tip CIGRE la aceeași frecvență de rezonanță subarmonică tensiunea la bornele bateriei este amplificată de 2,283 ori. În cazul modelelor armonice 1 și 2 (rezistiv și Pesonen) pentru consumatorul liniar coeficientul de amplificare a tensiunii la bornele bateriei are o variație pronunțat descrescătoare: la subarmonica 1/20 pentru modelul 1 coeficientul $\beta_{U_{comp}}$ are valoarea 0,735 și pentru modelul 2 valoarea 0,839; la subarmonica 1/3 valoarea coeficientului $\beta_{U_{comp}}$ pentru modelul 1 este 0,143, iar pentru modelul 2 este 0,0747; la subarmonica 2/3 valorile coeficientului $\beta_{U_{comp}}$ sunt mult reduse pentru modelul 1 este 0,084, iar pentru modelul 2 este 0,0568. Pentru modelul armonic de tip R/L rezonanța apare pe subarmonica de rang 2/13 și valoarea coeficientului $\beta_{U_{comp}}$ este 2,195, în timp ce pentru modelul de tip MOTOR rezonanța apare la subarmonica 1/5 și valoarea lui $\beta_{U_{comp}}$ este 1,356. Din cele prezentate rezultă că în regim subsincron tensiunea la bornele bateriei de condensatoare poate atinge valori periculoase pentru izolația acesteia.
- variația coeficientului de transfer a tensiunii la bornele consumatorului liniar este sensibil influențată de modelul armonic al consumatorului liniar. Pentru modelul de sarcină de tip rezistiv coeficientul de transfer β_{UC1} prezintă o variație crescătoare cu creșterea rangului subarmonicii: la subarmonica 1/20 are valoarea 0,646; la 1/3 are valoarea 0,944, iar la 2/3 are valoarea 0,978 și tinde către 1, adică tensiunea de la bornele consumatorului deformant este aplicată consumatorului liniar. În cazul modelului de tip Pesonen, coeficientului de transfer β_{UC1} are o variație pronunțat descrescătoare cu creșterea rangului subarmonicii și tinde către valoare 1. La subarmonica 1/20 valoarea coeficientului β_{UC1} este de 1,657, iar

la 2/3 are valoarea 1,037. Pentru modelele armonice ale consumatorului liniar 3, 4, 5, 6 coeficientul de transfer a tensiunii la bornele consumatorului liniar prezintă valori maxime la rezonanța subarmonică, astfel: la modelul 3 pe subarmonica 2/11 valoarea coeficientului de transfer este de 1,945; pentru modelul 4 la subarmonica 2/5 are valoarea 1,871; pentru modelul 5 la subarmonica 1/3 are valoarea 2,11, iar pentru modelul 6 la subarmonica 2/7 are valoarea 1,36. Deci, în funcție de modelul armonic al consumatorului liniar, regimul deformant produs de consumatorul neliniar în domeniul subsincron este amplificat și refulat spre consumatorul liniar sub forma de subarmonici de tensiune.

4.6.3 Studiu de caz privind influența compensării serie și paralel asupra propagării poluării armonice în rețele electrice cu mai surse de poluare

În condițiile unei rețele electrice complexe cu sarcini neliniare distribuite pentru calculul curenților și tensiunilor armonice se utilizează metoda tensiunilor în noduri. Pentru o situație concretă, se consideră rețeaua de distribuție din figura 3.37, ce funcționează în regim simetric și echilibrat, unde la barele de MT ale stație sunt racordate: o linie electrică aeriană prevăzută cu compensare capacitivă serie ce alimentează trei posturi de transformare, o baterie de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere, patru linii în cablu și o linie electrică aeriană ce alimentează consumatori liniari și un consumator deformant CD1. Cele trei posturi de transformare alimentează atât consumatori liniari cât și neliniari. Consumatorii deformanți sunt considerați surse de armonici de curent constant $J_k = ct$. Rețeaua funcționând în regim simetric și echilibrat, elementele acesteia se vor reprezenta în schema echivalentă armonică prin impedanțele și/sau admitanțele armonice de secvență directă. Pentru simplificare nu s-a notat indicele ce desemnează rangul armonicii, iar acesta s-a considerat că este diferit de multiplu de 3, adică $k \neq 3p$, ($p=1, 2, \dots$). Caracteristicile tehnice ale elementelor de rețea sunt date în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3.

Element	Caracteristici tehnice	Modelare armonică
Sistemul	$S_{sc} = 800MVA$, $U_n = 110kV$	- prin reactanța armonică calculată cu relația (4.7)
Trafo	$S_n = 25MVA$, $U_{ni} = 110kV$, $U_{nj} = 22kV$, $p_{scn} = 130kW$, $p_{gn} = 30kW$, $u_{scn} = 11\%$, $i_{gn} = 1\%$	- printr-o impedanță armonică, relația (4.14).
T1 și T3	$S_n = 1MVA$, $U_{ni} = 20kV$, $U_{nj} = 0,4kV$, $p_{scn} = 10kW$, $p_{gn} = 1,7kW$, $u_{scn} = 6\%$, $i_{gn} = 1,4\%$	
T2	$S_n = 1,6MVA$, $U_{ni} = 20kV$, $U_{nj} = 0,4kV$, $p_{scn} = 14,9kW$, $p_{gn} = 2,2kW$, $u_{scn} = 6\%$, $i_{gn} = 1,3\%$	
LEA L1	$l = 10km$, $S_{Al-Ol} = 95mm^2$	Schema echivalentă armonică în „ π ”, impedanța respectiv admitanța armonică se calculează cu relațiile (4.17), (4.18). - rezistența cu relațiile (4.26), (4.27) - reactanța cu relația (4.28)
L2	$l = 10km$, $S_{Al-Ol} = 95mm^2$	
L3	$l = 16km$, $S_{Al-Ol} = 95mm^2$	
LEA 2	$l = 10km$, $S_{Al-Ol} = 70mm^2$ - alimentează C4	
LES L5	$l = 12km$, A2YSY 12/20kV $S_{Al-Ol} = 95mm^2$ - alimentează C5	Schema echivalentă armonică în „ π ”, impedanța respectiv admitanța armonică se calculează cu relațiile (4.17), (4.18). $R_k = R_1 \cdot \sqrt{k} + \Delta R_k$ X_k și B_k cu relațiile (4.42), (4.31)
LES L6	$l = 15km$, A2YSY 12/20kV, $S_{Al-Ol} = 95mm^2$ - alimentează C6	

Tabelul 4.3. (continuare)

Element	Caracteristici tehnice	Modelare armonică
CL1	$S = 0,7MVA, \cos \varphi = 0,852$	Modelul Pesonen – tabelul 4.1
CL2	$S = 1,177MVA, \cos \varphi = 0,85$	
CL3	$S = 0,782MVA, \cos \varphi = 0,895$	
C4	$S = 2,193MVA, \cos \varphi = 0,912$	Modelul CIGRE – tabelul 4.1
C5	$S = 2,154MVA, \cos \varphi = 0,92$	Modelul rezistiv – tabelul 4.1
C6	$S = 2,154MVA, \cos \varphi = 0,92$	
Qc	$Q_c = 2.4MVar, U_n = 20kV$	$\underline{Y}_{bat} = j\omega kC$

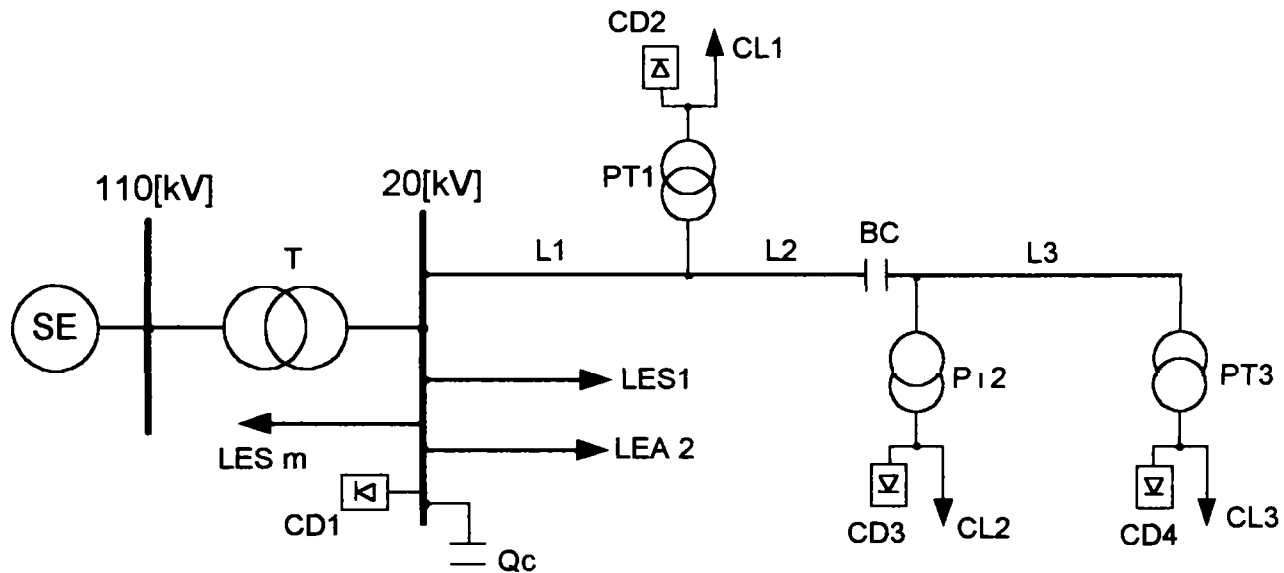


Fig.3.37 Rețea electrică de distribuție

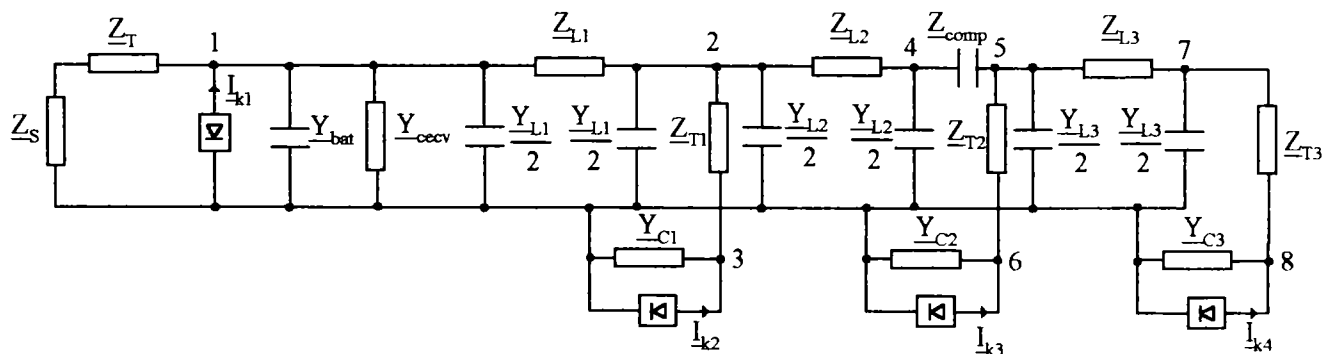


Fig. 3.38 Schema electrică echivalentă a rețelei din figura 3.37.

Matricea de admitanță nodală pentru rețeaua din figura 3.38 este:

$$[Y_k] = \begin{bmatrix}
 \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} & \underline{Y}_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \underline{Y}_{42} & 0 & \underline{Y}_{44} & \underline{Y}_{45} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{54} & \underline{Y}_{55} & \underline{Y}_{56} & \underline{Y}_{57} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{65} & \underline{Y}_{66} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{75} & 0 & \underline{Y}_{77} & \underline{Y}_{78} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{87} & \underline{Y}_{88}
 \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Elementele matricei de admitanță sunt:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \frac{1}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_T} + \underline{Y}_{bat} + \underline{Y}_{cecv} + \frac{\underline{Y}_{L1}}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{L1}}, \quad \underline{Y}_{12} = -\frac{1}{\underline{Z}_{L1}}, \\ \underline{Y}_{22} &= \frac{1}{\underline{Z}_{T1}} + \frac{\underline{Y}_{L2}}{2} + \frac{\underline{Y}_{L1}}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L2}}, \quad \underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{12}, \quad \underline{Y}_{23} = -\frac{1}{\underline{Z}_{T1}}, \quad \underline{Y}_{24} = -\frac{1}{\underline{Z}_{L2}}, \\ \underline{Y}_{33} &= \underline{Y}_{C1} + \frac{1}{\underline{Z}_{T1}}, \quad \underline{Y}_{32} = \underline{Y}_{23}, \quad \underline{Y}_{44} = \frac{1}{\underline{Z}_{L2}} + \frac{\underline{Y}_{L2}}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{comp}}, \quad \underline{Y}_{45} = -\frac{1}{\underline{Z}_{comp}}, \\ \underline{Y}_{42} &= \underline{Y}_{24}, \quad \underline{Y}_{55} = \frac{1}{\underline{Z}_{T2}} + \frac{\underline{Y}_{L3}}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{comp}} + \frac{1}{\underline{Z}_{L3}}, \quad \underline{Y}_{56} = -\frac{1}{\underline{Z}_{T2}}, \quad \underline{Y}_{57} = -\frac{1}{\underline{Z}_{L3}}, \\ \underline{Y}_{66} &= \underline{Y}_{C2} + \frac{1}{\underline{Z}_{T2}}, \quad \underline{Y}_{65} = \underline{Y}_{56}, \quad \underline{Y}_{77} = \frac{1}{\underline{Z}_{T3}} + \frac{\underline{Y}_{L3}}{2} + \frac{1}{\underline{Z}_{L3}}, \quad \underline{Y}_{75} = \underline{Y}_{57}, \\ \underline{Y}_{78} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{T3}}, \quad \underline{Y}_{88} = \underline{Y}_{C3} + \frac{1}{\underline{Z}_{T3}} \end{aligned}$$

Considerând consumatorul deformant ca sursă de armonici de curent de valoare $1A$ pe fiecare armonică cu relația (4.67) s-au determinat tensiunile în nodurile rețelei.

Scopul acestui studiu este de a arăta cum influențează număr și locul de amplasare al consumatorilor deformanți tensiunilor armonice în nodurile rețelei compensate și efectul acestora asupra instalațiilor de compensare. În acest scop sunt prezentate două cazuri: a) sursele de poluare se găsesc în fiecare post de transformare și pe bara stației, b) sursele de poluare se găsesc în PT1 și PT2.

Pentru cazul în care consumatorii deformanți sunt distribuiți în nodurile de consum (cazul a)), în figura 4.39 este reprezentată variația impedanței armonice văzută din nodurile rețelei, iar în figurile 4.40 și 4.41 s-au reprezentat variațiile tensiunilor armonice în nodurile rețelei, raportate la tensiunea nominală.

În figura 4.42 este reprezentată variația curentului armonic prin bateria de condensatoare derivație în funcție de rangul armonicii.

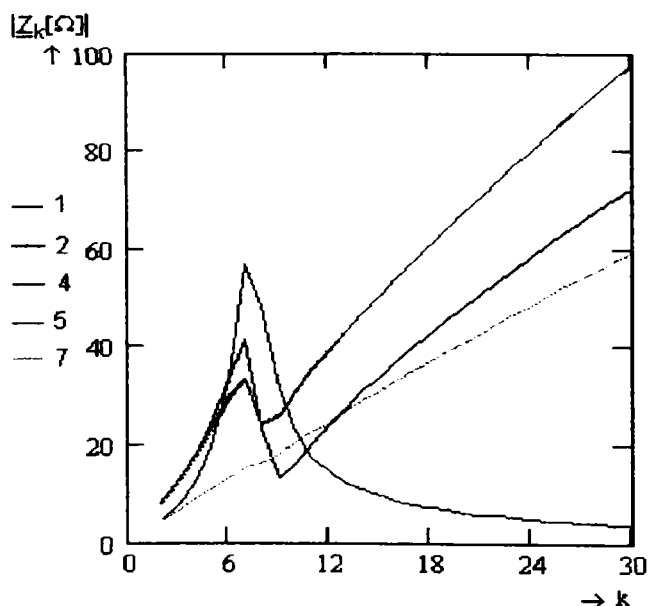


Fig.4.39. Variația impedanței armonice a rețelei văzută din nodurile acesteia

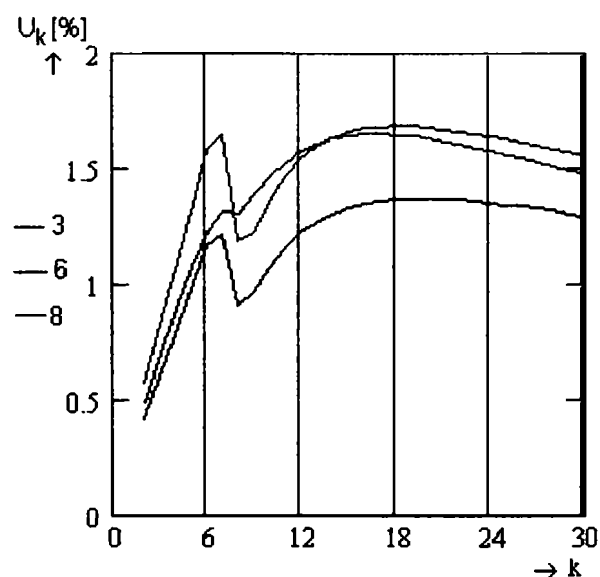


Fig. 4.40. Variația tensiunilor armonice la bornele consumatorilor liniari CL2, CL3 și CL4, raportate la tensiunea nominală.

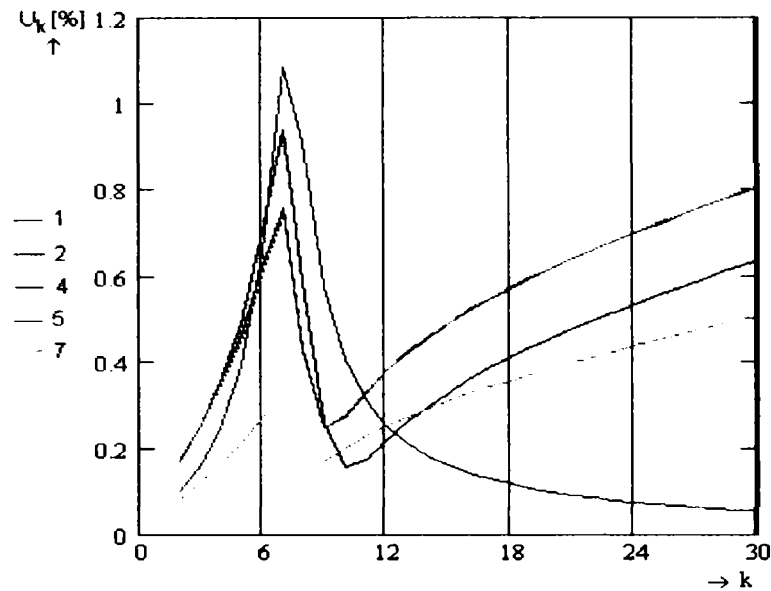


Fig.4.41. Variația tensiunilor armonice în nodurile rețelei, raportate la tensiunile nominale.

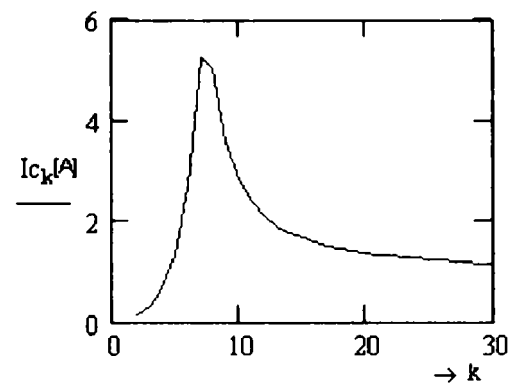


Fig.4.42. Variația curentul armonic prin bateria de condensatoare derivație

Analizând cele prezentate în figurile 4.39÷ 4.42, se constată următoarele:

- pe armonica de rang 7 apare rezonanța paralel și tensiunea armonică în nodul 1 are valoarea de 1,087% din tensiunea nominală. Tensiunile armonice în celelalte noduri sunt mai mici: pentru nodul 2 tensiunea are valoarea de 0,94% din tensiunea nominală, iar pentru nodul 7 are valoarea cea mai mică de 0,307%.
- tensiunile armonice la bornele consumatorilor liniari alimentați din aceleași posturi de transformare ca și consumatorii neliniari sunt mai mari decât tensiunile în celelalte noduri ale rețelei.
- căderea de tensiune pe bateria de condensatoare serie determinată de circulație curenților armonici este mică, de 0,01419% din tensiunea nominală a rețelei.
- curentul armonic prin bateria de condensatoare derivație are valoare de 5,27A, în condițiile în care sursele de poluare s-au presupus că injectează curenți de 1A pe fiecare armonică.

Pentru cazul b) în figurile 4.43 și 4.44 sunt reprezentate variațiile tensiunilor armonice în nodurile rețelei, raportate la tensiunea nominală și variația curentului armonic prin bateria de condensatoare în funcție de rangul armonicii.

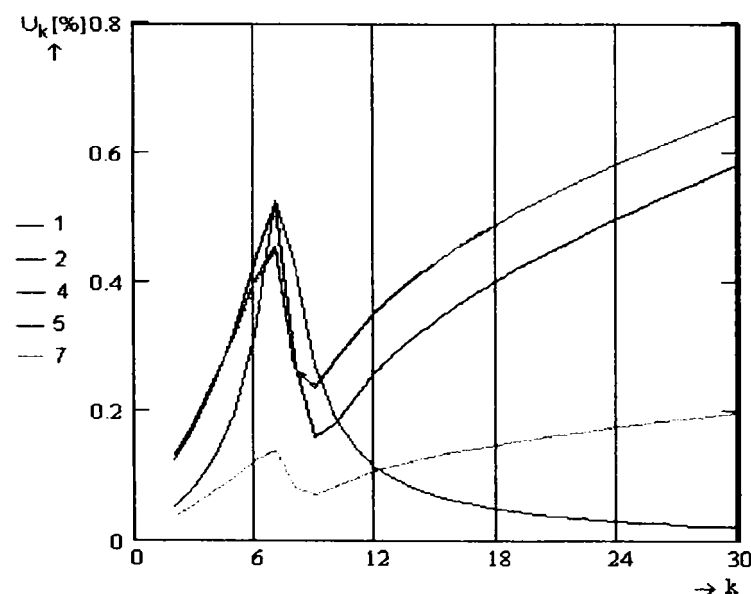


Fig.4.43. Variația tensiunilor armonice în nodurile rețelei, raportate la tensiunile nominale.

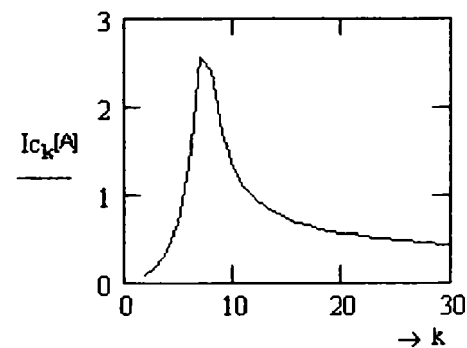


Fig.4.44. Variația curentul armonic prin bateria de condensatoare derivație

Din analiza comparativă a celor prezentate în figurile 4.41 și 4.43 se constată că valorile tensiunilor armonice în nodurile rețelei sunt mult mai mici în cazul b) decât în cazul a). De asemenea, se observă că frecvența la care apare rezonanța paralel este aceeași în ambele cazuri. În ceea ce privește valoarea curentului armonic prin bateria de condensatoare derivație aceasta este de două ori mai mare în cazul a) decât în cazul b), deci bateria de condensatoare derivație este mult mai sollicitată în cazul a).

În urma acestui studiu se poate menționa că, valorile tensiunilor armonice în nodurile rețelei și a curentului prin bateria de condensatoare derivație cresc pe măsură ce sursa de poluare se apropie de bara stației. De asemenea, ele cresc odată cu creșterea numărului surselor de poluare.

4.7. Concluzii

Scopul acestui capitol este de a evidenția problemele specifice pe care le prezintă fenomenul de propagare a poluării armonice în rețelele de distribuție prevăzute cu compensare capacitivă serie și paralel.

La începutul capitolului au fost trecute în revistă problemele generale ale regimului deformant, efectele negative ale acestui regim asupra funcționării elementelor de rețea, indicatorii regimului nesinusoidal.

Studiul propagării poluării armonice constă de fapt în calculul circulației curenților și tensiunilor armonice în nodurile rețelele electrice pe baza cărora se determină impedanța armonică a rețelei și coeficienții de transfer. În acest scop s-au prezentat două metode calcul: metoda scanării frecvenței și metoda tensiunilor în noduri.

Metoda scanării frecvenței s-a folosit pentru a evidenția efectul compensării capacitive serie asupra fenomenului de propagare a poluării armonice, considerând consumatorul deformant ca sursă de tensiune constantă în domeniul suprasincron cât și în cel subsincron.

În acest scop s-au analizat două situații: una în care sursa de poluare armonică este racordată la linia prevăzută cu compensare capacitivă serie, iar în cea de a doua, sursa de poluare armonică racordată la barele stației de distribuție. Au fost determinate expresiile impedanțelor armonice și ale coeficienților de transfer ai tensiunilor și curenților armonici, analizându-se efectul poluării armonice produsă de consumatorul neliniar asupra instalațiilor de compensare, a consumatorului liniar cât și asupra sistemului. De asemenea, s-a analizat influența instalațiilor de compensare capacitivă și a modului de reprezentare a consumatorului liniar asupra legii de variație și a valorilor impedanțelor armonice și ale coeficienților de transfer.

În cazul în care sursa de poluare este racordată la linia prevăzută cu compensare capacitivă serie se constată că:

> *în domeniul suprasincron:*

- valoarea impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului neliniar depinde de parametrii rețelei, sistemului, ai consumatorului liniar și ai bateriei de condensatoare derivație.
- bateria de condensatoare serie influențează nesemnificativ valoarea impedanței armonice și anume: impedanța armonică scade cu creșterea gradului de compensare al liniei, aceasta poate fi sesizată doar pentru armonici de rang $k < 10$;
- compensarea capacitivă serie nu influențează fenomenul de propagare armonică: nu modifică rangul armonicilor pentru care apar amplificări semnificative ale curenților și tensiunilor armonice în nodurile rețelei, iar valorile coeficienților de transfer cresc foarte puțin cu gradul de compensare al liniei K_c , doar pentru armonici de rang $k < 10$;
- prezența bateriei de condensatoare derivație modifică atât forma de variație a impedanței armonice și a coeficienților de transfer, cât și valorile acestora;

- domeniul frecvențelor de rezonanță depinde de puterea bateriei de condensatoare derivație: cu cât puterea baterie de condensatoare derivație este mai mare cu atât fenomenul de rezonanță apare la frecvențe mai mici. Pentru $Q_c=2,4MVar$ frecvențele de rezonanță sunt în domeniul $350\div 400Hz$, în timp ce pentru $Q_c=0,6MVar$ sunt în domeniul $450\div 650Hz$;
- forma de variație a impedanței armonice se modifică în funcție de modelul armonic adoptat pentru consumatorul liniar pentru armonici de rang $k>8$;
- modelul armonic adoptat pentru consumatorul liniar, la o anumită valoare a puterii bateriei de condensatoare derivație, influențează valorile coeficienților de transfer și ale impedanței armonice. Modelul 6 conduce la cele mai mari valori ale impedanței armonice și ale coeficienților de transfer a curentului la bornele bateriei de condensatoare derivație, respectiv la bornele sistemului, iar modelul 4 (CIGRE) la cele mai mici valori.
- bateria de condensatoare derivație este suprasolicitată cu tensiunii armonice și curenți armonici, care depind de modelul adoptat pentru consumatorul liniar și de puterea baterie de condensatoare. Pentru $Q_c=2,4MVar$, coeficientul de amplificare a tensiunii la bornele bateriei este de 62% la armonica de rang 8 și curentul armonic prin baterie la frecvența de rezonanță de $350Hz$ este amplificat de 1,842 ori (pentru modelul 6);
- bateria de condensatoare serie pentru armonici inferioare $k<10$ poate fi solicitată cu tensiuni armonice în funcție de gradul de compensare al linie K_c . Coeficientul de transfer a tensiunii armonice la bornele baterie de condensatoare serie scade cu creșterea rangului armonicii și crește cu gradul de compensare K_c (valoarea maximă $\beta_{U_{comp}}=20,467\%$ pentru armonica $k=2$);
- coeficientul de amplificare a curentului armonic absorbit de consumatorul liniar este sensibil influențat de modelul armonic adoptat, puterea bateriei de condensatoare derivație și crește cu creșterea rangului armonicii. În domeniul de frecvențe $400\div 800Hz$, în funcție modelul armonic adoptat pentru consumatorul liniar și de puterea baterie de condensatoare, coeficientul de amplificare are o valoare minimă și apoi continuă să crească cu rangul armonicii;
 - > în domeniul subsincron:
- bateria de condensatoare serie are o influență semnificativă asupra impedanței armonice și a coeficienților de transfer;
- bateria de condensatoare serie este suprasolicitată cu tensiuni la borne, care la frecvența de rezonanță subsincronă, în funcție de gradul de compensare al reactanței linie, pot fi amplificate de 1,37 ori (pentru $K_c=1$ și frecvența de rezonanță de $33,3Hz$). De remarcat faptul că, trebuie evitat ca bateriei de condensatoare serie să funcționeze în domeniul subsincron, deoarece chiar pentru grade de compensare mici, amplificarea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare este periculoasă pentru izolația acesteia.
- bateria de condensatoare influențează foarte puțin valoarea coeficientului de transfer a curentului armonic la bornele baterie de condensatoare derivație, iar valoarea acestuia crește cu rangul subarmonicii, însă nu depășește valoarea de 1,6%. Tensiunea la bornele baterie de condensatoare derivație depinde de gradul de compensare al linie și crește odată cu creșterea rangului subarmonicii (valoarea maximă este de 30,78% pentru frecvența de $45 Hz$ și $K_c=1$). Rezultă că bateria de condensatoare derivație poate fi supusă unor supratensiuni care să solicite izolația acesteia.
- coeficientul de transfer a curentului armonic la bornele sistemului α_{I_s} și ale consumatorului liniar α_{IC1} depind atât de gradul de compensare al linie, cât și de modelul armonic adoptat pentru acesta.
- frecvențele de rezonanță subsincronă și valorile maxime coeficienților α_{I_s} și α_{IC1} corespunzătoare acestor frecvențe cresc odată cu creșterea gradul de compensare al linie

pentru modelele armonice 4, 5 și 6. Pentru modelul 3 frecvențele de rezonanță armonică cresc cu gradul de compensare, în timp ce valorile maxime ale coeficientului α_{IC1} și α_{Is} corespunzătoare acestor frecvențe cresc până la $Kc=0,4$, respectiv $Kc=0,5$ și apoi scad cu creșterea rangului subarmonic. Pentru modelul armonic 5 se obțin cele mai mari valori pentru coeficienții $\alpha_{Is}=2,089$ și $\alpha_{IC1}=2,467$, la frecvența $50/3Hz$ și $Kc=1$. Coeficienții de transfer α_{Is} și α_{IC1} prezintă o variație pronunțat descrescătoare odată cu creșterea rangului subarmonic pentru modelele 1 și 2.

Referitor la impedanța armonică a rețelei și respectiv la coeficienții de transfer ai tensiunilor și curenților armonic în cazul în care sursa de poluare armonică este racordată la barele de MT ale stației de distribuție se constată:

> *în domeniul suprasincron:*

- valoarea impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului neliniar crește puțin cu micșorarea puterii baterie de condensatoare derivație, în timp ce frecvențele de rezonanță scad cu creșterea puterii bateriei.
- bateria de condensatoare serie modifică în limite reduse valorile impedanței armonice și a coeficienților de transfer;
- coeficientul de transfer al curentului la barele sistemului are valori mult mai mari decât în cazul precedent: pentru $Qc=2,4MVar$ la frecvența de $350Hz$ curentul la barele sistemului este amplificat de 2,422 ori (pentru modelul 6). Valorile coeficientului scad α_{Is} și frecvențele de rezonanță cresc odată cu micșorarea puterii baterie de condensatoare derivație. Modelul armonic al consumatorului influențează doar valorile coeficientului α_{Is} , frecvența de rezonanță, pentru o valoare a puterii bateriei de condensatoare derivație, nu se modifică în funcție de modelul adoptat;
- bateria de condensatoare derivație este mai solicitată în acest caz decât în cazul precedent, coeficientul de amplificare al curentului armonic prin bateria de condensatoare este 1,944 pentru $Qc=2,4MVar$ la frecvența de $350Hz$ și modelul armonic 6 pentru consumator. Valorile coeficientului transfer al curentului scad și frecvențele de rezonanță cresc cu micșorarea puterii baterie de condensatoare derivație. Pentru o anumită putere a baterie de condensatoare modelul armonic 3 conduce la valoarea cea mai mică pentru coeficientul de transfer;
- consumatorul liniar este sensibil afectat de prezența consumatorului deformant. În funcție de modelul armonic al consumatorului tensiunea armonică la bornele acestuia este amplificată. Cazul cel mai defavorabil este pentru modelul 3 când coeficientul de amplificare al tensiunii la bornele consumatorului liniar crește cu rangul armonic, (pentru armonica 7 tensiunea armonică este amplificată de 1,49 ori), iar curentul este amplificat cu 23,4%;
- coeficientul de amplificare a tensiunii la bornele baterie de condensatoare serie crește cu odată cu creșterea gradului de compensare și scade cu creșterea rangului armonic, valoarea maximă a acestuia de 1,5% se obține pentru $Kc=1$ și $k=2$;

> *în domeniul subsincron:*

- amplificarea curentului armonic la bornele consumatorului liniar este sub 10% și depinde de modelul armonic al consumatorului, pentru modelele 1 și 2 variația coeficientului de transfer α_{IC1} este liniară și are valori sub 1,6%, cea mai mare valoare are coeficientul $\alpha_{IC1}=0,096$ pentru modelul 5 la frecvența de $50/3Hz$. Frecvențele de rezonanță subsincronă scad cu scăderea gradului de compensare al liniei;
- variația coeficientului de transfer a tensiunii armonice la bornele consumatorului liniar și valoare acestuia sunt sensibil influențate de gradul de compensare și de modelul armonic al consumatorului. Cea mai mare valoare a coeficientului de transfer $\beta_{UC1}=2,13$ se obține la frecvența rezonanță subsincronă de $20Hz$ pentru modelul 5.

- coeficientul de amplificare a tensiunii armonice la bornele baterie de condensatoare serie depinde atât de gradul de compensare al linie cât și de modelul armonic al consumatorului. Pentru modelul armonic 5, la frecvența de $50/3\text{Hz}$ și $K_c = 1$, tensiunea la bornele baterie este amplificată de 2,71 ori. Cel mai bine se comportă modelele armonice 1 și 2 pentru care coeficientul de amplificare este $< 0,85$ și scade cu creșterea rangului armonicii.
- coeficientul de transfer a curentului la barele sistemului are valori cuprinse în intervalul $0,96 \div 0,988$ pentru modele armonice 1, 2, 3 și 6 ale consumatorului liniar. Pentru modelele 4 și 5 la frecvența de rezonanță $100/7\text{Hz}$ și $K_c = 1$, curentul la barele sistemului este amplificat de 1,0171 ori. Coeficientul de transfer a tensiunea armonice la barele sistemului depinde doar de impedanța transformatorului și a sistemului și are valoarea maximă de 22,1%.
- bateria de condensatoare derivație nu este suprasolicitată, coeficientul de transfer al curentului armonic la bornele bateriei valori reduse (0,776% pentru $Q_c = 1,2\text{MVAR}$ și 1,56% pentru $Q_c = 2,4\text{MVAR}$).

Metoda tensiunilor în noduri s-a folosit pentru calculul curenților și tensiunilor armonice în rețele cu mai multe surse de poluare armonică. În acest caz, consumatorii deformanți au considerați ca surse de curenți armonici constanți. Referitor la impedanțele armonice și tensiunile armonice în nodurile rețelei s-a constatat următoarele:

- elementele diagonale ale inversei matricei admitanțelor reprezintă impedanțele armonice văzute din nodurile rețelei;
- tensiunile armonice în nodurile rețelei depind de locul unde apare neliniaritatea, dacă consumatorul deformat este racordat la bara de MT a stației, tensiunile în nodurile rețelei au valori mai mari decât în cazul în care consumatorul neliniar este alimentat de un post de transformare.
- valorile tensiunilor armonice în noduri cresc dacă numărul consumatorilor deformanți crește;
- tensiunea armonică la bornele baterie de condensatoare serie crește cu 1,42% pentru $K_c = 1$, iar pentru $K_c < 1$ această majorare este mult mai redusă;
- bateria de condensatoare derivație este puternic solicitată de curenți armonici, care la frecvența de rezonanță de 350Hz sunt amplificați de 5,27 ori. Valoarea coeficientului de amplificare și frecvențele de rezonanță depind de locul în care apare neliniaritatea și de puterea baterie de condensatoare derivație.

Contribuțiile aduse în acest capitol se referă la:

- sistematizarea problemelor teoretice privind modelarea armonică a elementelor de rețea și calculul circulației de curenți și tensiuni armonice în rețelele prevăzute cu compensare capacitivă serie și paralel;
- stabilirea expresiilor coeficienților de transfer și a impedanței armonice pentru o rețea în care sursa de poluare are locații diferite;
- evidențierea efectului compensării serie și paralel asupra valorii impedanței armonice și a coeficienților de transfer ai tensiunii și curentului în regim suprasincron, respectiv subsincron;
- efectuarea unor studii de caz pentru a evidenția influența schemei echivalente a consumatorului liniar, a gradului de compensare al reactanței linie și a puterii bateriei de condensatoare derivație asupra fenomenului de propagare a poluării armonice și subarmonice;
- prezentarea unei aplicații de calcul a circulației de curenți și tensiuni armonice când sursele de poluare sunt distribuite, evidențierea efectului acestora asupra bateriilor de condensatoare serie și derivație.

Capitolul 5

SUPRATENSIUNI INTERNE ÎN REȚELELE DE MEDIE TENSIUNE COMPENSATE LONGITUDINAL

În cadrul acestui capitol se realizează un studiu orientativ cu privire la două regimuri de funcționare însoțite de creșteri importante ale tensiunii, ținând seama de prezența instalației de compensare capacitivă serie, și anume scurtcircuitul simetric și punerea la pământ monofazată.

Supratensiunile care apar în rețelele de medie tensiune compensate depind de schema rețelei în momentul apariției lor, de valoarea tensiunii în rețea, de locul apariției defectului, de parametrii liniei, de gradul de compensare și locul de amplasare al bateriei.

În paragraful 5.2 se determină analitic supratensiunilor pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, când bateria de condensatoare este amplasată în stație, respectiv pe linie într-un post de transformare din rețeaua de medie tensiune. De asemenea se compara rezultatele obținute folosind modelele matematice stabilite cu cele rezultate folosind programul ATP.

În rețelele de medie tensiune există posibilitatea să se întâlnească diferite metode de tratare a neutrului rețelei, de aceea în paragraful 5.3 se studiază supratensiunile care apar la defecte monofazate în rețele cu neutrul izolat, respectiv tratat prin rezistor de limitare.

5.1. Modelarea elementelor de rețea pentru calculul supratensiunilor

Fenomenele tranzitorii din rețelele electrice sunt cauzate de manevre, defecte și lovituri de trăsnet. Domeniul de frecvență al acestor fenomene este larg de la 0,01 Hz până la zeci de MHz. În aceste condiții, pentru calculul supratensiunilor într-o rețea este necesară o reprezentare adecvată a elementelor acesteia, ținând seama de frecvența supratensiunilor.

Transformatorul electric este unul din elementele de rețea pentru care stabilirea unui model matematic, care să descrie cât mai precis fenomenele fizice, este foarte dificilă. Pentru o modelare cât mai precisă a comportării transformatorului trebuie să țină seama de saturația miezului, pierderile prin histerezis și curenți turbionari, care se reprezintă prin elemente neliniare dependente de frecvență, respectiv de existența capacităților între înfășurări și între înfășurări și pământ. Problema modelării transformatorului pentru calculul supratensiunilor, în general, de frecvențe mari, este pe larg tratată în literatură de specialitate [PH94], [PA95], [MM93], [CC01].

În ipoteza neglijării saturației miezului și a pierderilor care apar în procesul de magnetizare, ce determină o reducere a supratensiunilor, transformatorul se modelează pentru calculul supratensiunilor de frecvențe joase (supratensiuni temporare) printr-o schemă de calcul clasică [C30]. Astfel, transformatorul se reprezintă printr-o schemă în Γ , unde rezistența, inductivitatea de dispersie și de magnetizare sunt determinate din probele de scurtcircuit, respectiv de mers în gol, cu relațiile cunoscute [C6], [C37].

Pentru determinarea supratensiunilor din banda de frecvențe ridicate (supratensiuni de comutație), transformatorul se reprezintă printr-o schemă clasică la care se adaugă capacitățile față de pământ ale înfășurărilor și capacitățile între înfășurări [C30], [C24]. Capacitățile transformatorului se determină experimental sau se calculează cu relații empirice [C22] :

$$C_{10} = 0,785 \cdot \frac{S_n^{0,35}}{U_{n1}^{0,175}} [nF / fază], \quad (5.1)$$

$$C_{20} = \frac{S_n^{0,5}}{0,024 \cdot U_{n2} + 0,361 + 0,153 \cdot S_n^{0,5}} [nF / fază], \quad (5.2)$$

$$C_{12} = \frac{31,6 \cdot S_n^{0,5}}{U_{n1}} [nF / fază], \quad (5.3)$$

unde: U_{n1} , U_{n2} – tensiunile nominale ale înfășurărilor transformatorului,

S_n – puterea nominală a transformatorului,

C_{10} , C_{20} – capacitățile față de pământ ale înfășurării primare, respectiv secundare,

C_{12} – capacitatea între înfășurările transformatorului.

Linia electrică aeriană de medie tensiune este, în general, de lungime redusă și poate fi reprezentată în calcul supratensiunilor printr-o schemă echivalentă cu parametri concentrați, dependenți de frecvență. Având în vedere faptul că, conductoarele liniei de medie tensiune au secțiuni mult mai mici decât la liniile de înaltă tensiune, valoarea rezistenței liniei este comparabilă cu cea a reactanței și nu se va neglija în calcul supratensiunilor.

O altă particularitate a liniei electrice de medie tensiune este inegalitatea capacităților față de pământ ale fazelor, ceea ce determină un grad de nesimetrie al rețelei, care depinde de configurația liniei. În lucrare pentru determinarea supratensiunilor s-a considerat linia cu parametri egali pe faze, realizată pe stâlpi SE cu coronament în triunghi pentru care gradul de nesimetrie este redus, de valoare 0,005 [C22].

Trecerea dintr-un regim de funcționare staționar în altul a sistemului electroenergetic se realizează printr-un proces tranzitoriu descris de ecuații integro-diferențiale. În literatură [C11] sunt prezentate mai multe metode de rezolvare pe cale analitică, numerică, grafo-analitică, analogică a sistemelor de ecuații integro-diferențiale. De precizat că, analiza fenomenelor tranzitorii se poate face în domeniul timp sau în domeniul frecvenței, folosindu-se pentru rezolvarea modelului de calcul a supratensiunilor una dintre următoarele metode: metoda transformatei Fourier, metoda transformatei Laplace, metoda diferențelor finite sau metoda undelor mobile [C14]. Dintre aceste metode, în lucrare s-a folosit pentru calculul supratensiunilor metoda transformatei Laplace. Această metoda permite introducerea condițiilor inițiale în formularea modelului matematic. Dezavantajul utilizării ei este că în cazul unor scheme complexe există dificultăți în ceea ce privește transformarea inversă în domeniul timp.

Acest inconvenient poate fi înlăturat folosind metode de integrare numerică pentru rezolvarea sistemelor de ecuații integro-diferențiale, care descriu fenomene tranzitorii complexe. Dintre metodele de integrare numerică a ecuațiilor diferențiale, metoda trapezelor este pe larg folosită în rezolvarea problemelor asociate elementelor cu parametri concentrați, fiind simplă și convergentă din punct de vedere numeric [C14].

Metoda de integrare a ecuațiilor diferențiale cu formula trapezelor este folosită și în programele de calcul a supratensiunilor ATP-EMTP. Aceste programe permit abordare unor scheme relativ complexe și o determinare a supratensiunilor mult mai comodă, conducând la rezultate satisfăcătoare.

5.2. Supratensiuni pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric

Este cunoscut faptul că prin compensarea capacitivă longitudinală se micșorează reactanța liniei respectiv a transformatorului. La un scurtcircuit imediat după bateria de condensatoare, curentul de scurtcircuit este limitat de rezistența și o parte din reactanța circuitului din amonte de locul de defect, în funcție de gradul de compensare și locul de amplasare a instalației de compensare. Bateria de condensatoare este parcursă la un

scurtcircuit trifazat de un curent de defect mare, iar valoarea supratensiunii la bornele bateriei este proporțională cu acesta.

Analiza supratensiunilor care apar pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, prezintă un interes deosebit, având în vedere faptul că au valori semnificative și reprezintă unul din criteriile principale de alegere al echipamentelor de protecție al bateriei.

În acest paragraf se determină supratensiunile care apar la bornele bateriei de condensatoare la un scurtcircuit simetric când bateria este amplasată în stație, la începutul liniei, respectiv pe linie într-un post de transformare. De asemenea se analizează și influența inductivității sursei asupra valorilor maxime ale supratensiunii pe bateria de condensatoare.

5.2.1. Bateria de condensatoare amplasată în stația de transformare

În analiza supratensiunilor care apar la bornele bateriei de condensatoare s-a considerat o linie electrică de medie tensiune prevăzută cu compensare serie ce alimentează un consumator C (fig. 5.1)

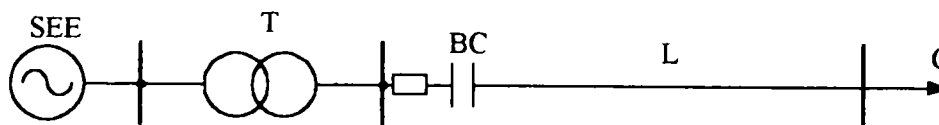


Fig.5.1. Rețea de medie tensiune

Ținând seama de cele menționate în § 5.1 în figura 5.2 este prezentată schema echivalentă de calcul a supratensiunilor la un scurtcircuit simetric imediat după bateria de condensatoare. Sursa s-a considerat de putere infinită ($L_S = 0$).

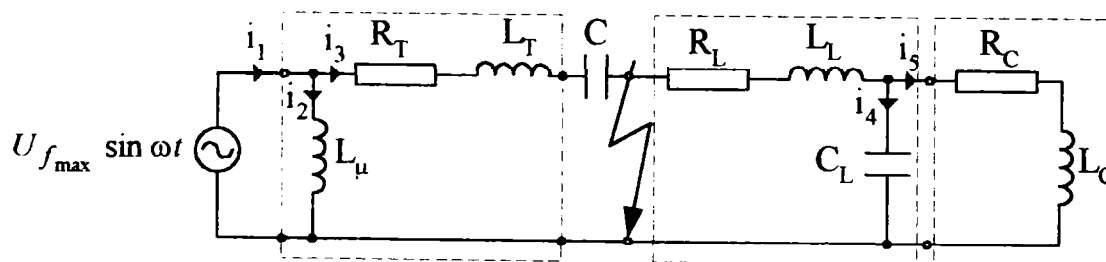


Fig.5.2 Schema echivalentă de calcul a supratensiunilor la scurtcircuit simetric

Sistemul de ecuații integro-diferențiale care descrie procesele ce au loc la un scurtcircuit simetric imediat după bateriei s-a obținut prin aplicarea celor două teoreme a lui Kirchhoff în schema din figura 5.2.

$$\begin{cases} U_{f_{\max}} \sin \omega t = R_T i_3(t) + L_T \frac{di_3(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_3(t) dt + u_C(0) \\ U_{f_{\max}} \sin \omega t = L_\mu \frac{di_2(t)}{dt} \\ \frac{1}{C} \int i_3(t) dt + u_C(0) = u_C(t) \\ i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) \end{cases} \quad (5.4)$$

Aplicând transformata Laplace sistemului de ecuații (5.4) și efectuând calculele necesare se obține expresia imaginii tensiunii la bornele bateriei de condensatoare:

$$U_C(s) = \frac{\omega \cdot U_{f_{\max}} \cdot \omega_0^2 + (s^2 + \omega^2) \cdot \left(s \cdot u_C(0) + 2\delta \cdot u_C(0) + \frac{i_3(0)}{C} \right)}{(s^2 + 2\delta \cdot s + \omega_0^2) \cdot (s^2 + \omega^2)} \quad (5.5)$$

în care: $U_{f_{\max}}$ este amplitudinea maximă a tensiunii sursei;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_T C}} - \text{pulsăția proprie a circuitului};$$

$$\delta = \frac{R_T}{2 \cdot L_T} - \text{coeficient de amortizare a componentei aperiodice};$$

$u_C(0), i_3(0)$ - condițiile inițiale.

s - variabila complexă

Funcția original corespunzătoare transformatei Laplace din relația (5.5) se obține aplicând prima formă a teoremei dezvoltării Heaviside, [C36]:

$$U_C(t) = \frac{U_{f \max}}{\omega^2 C^2 R_T^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2} \cdot \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \cdot \sin \omega t - \omega R_T C \cdot \cos \omega t \right] -$$

$$- \frac{U_{f \max} \cdot \omega \cdot e^{-\delta t}}{\omega^2 C^2 R_T^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2} \cdot \left[\frac{1}{\sigma} \cdot \left(\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) - \frac{2 \cdot \delta^2}{\omega_0^2} \right) \cdot \sin \sigma t - R_T C \cdot \cos \sigma t \right] + \quad (5.7)$$

$$+ \frac{\delta \cdot u_C(0) + \frac{1}{C} \cdot i_3(0)}{\sigma} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \sigma t + u_C(0) \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \sigma t$$

Analiza relației (5.7) pune în evidență faptul că supratensiunea la bornele bateriei de condensatoare în cazul unui scurtcircuit trifazat are o componentă permanentă de frecvență industrială, f , peste care se suprapune o componentă tranzitorie amortizată oscilând cu frecvența proprie a circuitului, $f_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi}$, tinzând spre zero după o funcție exponențială $e^{-\delta t}$.

În relația (5.7), dacă se neglijează pierderile în înfășurările transformatorului ($R_T = 0$), se constată că pentru un grad de compensare mic, atât timp cât $X_C < X_T$ tensiunea la bornele bateriei de condensatoare este mai mică decât tensiunea sursei. Pentru $X_C = X_T$, tensiunea pe bateria de condensatoare tinde spre infinit. În această situație pe bateria de condensatoare apare o supratensiune de valoare mare, ea fiind limitată de rezistența transformatorului. Dacă $X_C > X_T$, valoarea amplitudinii supratensiunii va scădea odată cu creșterea gradului de compensare, curentul prin circuit are un caracter capacitiv.

Pentru o evaluare cantitativă a supratensiunilor care apar la bornele bateriei de condensatoare s-a considerat o rețea electrică reprezentată prin schema simplificată din figura 5.1, având următoarele caracteristici: sistemul este de putere infinită ($L_S = 0$); linia electrică aeriană de 20kV are lungimea de 15km și secțiunea conductoarelor AL-OI de 70mm², consumatorul absoarbe o putere $S_C = 3MVA$ la $\cos \varphi = 0,9$. Transformatorul din stație prezintă următoarele caracteristici: $S_n = 10MVA$, $U_{ni.t.}/U_{nj.t.} = 110kV/22kV$, $\Delta p_{scn} = 69 kW$, $u_{scn} = 11\%$, $\Delta p_{gn} = 19 kW$, $i_{gn} = 1,1$, $\text{lim. reglare} = \pm 9 \times 1,78$. Supratensiunile pe bateria de condensatoare s-au calculat pe baza modelului matematic prezentat în acest paragraf. Astfel, la un grad de compensare a reactanței liniei $K_C = 0,7$ valoarea maximă a amplitudinii supratensiunii pe bateria de condensatoare este de 64,7554kV (fig. 5.3).

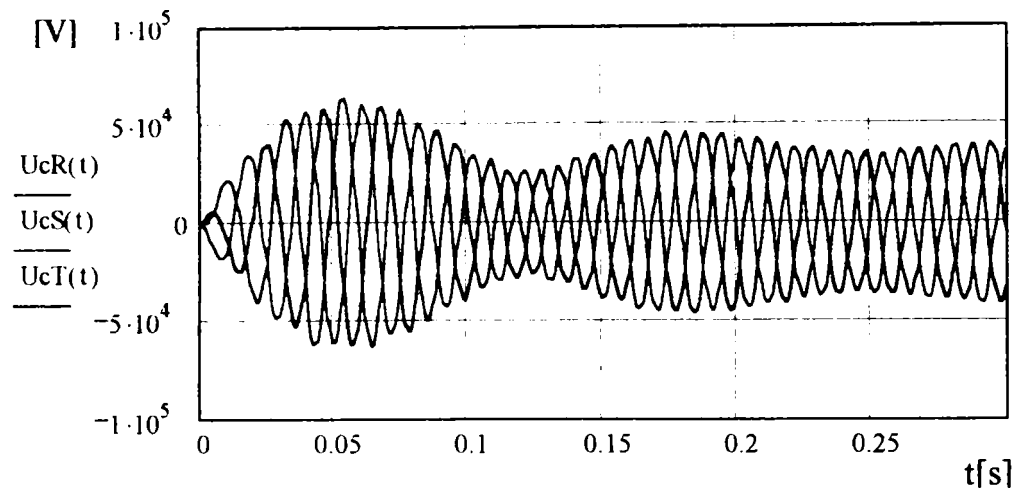


Fig. 5.3. Variația supratensiunii pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, pentru $K_c=0,7$

Din figura 5.4 se observă faptul că supratensiunea maximă pe bateria de condensatoare, cauzată de curentul de scurtcircuit simetric apare când circuitul format din parametrii transformatorului și bateria de condensatoare devine un circuit rezonant (rezonanță de tensiune). Se constată că, odată cu creșterea lungimii liniei valoarea maximă a supratensiunii pe bateria de condensatoare scade și totodată scade și gradul de compensare la care aceasta apare. Pe curba ascendentă a variației supratensiunii la bornele bateriei cu gradul de compensare impedanța circuitului are un caracter inductiv, iar pe curba descendentă aceasta are un caracter capacitiv.

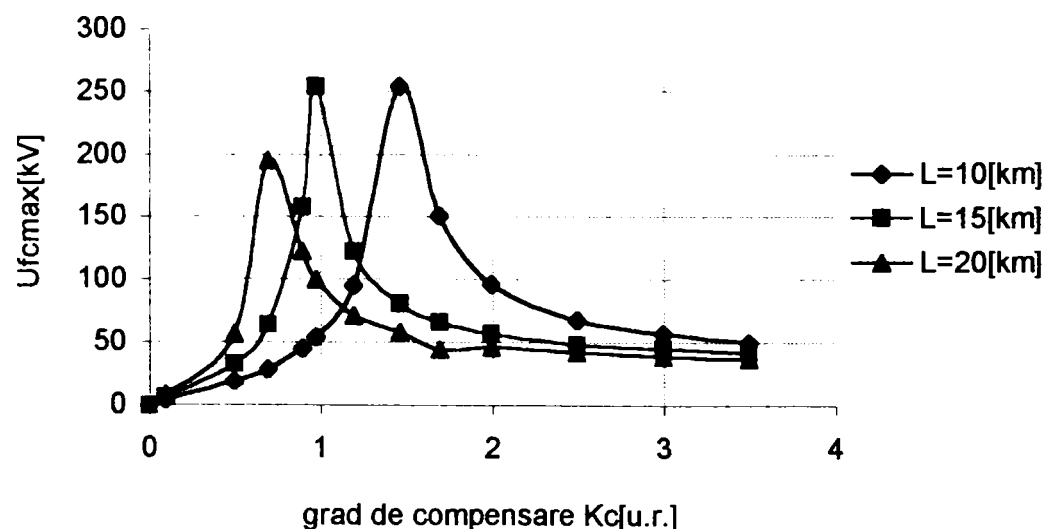


Fig. 5.4 Variația amplitudinii supratensiunii pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare și lungimea liniei, în cazul amplasării bateriei în stație.

Definind coeficientul de supratensiune pe bateria de condensatoare ca raportul dintre valoarea maximă de amplitudine a supratensiunii pe baterie după scurtcircuit $\hat{U}_{C_{\max f}}$ și valoarea de amplitudine a tensiunii pe baterie înainte de defect, \hat{U}_{C_f} :

$$K_{bc} = \frac{\hat{U}_{C_{\max f}}}{\hat{U}_{C_f}} \quad (5.8)$$

în figura 5.5 s-a reprezentat variația acestuia în funcție de gradul de compensare și lungimea liniei la un scurtcircuit simetric după baterie.

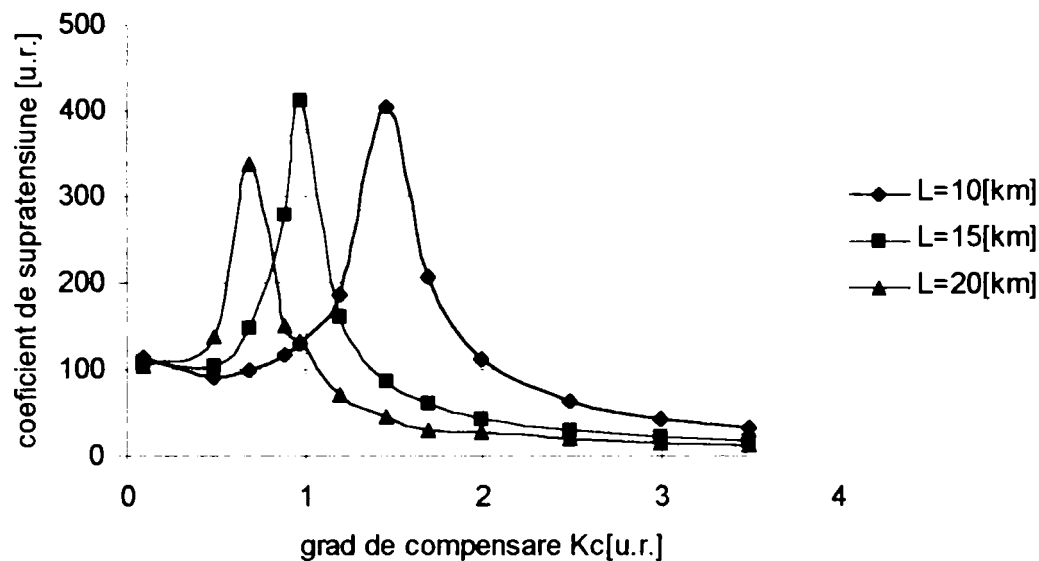


Fig.5.5. Dependenta coeficientului de supratensiune pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare și lungimea liniei la scurtcircuit simetric, în cazul amplasării bateriei în stație.

După cum se observă din figura 5.5 coeficientului de supratensiune la bornele bateriei de condensatoare are valori foarte mari. Tensiunea la bornele bateriei de condensatoare creștere de sute de ori la scurtcircuit imediat după baterie, față de regimul normal de funcționare. Amplasarea bateriei de condensatoare în stație de transformare, nu reprezintă o soluție viabilă pentru reglajul tensiunii, după cum s-a arătat în capitolul 3 și ar ridica mari probleme în ceea ce privește protecția bateriei de condensatoare și deconectarea linie avariate.

5.2.2. Bateria de condensatoare amplasată într-un post de transformare

Spre deosebire de situația prezentată în § 5.2.1, la un scurtcircuit trifazat în aval de instalația de compensare, curentul de defect prin bateria de condensatoare este mult mai mic, fiind limitat de impedanța liniei. În cazul liniilor de medie tensiune secțiunea conductoarelor este, în general, mai mică decât la liniilor de înaltă și foarte înaltă tensiune, iar rezistența care este invers proporțională cu secțiunea conductorului are o valoare comparabilă cu cea a reactanței, ceea ce determină limitarea amplitudinii supratensiunilor.

Supratensiunile care apar pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric în aval de baterie sunt determinate considerând schema din figura 5.6. Sursa s-a considerat de putere infinită (impedanța internă nulă) și s-a neglijat saturația și pierderile în miezul transformatorului.

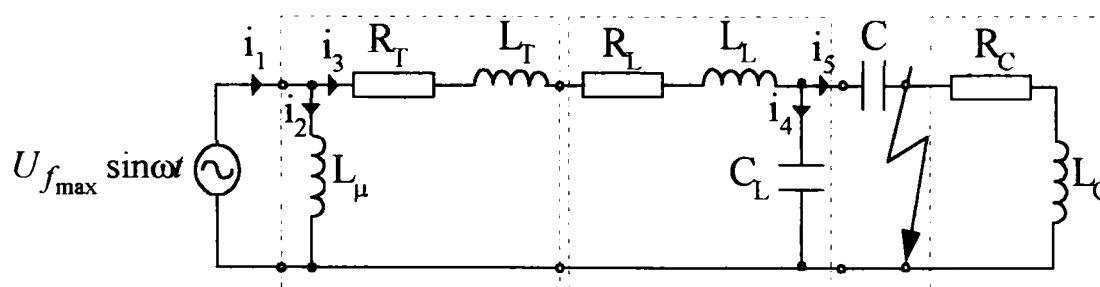


Fig.5.6 Schema echivalentă de calcul a supratensiunilor la scurtcircuit trifazat

În aceste condiții, tensiunea la bornele bateriei de condensatoare este dată de relația:

$$\begin{aligned}
 U_C(t) = & \frac{U_{f \max}}{\omega^2 \cdot (C + C_L)^2 \cdot (R_T + R_L)^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right)^2} \cdot \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) \cdot \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\sigma_1} e^{-\delta_1 t} \cdot \sin \sigma_1 t \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \omega}{\sigma_1 \cdot \omega_1^2} e^{-\delta_1 t} \cdot \sin \sigma_1 t - \omega \cdot (C + C_L) \cdot (R_T + R_L) \cdot \left(\cos \omega t - e^{-\delta_1 t} \cdot \cos \sigma_1 t \right) \right] + \\
 & + \frac{e^{-\delta_1 t}}{C + C_L} \left((C \cdot u_C(0) + C_L \cdot u_{C_L}(0)) \cdot \cos \sigma_1 t + \frac{\delta_1 \cdot (C \cdot u_C(0) + C_L \cdot u_{C_L}(0)) + i_1(0)}{\sigma_1} \cdot \sin \sigma_1 t \right)
 \end{aligned}$$

unde: $U_{f \max}$ este amplitudinea maximă a tensiunii sursei;

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{(L_T + L_L) \cdot (C + C_L)}} - \text{pulsăția proprie a circuitului;}$$

$$\delta_1 = \frac{R_T + R_L}{2 \cdot (L_T + L_L)} - \text{coeficient de amortizare a componentei aperiodice;}$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\omega_1^2 - \delta_1^2}$$

$u_C(0), i_1(0), u_{C_L}(0)$ - tensiune pe bateria de condensatoare, curentul pe linie și tensiunea pe capacitatea liniei în momentul apariției scurtcircuitului.

Dacă se neglijează pierderile în înfășurările transformatorului și pe linie ($R_T = 0, R_L = 0$) din relația (5.9) se observă ca la un grad de compensare $K_C \leq 1$, ($\omega_1 < \omega$), amplitudinea tensiunii pe baterie este mai mică decât amplitudinea tensiunii sursei. În cazul în care bateria de condensatoare compensează atât reactanța liniei cât și cea a transformatorului, $\omega_1 = \omega$, în condițiile ($R_T = 0, R_L = 0$), tensiunea la bornele baterie tinde spre infinit. Pentru un grad de compensare mai mare ($X_C \geq X_T + X_L$), ($\omega_1 > \omega$), amplitudinea tensiunii pe baterie scade.

Pentru linia cu pierderi, componenta tranzitorie a supratensiunii la bornele bateriei de condensatoare care oscilează cu frecvența proprie a circuitului, $f_1 = \frac{\sigma_1}{2 \cdot \pi}$, se amortizează mai repede în cazul liniilor cu conductoare de secțiuni mai reduse.

Se consideră rețeaua din figura 5.1 în care bateria de condensatoare este amplasată la sfârșitul liniei. Transformatorul din stația de distribuție are caracteristicile prezentate în aplicația din § 5.2.1, iar linia electrică aeriană ce alimentează consumatorul are lungimea de 20km și secțiunea conductoarelor de 95mm². La un grad de compensare $K_C = 1,742$, adică reactanța liniei, respectiv a transformatorului sunt practic compensate ($X_C = X_L + X_T$), curentul de scurtcircuit are un caracter rezistiv și atinge valoarea maximă. Valoarea maximă a supratensiunii pe bateria de condensatoare este de 28,93kV (fig. 5.7).

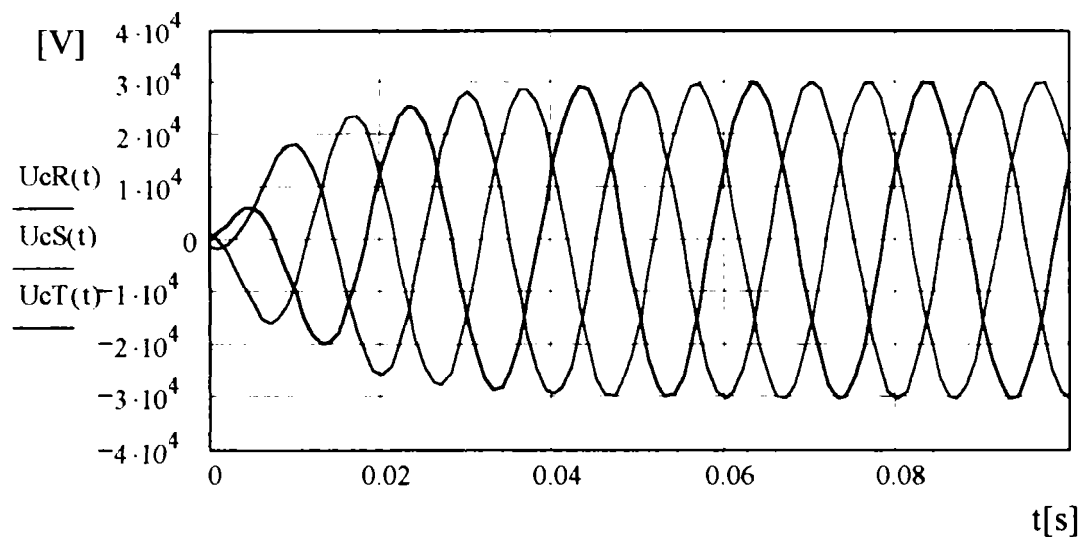


Fig.5.7 Variația supratensiunii pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, pentru $K_C = 1,742$

Valoarea maximă a supratensiunii pe bateria de condensatoare scade cu scăderea gradului de compensare a liniei. Pentru un grad de compensare de 1,2 supratensiunea pe bateria de condensatoare este mai redusă cu 34,16% decât pentru $K_C = 1,742$, iar la $K_C = 0,7$ valoarea supratensiunii este mai mică cu 62,68% (fig. 5.8).

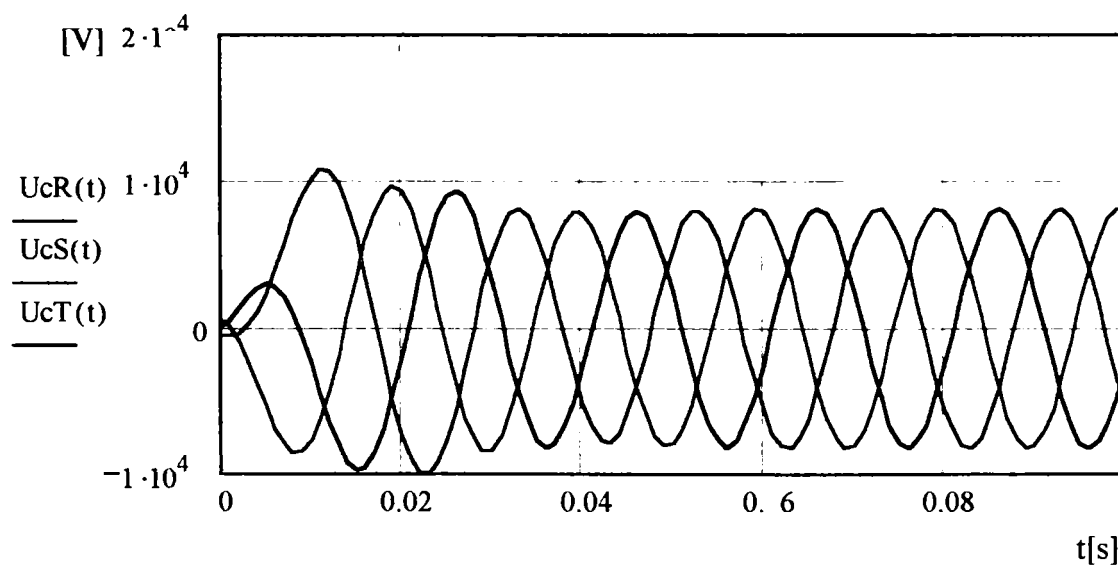


Fig.5.8 Variația supratensiunii pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, pentru $K_C = 0,7$

Pentru rețea descrisă mai sus, la diferite lungimii ale liniei, în figura 5.9 s-a reprezentat variația amplitudinii maxime a supratensiunii pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare.

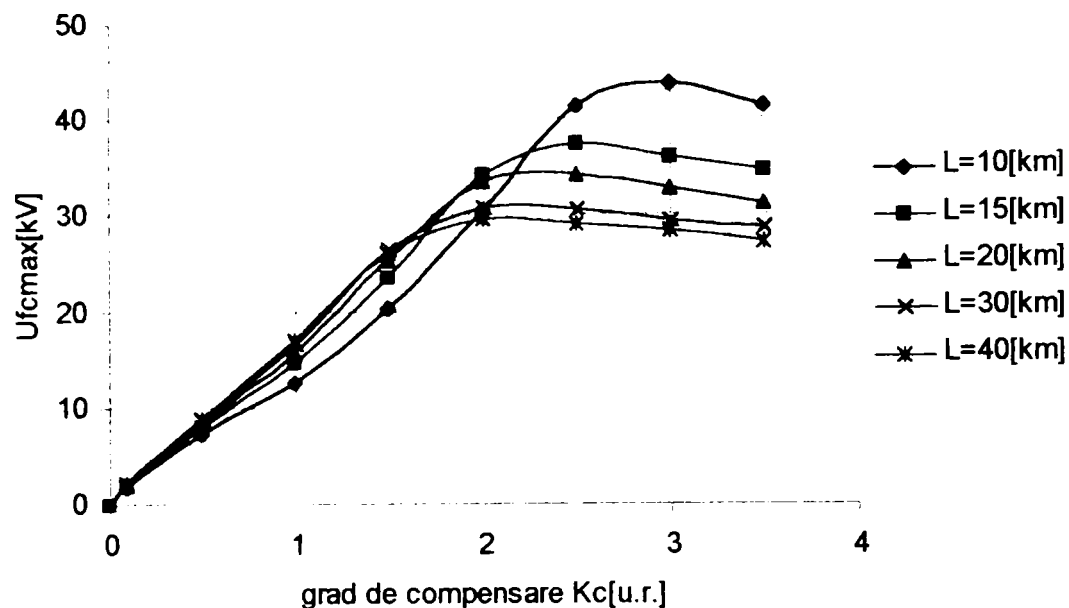


Fig. 5.9. Variația amplitudinilor maxime ale supratensiunilor pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, în funcție de gradul de compensare și lungimea liniei.

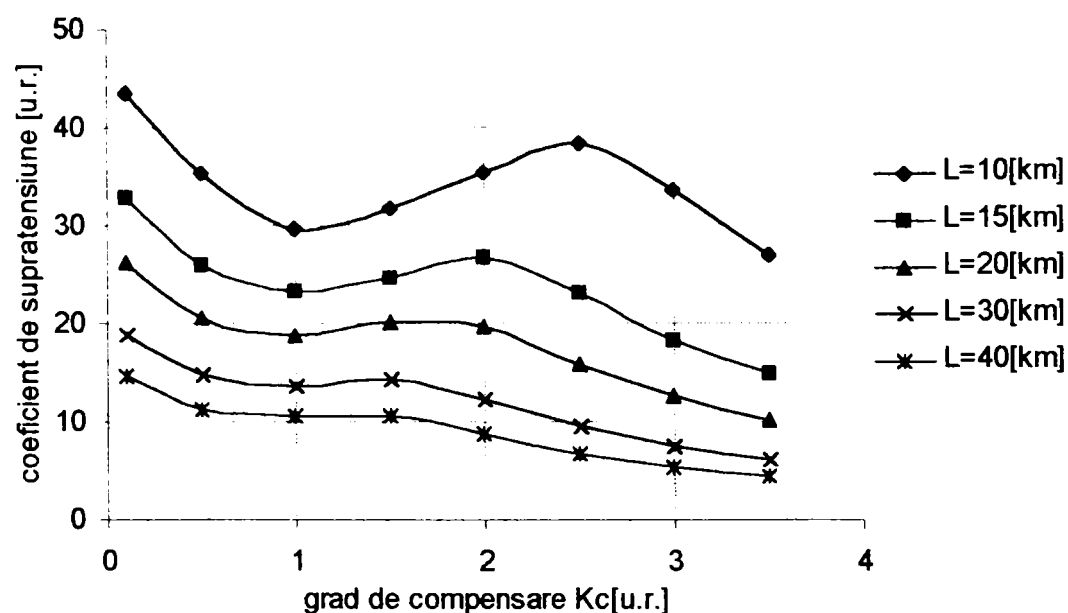


Fig. 5.10. Variația coeficientului de supratensiune pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare și lungimea liniei în cazul unui scurtcircuit simetric

Analizând figurile 5.9 și 5.10 se constată că, valoarea maximă a supratensiunii, respectiv a coeficientului de supratensiune pe bateria de condensatoare cresc cu micșorarea lungimii liniei. Gradul de compensare a reactanței liniei pentru care apar valorile maxime pentru supratensiuni la bornele bateriei de condensatoare crește de asemenea cu micșorarea lungimii liniei.

5.2.3. Influența inductivității sursei

În cazul în care sursa (sistemul) nu se consideră de putere infinită, în schema echivalentă de calcul a supratensiunilor, aceasta se va introduce printr-o inductivitate L_S , a cărei valoare se determină din puterea de scurtcircuit și tensiunea nominală pe bara la care este racordată. În aceste condiții sistemul de ecuații (5.4) devine:

$$\begin{cases} U_{f \max} \sin \omega t = L_S \frac{di_1(t)}{dt} + L_\mu \frac{di_2(t)}{dt} \\ U_{f \max} \sin \omega t = R_T i_3(t) + L_T \frac{di_3(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_3(t) dt + u_C(0) \\ \frac{1}{C} \int i_3(t) dt + u_C(0) = u_C(t) \\ i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) \end{cases} \quad (5.10)$$

Aplicând transformata Laplace sistemului de ecuații (5.10) și după efectuarea calculelor, imaginea tensiunii la bornele baterie de condensatoare $U_C(s)$ este dată de relația:

$$U_C(s) = \frac{\omega \cdot U_{f \max} \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{L_\mu}{L_\mu + L_S} + (s^2 + \omega^2) \cdot \left(u_C(0) + \omega_0^2 \cdot \frac{L_\mu L_S}{L_\mu + L_S} \cdot (i_1(0) - i_2(0)) \right)}{(s^2 + 2\delta_2 \cdot s + \omega_2^2) \cdot (s^2 + \omega^2)} \quad (5.11)$$

unde:

$U_{f \max}$ – amplitudinea maximă a tensiunii sursei;

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C \cdot \left(\frac{L_S L_\mu}{L_\mu + L_S} + L_T \right)}} \text{ – pulsația proprie a circuitului;}$$

$$\delta_2 = \frac{R_T \cdot (L_\mu + L_S)}{2 \cdot (L_\mu L_S + L_T (L_\mu + L_S))} \text{ – coeficient de amortizare a componentei aperiodice.}$$

Supratensiunea la bornele baterie de condensatoare când se ține seama de influența sursei, este dată de expresia:

$$\begin{aligned} U_C(t) = & \frac{U_{f \max}}{\omega^2 C^2 R_T^2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right)^2} \cdot \frac{L_\mu}{L_\mu + L_S} \cdot \left[-\omega \cdot C \cdot R_T \cdot \left(\cos \omega t - e^{-\delta_2 t} \cdot \cos \sigma_2 t \right) + \right. \\ & \left. + \left(\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) \cdot \sin \omega t - e^{-\delta_2 t} \cdot \frac{\omega}{\sigma_2} \cdot \left(\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2} \right) - \frac{2\delta_2^2}{\omega_2^2} \right) \cdot \sin \sigma_2 t \right) \right] + u_C(0) \cdot e^{-\delta_2 t} \cdot \cos \sigma_2 t + \\ & + e^{-\delta_2 t} \cdot \left(\frac{\delta_2}{\sigma_2} \cdot u_C(0) + \frac{i_3(0)}{C} \right) \cdot \sin \sigma_2 t \end{aligned} \quad (5.12)$$

În relația de calcul a supratensiunii (5.12) intervine și inductivitatea de magnetizare a transformatorului L_μ , care are o valoare mult mai mare decât inductivitatea sistemului și are o influență nesemnificativă asupra valorii amplitudinii supratensiunii. Prin urmare, în calculul supratensiunilor determinate de scurtcircuite simetrice se poate neglija parametrul transversal al transformatorului.

Analizând relația (5.12) se constată că, odată cu creșterea inductivității sursei scade coeficientul de amortizare a componentei aperiodice și pulsația proprie a circuitului, precum și valoarea supratensiunii la bornele bateriei.

În cazul în care pentru un anumit grad de compensare este îndeplinită condiția de rezonanță (bateria de condensatoare compensează atât reactanța transformatorului cât și a sursei), supratensiunea la bornele bateriei de condensatoare ia valori foarte mari. Valoarea supratensiunii depinde de lungimea liniei și secțiunea conductoarelor, prin faptul că valoarea capacității bateriei de condensatoare se alege în funcție de reactanța liniei.

Considerându-se aceeași rețea electrică din § 5.2.1, în figura 5.11 s-a reprezentat variația coeficientului de supratensiune în funcție de gradul de compensare K_C , pentru diferite valori ale inductivității sursei.

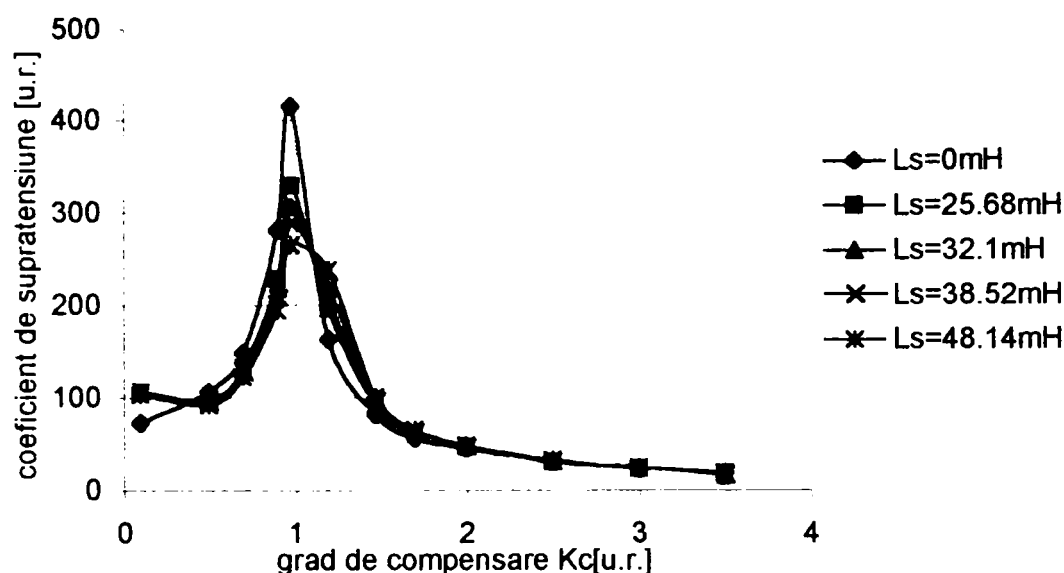


Fig. 5.11 Variația coeficientului de supratensiune pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare, pentru o linie având secțiunea conductoarelor $S = 70\text{mm}^2$.

Pentru a arăta cum influențează secțiunea conductoarelor liniei valoarea coeficientului de supratensiune, s-a considerat aceeași rețea ca și în cazul precedent, cu observația că, conductoarele liniei au secțiunea $S = 95\text{mm}^2$ și s-au calculat coeficienții de supratensiune. În figura 5.12 s-a reprezentat variația coeficientului de supratensiune în funcție de gradul de compensare pentru diferite valori ale inductivității sursei.

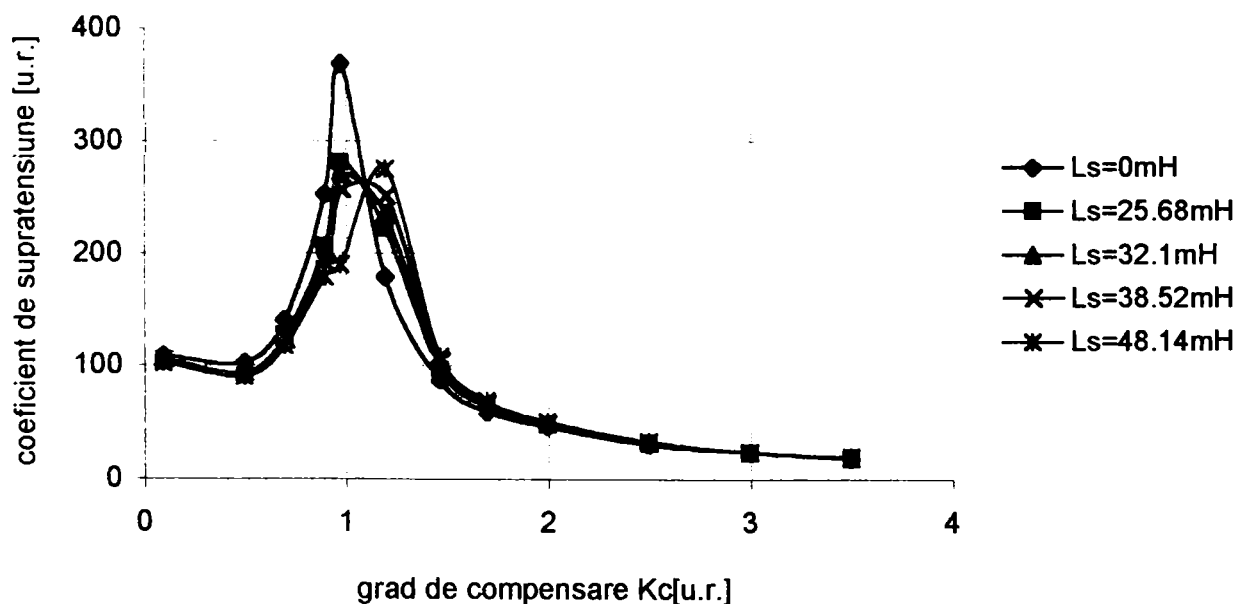


Fig. 5.12 Variația coeficientului de supratensiune pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare, pentru o linie având secțiunea conductoarelor $S = 95\text{mm}^2$.

Analizând cele prezentate în figurile 5.11 și 5.12 se constată că valorile coeficienților de supratensiune sunt mai mici în cazul în care secțiunea conductoarelor este mai mare. De asemenea se observă și o reducere a valorii coeficientului de supratensiune cu creșterea inductivității sursei.

În cazul amplasării bateriei de condensatoare în lungul liniei într-un post de transformare, supratensiunilor la bornele bateriei de condensatoare la un scurtcircuit simetric

se calculează cu relația (5.9), în care pulsația proprie a circuitului și coeficientul de amortizare

se determină cu expresiile: $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{(L_T + L_L + L_S) \cdot (C + C_L)}}$ și $\delta_1 = \frac{R_T + R_L}{2 \cdot (L_T + L_L + L_S)}$.

Deoarece valoarea inductivității liniei și a transformatorului sunt mult mai mari decât cea a sursei, aceasta din urmă nu are o influență semnificativă asupra valorii supratensiunii la bornele bateriei.

Pentru a arăta influența inductivității sursei asupra amplitudinii supratensiunii la bornele bateriei s-a considerat rețeaua electrică din §5.2.1, unde linia are lungimea de 30km, iar bateria este amplasată la o treime din lungimea liniei.

Valoarea supratensiunii pe bateria de condensatoare este mult mai mică decât în cazul în care bateria este amplasată în stație și totodată se constată că inductivității sursei nu are o influență prea mare asupra acesteia.

În figura 5.13 s-a reprezentat variația amplitudinii supratensiunii la bornele bateriei de condensatoare în funcție de gradul de compensare și inductivitatea sursei.

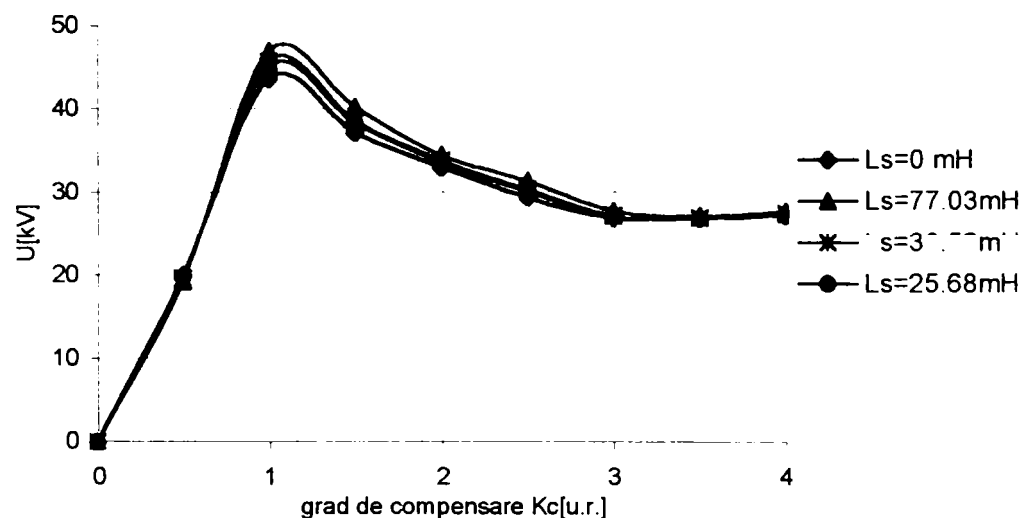


Fig.5.13. Variația supratensiunii pe bateria de condensatoare în funcție de gradul de compensare și inductivitatea sursei.

Din analiza celor prezentate în figura 5.13 se constată că, amplitudinea tensiunii pe bateria de condensatoare crește cu gradul de compensare până când se îndeplinește condiția de rezonanță, apoi scade odată cu creșterea gradului de compensare. Valoarea supratensiunii este influențată de inductivității sursei pentru grade de compensarea apropiate de condiției de rezonanță.

5.2.4. Determinarea supratensiunilor pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric prin modelare în ATP.

Modelarea elementelor de rețea și utilizarea programelor de software ATP-EMTP prezintă avantajul unor simulări mai comode a unor regimuri de scurtcircuit simetric și nesimetric, permițând o verificarea a modelelor matematice și a programelor utilizate pentru analiza supratensiunilor în rețele prevăzute cu compensare capacitivă longitudinală.

Pentru verificarea modelelor matematice de calculul a supratensiunilor pe bateria de condensatoare, la scurtcircuite simetrice, stabilite în §5.2.1 și §5.2.2 se compară rezultatele obținute folosind aceste modele cu cele rezultate din simulările efectuate în ATP.

Astfel, la scurtcircuit trifazat simetric după bateria de condensatoare, când aceasta este amplasată în stație de transformare curbele de variație ale tensiunii la bornele bateriei de condensatoare obținute prin simulare în ATP sunt prezentate în figura 5.14.

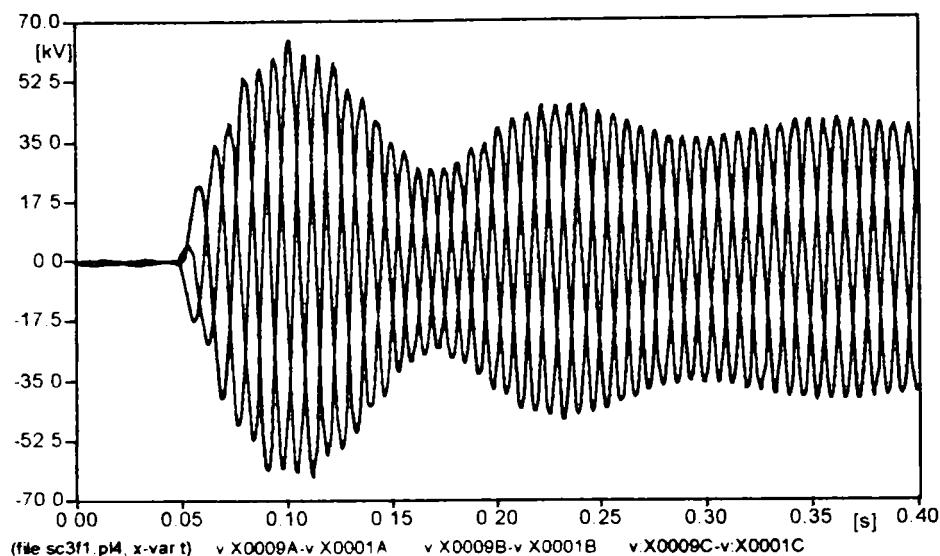


Fig.5.14. Variația supratensiunii pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, pentru $K_c=0.7$

Din compararea rezultatelor obținute prin aplicarea modelului matematic stabilit (fig.5.3) și a celor rezultate din simulări (fig.5.14) se constată o concordanță între acestea.

În cazul amplasării bateriei de condensatoare la sfârșitul linie, considerându-se aceeași rețea folosită pentru calcul supratensiunilor, prezentată în 5.2.2, prin simulare în ATP s-au obținut curbele de variație ale tensiunii la bornele bateriei de condensatoare (fig.5.15).

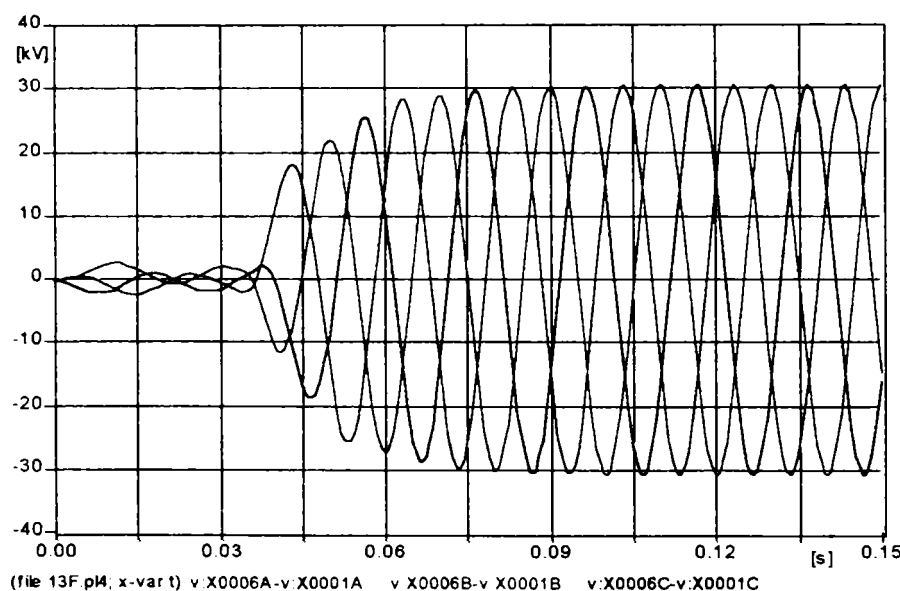


Fig.5.15 Variația supratensiunii pe bateria de condensatoare la un scurtcircuit simetric, pentru $K_c=1,742$

Rezultatele obținute prin simularea scurtcircuitelor simetrice după bateria de condensatoare, în ATP, arată că acestea sunt foarte apropiate de cele obținute prin calcul folosind modele matematice prezentate.

5.3. Determinarea analitică a supratensiunilor la un defect monofazat

În majoritatea cazurilor rețelele de medie tensiune sunt rețele cu neutrul izolat, tratat prin bobină de stingere sau legat la pământ printr-un rezistor de limitare. Apariția unui defect monofazat într-o astfel de rețea conduce la creșteri importante ale tensiunii pe fazele neavariate. Determinarea supratensiunilor pe fazele sănătoase în cazul punerii la pământ a unei faze prezintă importanță din punct de vedere al solicitării izolației liniei, cât și a

echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor. Într-o rețea cu neutrul izolat sau tratat cu bobină de stingere, o punere la pământ a unei faze nu este considerată o avarie majoră și protecția va semnaliza acel defect, dar nu v-a da comandă de deconectare, decât după un anumit interval de timp, care se poate extinde de la câteva minute la ore [C14]. Problema supratensiunilor la defecte monofazate în rețelele de medie tensiune este pe larg prezentată în literatura [C14], [C19], [C33], [C38].

În continuare, se va analiza influența condensatoarelor din instalația de compensare serie a rețelelor de medie tensiune asupra amplitudinii supratensiunilor la defecte monofazate în regim stabilizat, respectiv în regim tranzitoriu, considerând rețeaua simetrică, echilibrată fără pierderi prin izolație și alimentată de la o sursă de putere infinită.

5.3.1. Analiza regimului stabilizat la un defect monofazat într-o rețea prevăzută cu compensare longitudinală

Datorită nesimetriei care apare într-o rețea cu defect monofazat pentru determinarea supratensiunilor în regim permanent se va folosi metoda componentelor simetrice (Fortescue). Schema echivalentă de calcul obținută prin inserarea celor trei scheme de secvență (directă inversă și homopolară) este prezentată în figura 5.16.

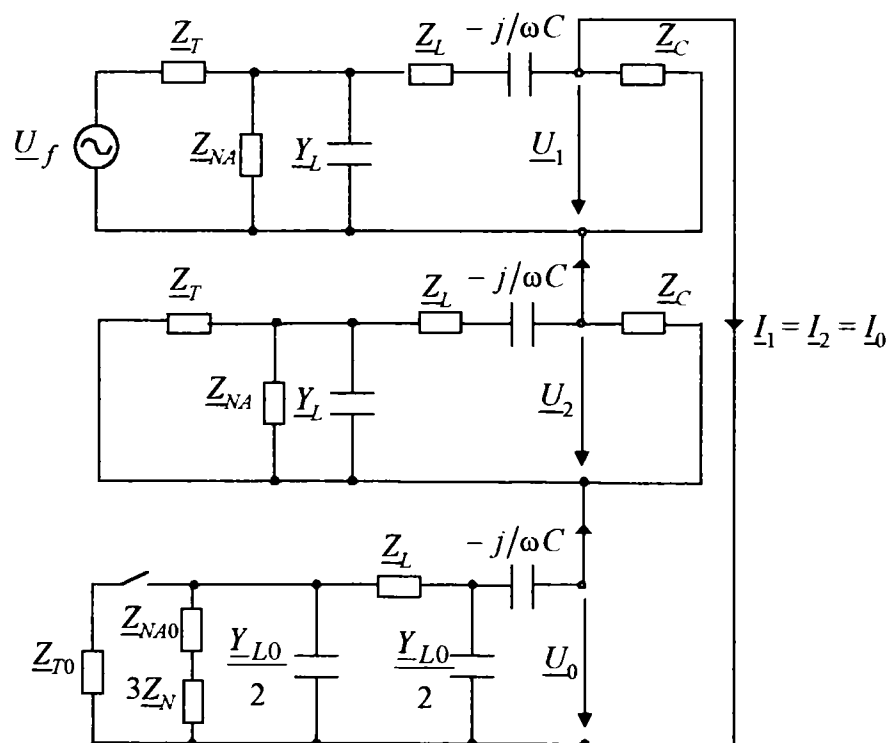


Fig. 5.16 Schema echivalentă de calcul a supratensiunilor la punerea la pământ a unei faze în regim stabilizat

Dacă se consideră rezistența de trecere la locul de defect nulă $R_D = 0$, tensiunile în componente simetrice, respectiv în componente de fază sunt date de relațiile cunoscute:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_f \left[\frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right], \quad \underline{U}_2 = -\underline{U}_f \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}, \quad \underline{U}_0 = -\underline{U}_f \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}, \quad (5.15)$$

$$\underline{U}_R = 0, \quad \underline{U}_S = \underline{U}_0 + a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2, \quad \underline{U}_T = \underline{U}_0 + a \cdot \underline{U}_1 + a^2 \cdot \underline{U}_2, \quad (5.16)$$

unde: \underline{U}_f reprezintă tensiunea de fază a sursei considerată de putere infinită, $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ impedanța de secvență directă este egală cu cea de secvență inversă, \underline{Z}_0 impedanța de secvență homopolară.

Expresiile impedanțelor de secvență sunt indicate în relațiile(5.17) și (5.18).

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_C \cdot \left[\underline{Z}_T \underline{Z}_{NA} + (\underline{Z}_T + \underline{Z}_{NA} + \underline{Y}_L \underline{Z}_T \underline{Z}_{NA}) \cdot \left(\underline{Z}_L - \frac{j}{\omega C} \right) \right]}{\underline{Z}_T \underline{Z}_{NA} + (\underline{Z}_T + \underline{Z}_{NA} + \underline{Y}_L \underline{Z}_T \underline{Z}_{NA}) \cdot \left(\underline{Z}_L + \underline{Z}_C - \frac{j}{\omega C} \right)} \quad (5.17)$$

$$\underline{Z}_0 = 2 \cdot \frac{\left[2\underline{Z}_{L0} + (\underline{Z}_{NA0} + 3\underline{Z}_N) \cdot (2 + \underline{Y}_{L0} \underline{Z}_{L0}) \right]}{\left[4 + 2\underline{Y}_{L0} \underline{Z}_{L0} + \underline{Y}_{L0} (\underline{Z}_{NA0} + 3\underline{Z}_N) \cdot (4 + \underline{Y}_{L0} \underline{Z}_{L0}) \right]} - \frac{j}{\omega C} \quad (5.18)$$

în care: $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$, $\underline{Z}_C = R_C + jX_C$, $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$, $\underline{Y}_L = j\omega C_L$ reprezintă impedanțele de secvență directă ale liniei, consumatorului, transformatorului, respectiv admitanța de secvență directă a liniei, iar $\underline{Z}_{L0} = R_{L0} + jX_{L0}$, $\underline{Z}_{NA0} = R_{NA0} + jX_{NA0}$, $\underline{Y}_{L0} = j\omega C_{L0}$ sunt impedanțele de secvență homopolară ale liniei, transformatorului (bobinei) de creare a nulului artificial, respectiv admitanța de secvență homopolară a liniei. S-a notat cu \underline{Z}_{NA} impedanța de secvență directă a transformatorului (bobinei) de creare a nulului artificial, iar cu \underline{Z}_N impedanța de tratare a neutrului.

5.3.2. Analiza regimului tranzitoriu la un defect monofazat într-o rețea prevăzută cu compensare serie.

Supratensiunile tranzitorii apar la trecerea dintr-un regim de funcționare stabilizat în altul, procesele tranzitorii care apar la punerea la pământ a unei faze sunt descrise de ecuații integro-diferențiale. Mărimea amplitudinii și evoluția supratensiunilor tranzitorii depind de condițiile inițiale în momentul producerii defectului și de modul de tratare al neutrului rețelei electrice.

Pentru analiza regimului tranzitoriu care apare la punerea la pământ a unei faze se consideră schema simplificată din fig.5.17. În această schemă s-a considerat sursa de putere infinită, rezistențele R , respectiv inductivitățile L corespund sursei, transformatorului din stație și liniei. De asemenea, s-au considerat egale capacitățile față de pământ ale celor trei faze C_0 , respectiv capacitățile dintre faze C .

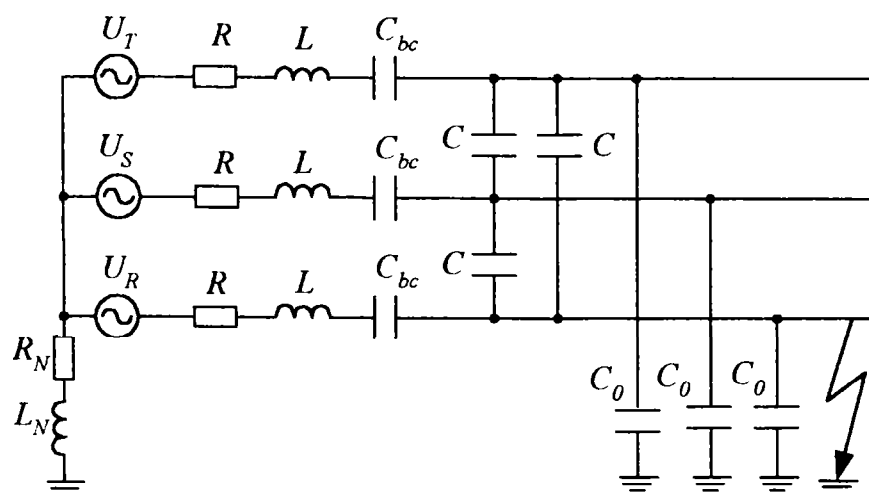


Fig. 5.17. Schema echivalentă a rețelei în regim tranzitoriu

Punerea la pământ a fazei R se modelează prin închiderea întreruptorului I, (fig. 5.18), iar momentul cel mai probabil de apariție al defectului este considerat când tensiunea fază-pământ trece prin valoarea maximă negativă pe faza defectă. Tensiunile fază-pământ pe fazele sănătoase în momentul apariției defectului sunt $U/2$. Inițial, capacitățile dintre fazele

sănătoase și faza R sunt încărcate la tensiunea dintre faze $3U/2$, iar capacitățile fazelor sănătoase față de pământ la tensiunea $U/2$. În momentul punerii la pământ a fazei R are loc o redistribuire a sarcinilor electrice între condensatoarele din circuit. Schema echivalentă pentru determinarea supratensiunilor la punerea la pământ a unei faze este reprezentată în figura 5.18.

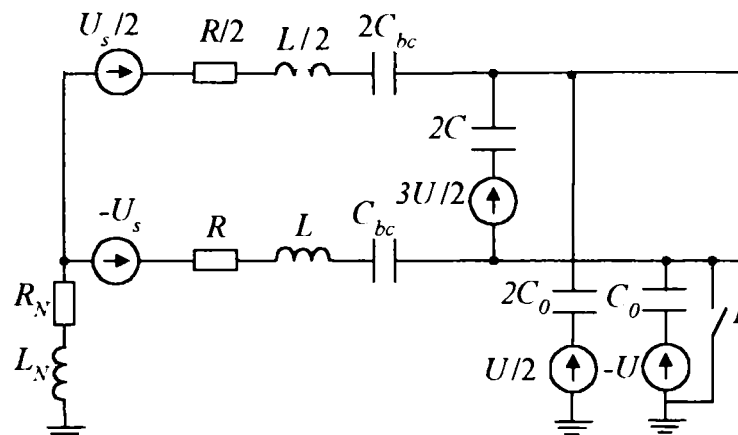


Fig.5.18 Schema echivalentă pentru determinarea supratensiunilor la punerea la pământ a unei faze, în regim tranzitoriu

La închiderea întreruptorului I capacitățile fazelor sănătoase față de pământ C_0 sunt puse în paralel cu capacitățile C dintre acestea și faza cu punere la pământ și practic instantaneu, are loc o redistribuire a sarcinilor electrice, astfel încât potențialul lor față de pământ este U_{eg} :

$$U_{eg} = \frac{U}{2} \cdot \frac{3C + C_0}{C + C_0} \quad (5.19)$$

unde U este amplitudinea tensiunii înainte de defect, la locul de scurtcircuit.

După redistribuirea sarcinilor între capacitățile $2C$ și $2C_0$ are loc un proces tranzitoriu de încărcare a capacităților de la tensiunea U_e până la $3U/2$. Acestui proces îi corespunde schema echivalentă din figura 5.19.

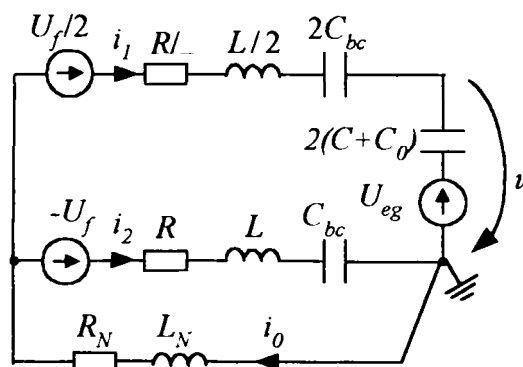


Fig.5.19 Schema echivalentă de calcul a supratensiunilor tranzitorii la un defect monofazat.

Ecuțiile ce descriu procesul tranzitoriu de încărcare a capacităților la tensiunea $3U/2$ sunt:

$$\frac{U_f}{2} + U_f = \frac{R}{2} \cdot i_1 + \frac{L}{2} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2C_{bc}} \int i_1 dt + u - R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C_{bc}} \int i_2 dt \quad (5.20)$$

$$-U_f = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_{bc}} \int i_2 dt + R_N \cdot i_0 + L_N \cdot \frac{di_0}{dt} \quad (5.21)$$

$$u_l = U_{eg} + \frac{1}{2(C + C_0)} \int i_1 dt; \quad i_0 = i_1 + i_2 \quad (5.22)$$

Aplicând transformata Laplace sistemului de ecuații de mai sus și efectuând reduceri se obține, în operațional, expresia generală a componentei libere a tensiunii în regim tranzitoriu :

$$U_l(s) = \frac{1}{2s} \cdot \frac{3s \cdot (C + C_0) \cdot Z(s) \cdot U + 2U_f}{s(C + C_0) \cdot Z(s) \cdot (Z(s) + 3Z_N(s)) + 2(Z(s) + Z_N(s))} \cdot (Z(s) + 3Z_N(s)) \quad (5.23)$$

unde: $Z(s) = R + sL + 1/sC_{bc}$, $Z_N(s) = R_N + sL_N$

Trecerea din operațional în domeniul timp a expresie (5.23) este dificilă în forma prezentată, de aceea, în continuare se va particulariza expresia pentru fiecare regim de tratare a neutrului.

5.3.3. Rețele cu neutrul izolat

În rețelele cu neutrul izolat, punerea la pământ a unei faze determină scăderea tensiunii pe faza avariata și creșterea tensiunilor pe fazele sănătoase până la $\sqrt{3}U_f$, în regim staționar. Problema supratensiunilor care apar în rețelele cu neutrul izolat este analizată în multe lucrări din literatură [C18], [C31], [C38].

Supratensiunile pe fazele sănătoase cauzate de apariția unui defect cu punere pe o fază, în regim staționar, se determină cu relațiile (5.15÷5.18), punând condiția ca impedanța de legare la pământ a neutrului rețelei să tindă la infinit ($Z_N \rightarrow \infty$).

Componenta tranzitorie a tensiunii la punerea la pământ a unei faze se determină relația (5.23), punând condiția ca R_N și L_N să tindă la ∞ .

$$U_{tr}(t) = \frac{U(3C + C_0)}{2 \cdot (C + C_0)} \cdot e^{-\delta t} \cdot \left[1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \right] \cdot \left[\cos \sigma_2 t + \frac{\delta}{\sigma_2} \sin \sigma_2 t \right], \quad (5.24)$$

unde: U este tensiunea fazei avariate înainte de defect la locul în care apare punerea la pământ;

U_s este tensiunea de fază a sursei la care s-a adăugat tensiunea pe bateria de condensatoare în momentul apariției defectului;

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C_{bc}} + \frac{U_s}{U \cdot L \cdot (3C + C_0)}}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C_{bc}} + \frac{1}{3L(C + C_0)}} - \text{pulsăția oscilațiilor}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\omega_2^2 - \delta^2}$$

$$\delta = \frac{R}{2L} - \text{coeficient de amortizare}$$

Capacitatea baterie de condensatoare este mult mai mare decât capacitățile naturale ale liniei, prin urmare raportul $\frac{1}{L \cdot C_{bc}} \ll \frac{1}{3L(C + C_0)}$. Din relația (5.24) rezultă că frecvența

componentei tranzitorii a supratensiunii nu este influențată de gradul de compensare al liniei. Amplitudinea supratensiunii depinde de raportul $\omega_1^2 / \omega_2^2 > 1$, deci de ω_1 .

Dacă se consideră o linie electrică aeriană de 20kV, având o lungime de 20km, construită pe stâlpi de tip SE 1, echipați cu console Cn1 (coronament în triunghi, izolatoare IsNs), prevăzută cu compensare capacitivă serie, în condițiile unei rețele cu neutrul izolat, la

punerea la pământ a unei faze creșterile de tensiune pe fazele sănătoase sunt de 17,42% în comparație cu linia fără compensare. Pe baza modelului matematic stabilit s-au calculat valorile amplitudinilor supratensiunilor și ale coeficienților de supratensiune, reprezentându-se grafic variația acestora din urmă, în funcție de gradul de compensare și lungimea liniei (fig.5.20). Se observă o creștere a coeficientului de supratensiune cu gradul de compensare și cu lungimea liniei.

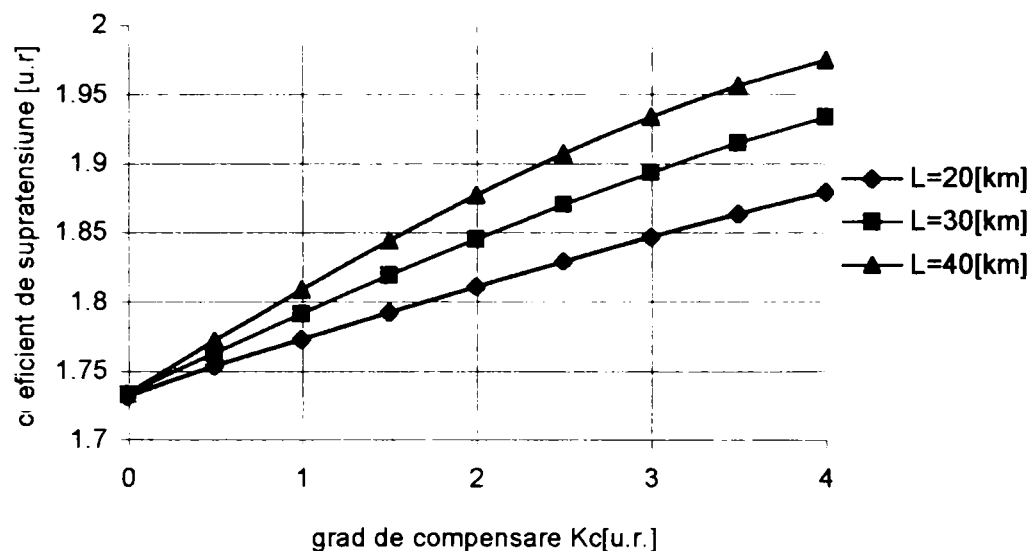


Fig. 5.20. Variația coeficientului de supratensiune pe faza S, în funcție de gradul de compensare al reactanței liniei și lungimea acesteia

Considerând o linie electrică de $20kV$, având o lungime de $20km$ în figura 5.21 s-a reprezentat variația coeficientului de supratensiune pe fazele S, respectiv T la locul defectului (curba (a), respectiv (b)) și la începutul liniei (curbele (a1) și (b1)).

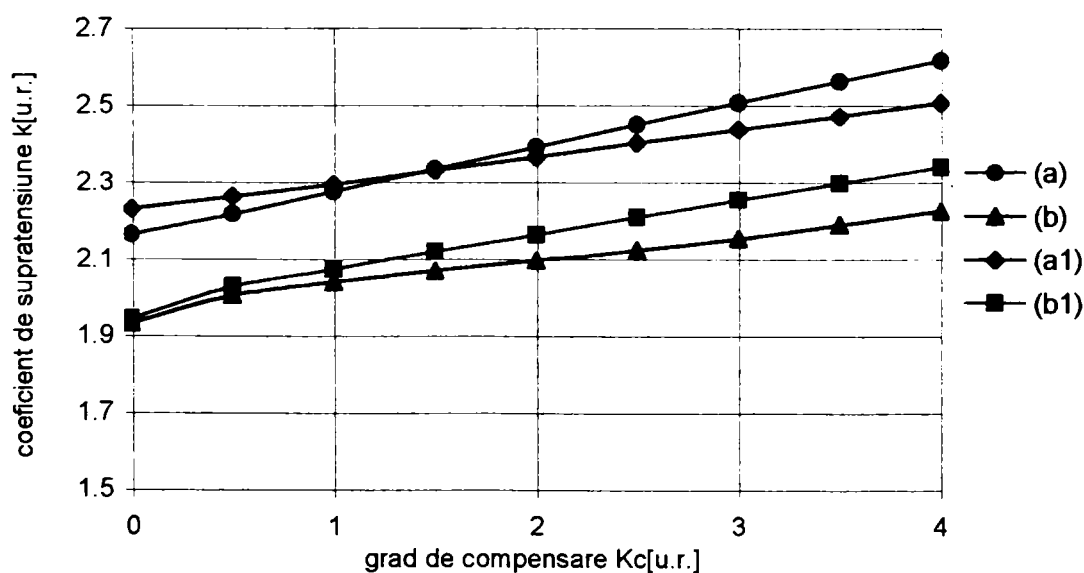


Fig. 5.21. Variația coeficientului de supratensiune k pe fazele sănătoase (T, S), la locul de defect (a, b) respectiv la începutul liniei (a1, b1), în cazul punerii la pământ a fazei R.

Se constată din figura 5.21 o creștere liniară a coeficientului de supratensiune cu gradul de compensare al liniei. Pentru un grad de compensare $K = 3$, coeficientul de supratensiune k crește cu aproximativ 15,7% față de cel al liniei fără baterie de condensatoare. Valorile coeficienților de supratensiune pentru linia fără compensare sunt apropiate de cele date în literatură [C22].

Pentru a verifica modelul matematic prezentat mai sus, s-a modelat o rețea electrică în ATP și rezultatele obținute sunt comparate cu cele rezultate, aplicând relațiile de calcul a componentei forțate și a componentei libere a tensiunii.

Rețeaua care s-a modelat este formată într-o linie electrică de $20kV$, având lungimea de $30km$, construită pe stâlpi de tip SE1 cu coronament în triunghi și conductoare din OL-Al cu secțiunea $95mm^2$, racordată la barele stație de $110/22kV$. La capătul liniei, care alimentează un consumator ce absoarbe o putere $\underline{S}_c = 4 + j \cdot 3 [MVA]$, este prevăzută o baterie de condensatoare, care realizează un grad de compensare al reactanței linie de $Kc = 1,5$. Bateria de condensatoare este formată din 15 condensatoare trifazate (5 module în serie realizate din 3 condensatoare trifazate în paralel), de tip Modulo 25-400V-25 $kVAR$ fiecare. Cele trei elemente capacitive ce formează condensatorul trifazat sunt legate în Δ . Transformatorul din stație prezintă aceleași caracteristici, ca cele indicate în aplicația § 5.2.1. La calculul supratensiunilor nu s-a luat în considerare prezența celorlalte linii care pleacă din stație, oricum acestea contribuie la reducerea supratensiunilor. Momentul punerii la pământ a fazei R s-a considerat când tensiunea pe această fază trece prin maximul negativ.

În figurile 5.22÷5.25 sunt prezentate supratensiunile pe fazele S și T care apar la punerea la pământ a fazei R, când sursa de alimentare este de putere infinită și rețeaua este cea indicată mai sus.

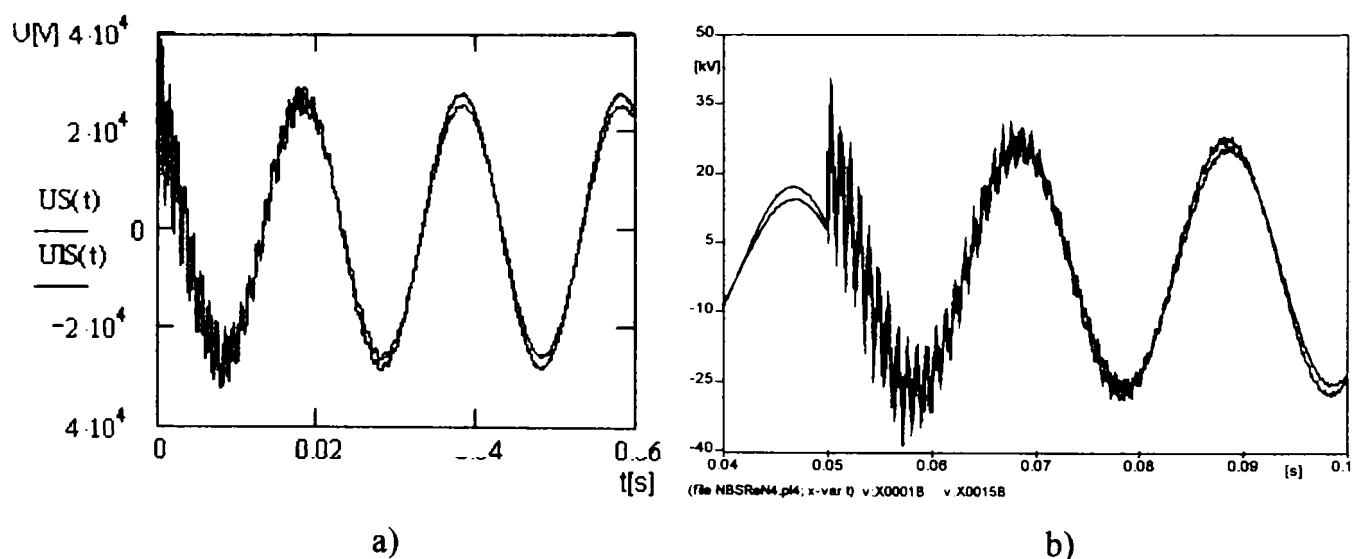


Fig. 5.22 Tensiunea pe faza S la locul defectului $US(t)$, respectiv la începutul liniei $UIS(t)$, pentru linia fără compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

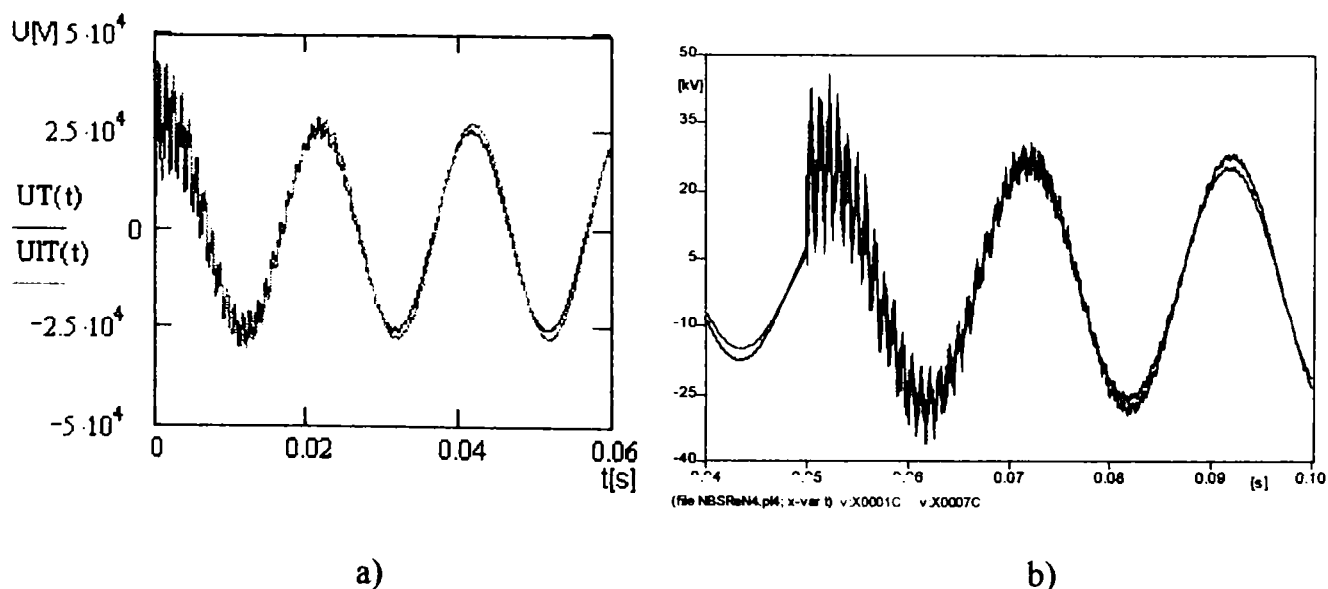


Fig.5.23. Tensiunea pe faza T la locul defectului $UT(t)$, respectiv la începutul liniei $UIT(t)$, pentru linia fără compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

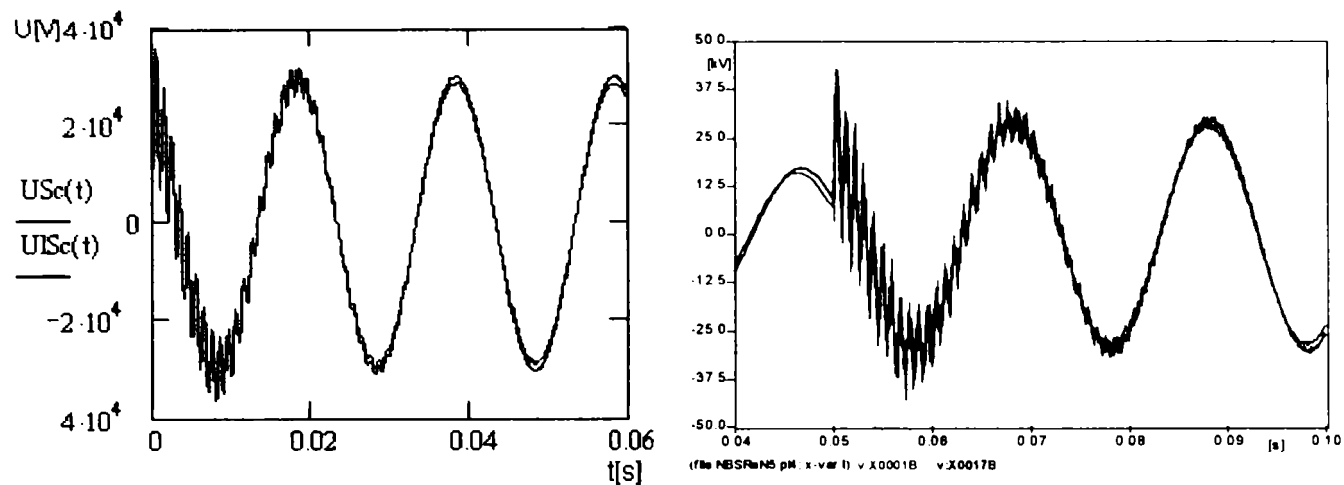


Fig.5.24 Tensiunea pe faza S la locul defectului $USc(t)$, respectiv la începutul liniei $UISc(t)$, pentru linia prevăzută cu compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

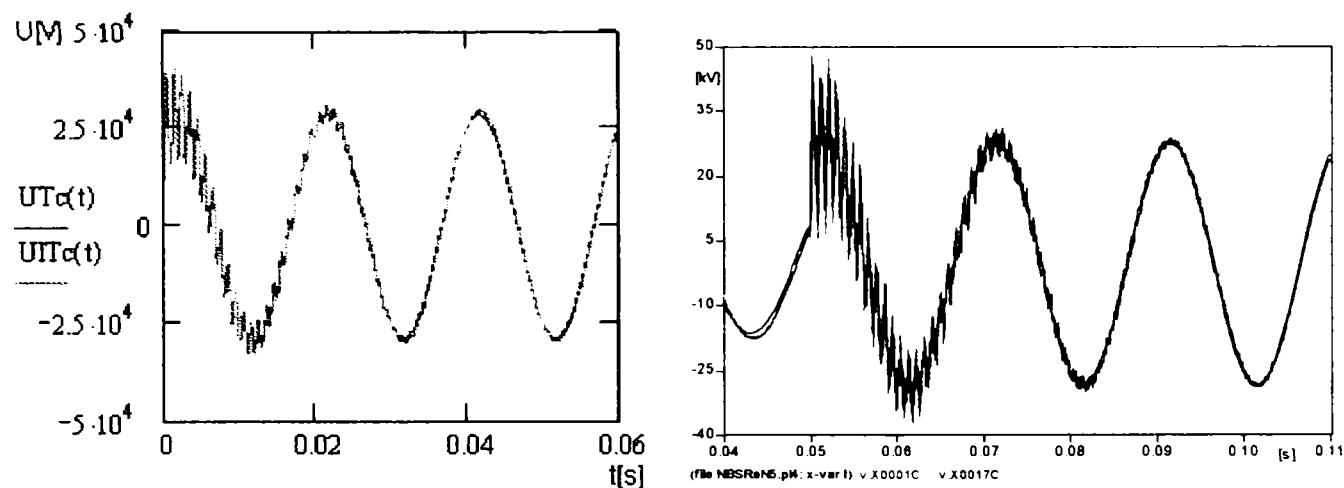


Fig.5.25 Tensiunea pe faza S la locul defectului $UTc(t)$, respectiv la începutul liniei $UITc(t)$, pentru linia prevăzută cu compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

Din cele prezentate în figurile 5.21÷5.24 se observă că, rezultatele obținute prin cele două metode sunt apropiate, diferența care apare la frecvența de oscilație este aceea că în ATP pasul de calcul este mult mai mic de 10^{-6} , în timp ce în programul de calcul, care folosește modelul matematic stabilit, acesta este de 10^{-4} .

5.3.4. Rețele cu neutrul tratat prin rezistor

Tratarea neutrului prin rezistor se folosește, în general, în rețelele de cablu, dar și în cazul rețelelor mixte. Un defect cu punere la pământ în rețele tratate cu rezistor de limitare reprezintă un scurtcircuit monofazat. Spre deosebire de rețelele cu neutrul legat rigid la pământ, valoarea curentului de scurtcircuit FN este mult mai mică, fiind limitată de rezistor.

Rezistorul de tratare are un efect de simetrizare a rețelei, apropiind în regim normal de funcționare potențialul neutrului de cel al pământului și totodată tensiunile pe fazele sănătoase sunt mai reduse.

Supratensiunile pe fazele sănătoase la scurtcircuit monofazat de durată, se determină cu relațiile (5.15÷5.18), punând condiția ca impedanța de legare la pământ a neutrului rețelei să fie egală cu rezistența rezistorului ($Z_N = R_N$). De asemenea, pentru calculul supratensiunilor pe fazele sănătoase la scurtcircuit FN, în regim tranzitoriu, se folosește relația (5.23) în care $Z_N(s)$ s-a înlocuit cu R_N .

În figura 2.26 s-a reprezentat variația coeficientului de supratensiune pe fazele sănătoase, la locul defectului, pentru rețeaua din paragraful anterior. Pentru realizarea

neutrului artificial s-a folosit o bobină BPN- 21kV-300A, iar rezistorul de limitare are valoare rezistenței de 36Ω .

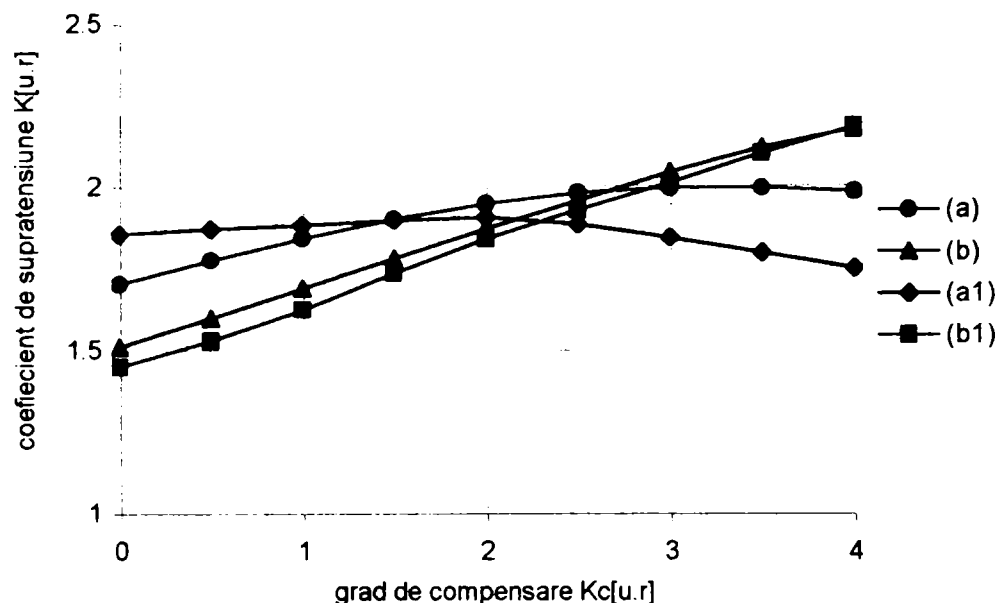


Fig. 5.26. Variația coeficientului de supratensiune K pe fazele sănătoase (T, S), la locul de defect (a, b) respectiv la începutul liniei (a1, b1), în cazul punerii la pământ a fazei R.

Din analiza curbelor prezentate în figura 2.26 se observă că, tensiunea la locul de defect pe faza S crește aproape liniar cu creșterea gradului de compensare, în timp ce tensiunea pe faza T crește până în apropierea punctului de rezonanță și apoi scade. Se constată, de asemenea, că valorile coeficienților de supratensiune sunt mult mai mici decât în cazul rețelelor cu neutrul izolat.

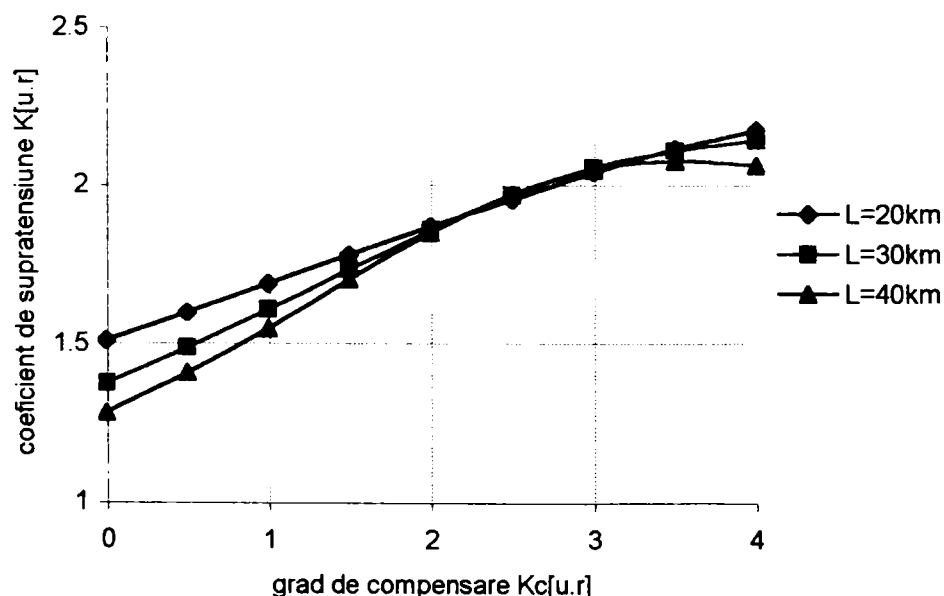


Fig.5.27. Variația coeficientului de supratensiune K pe faza S, la locul de defect, în funcție de gradul de compensare al reactanței liniei K_c .

Analizând cele prezentate în figura 2.27 se observă că, valoarea de supratensiune este mai mică pentru linii de lungimi mari. Aceasta se explică prin faptul că, valorile supratensiunilor sunt limitate de valoarea rezistenței liniei.

În figurile 5.28÷5.31 s-au reprezentat variațiile tensiunilor pe fazele S și T, la începutul liniei și la locul de defect, rezultate folosind modelul matematic și prin rularea programului ATP.

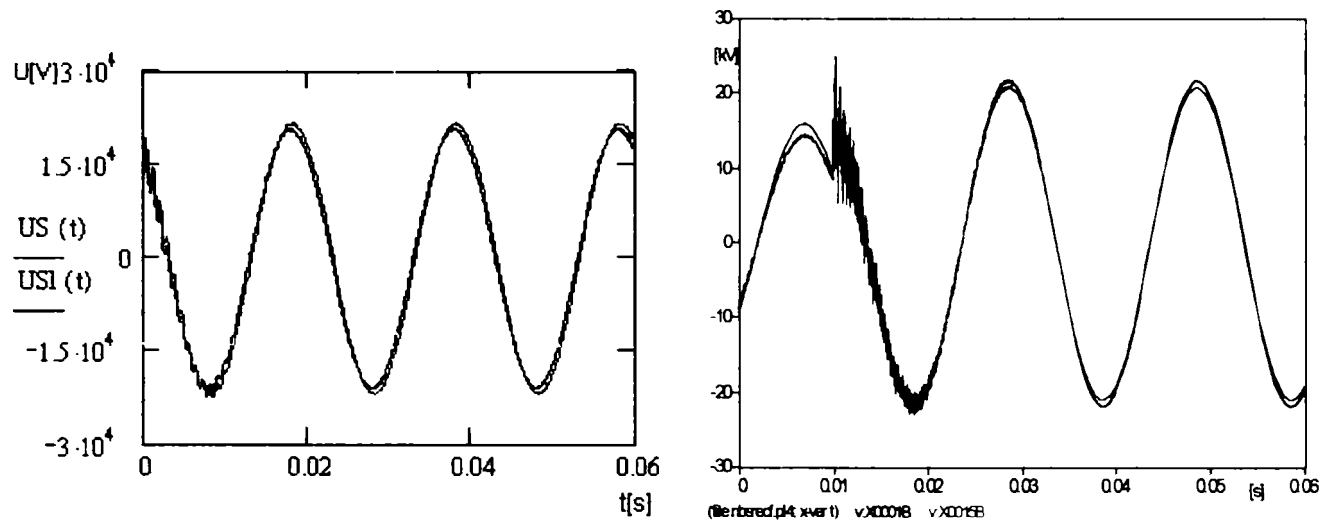


Fig.5.28. Tensiunea pe faza S la locul defectului $US(t)$, respectiv la începutul liniei $UIS(t)$, pentru linia fără compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

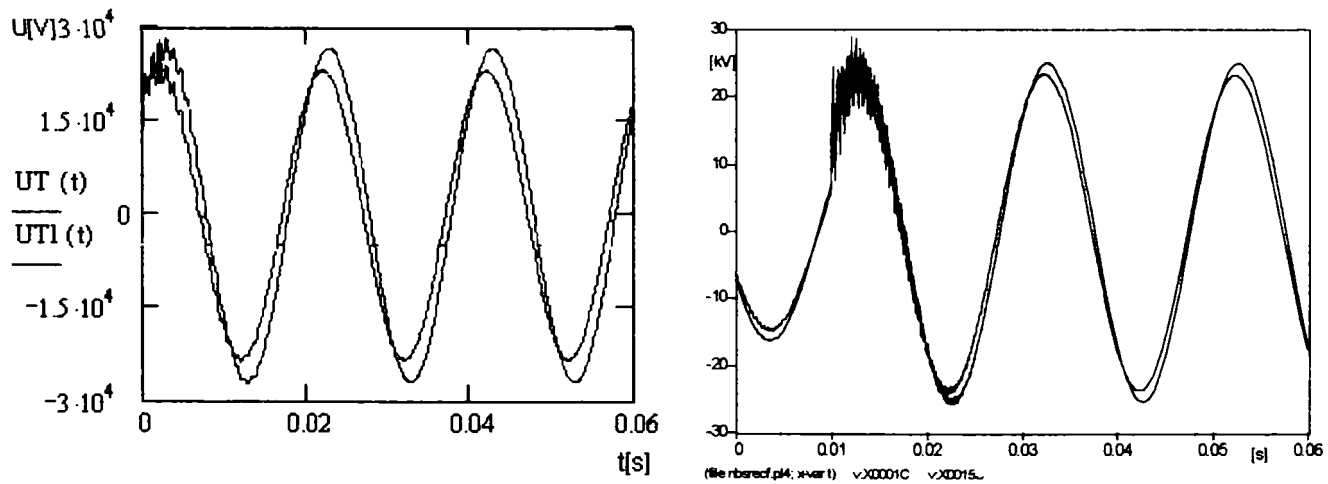


Fig.5.29. Tensiunea pe faza T la locul defectului $UT(t)$, respectiv la începutul liniei $UIT(t)$, pentru linia fără compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

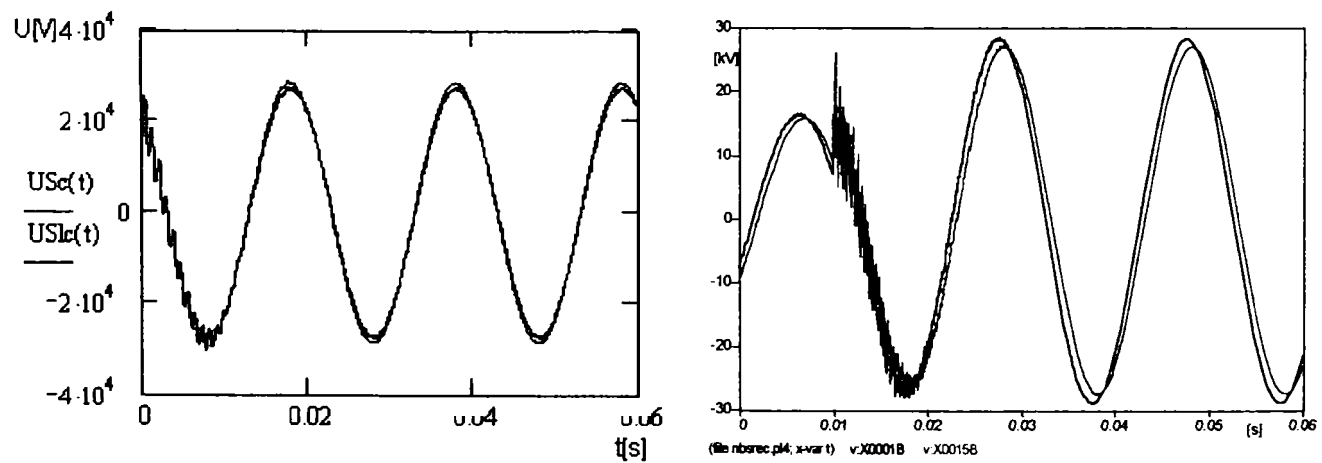


Fig.5.30. Tensiunea pe faza S la locul defectului $USc(t)$, respectiv la începutul liniei $UISc(t)$, pentru linia prevăzută cu compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

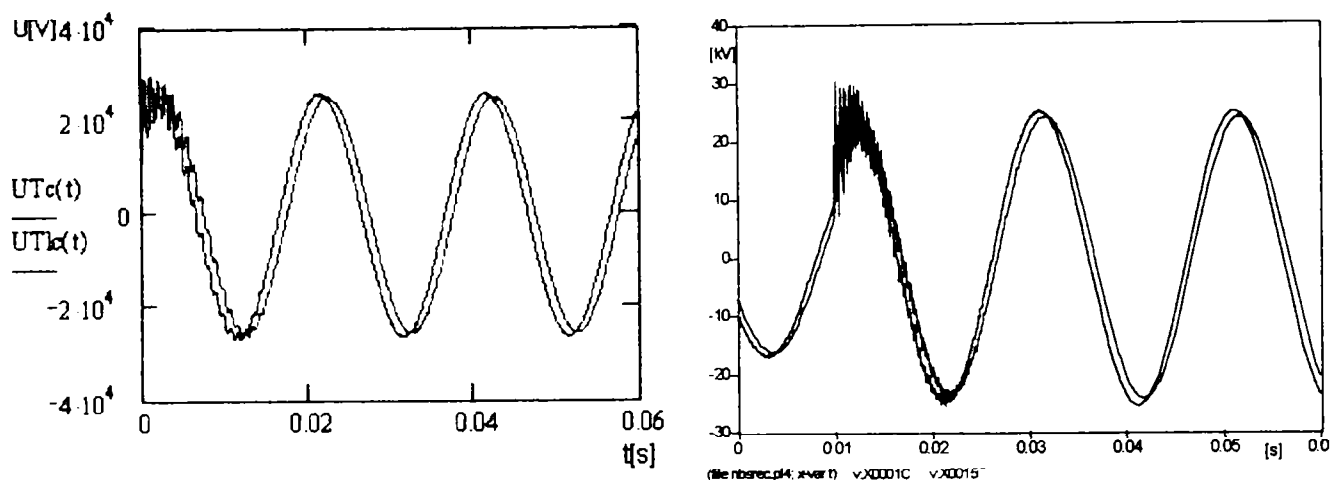


Fig.5.31. Tensiunea pe faza S la locul defectului $UT_c(t)$, respectiv la începutul liniei $UIT_c(t)$, pentru linia prevăzută cu compensare: a) rezultată din calcule, b) din ATP

Analizând curbele de variație ale tensiunilor pe cele două faze S și T, rezultate din calcule și din ATP, se observă că apar diferențe în cazul componentei tranzitorii, și anume frecvența oscilațiilor și valoarea amplitudinii supratensiunii sunt mai mari.

5.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-au prezentat modelele matematice de calcul ale supratensiunilor pe bateria de condensatoare la scurtcircuite simetrice și ale supratensiunilor la defecte monofazate în rețele cu neutrul izolat, respectiv tratat cu rezistor de limitare. Pentru validarea modelelor matematice s-au comparat rezultatele obținute prin aplicarea acestora cu cele rezultate folosind programul ATP.

Referitor la supratensiunile pe bateria de condensatoare care apar la un scurtcircuit simetric, imediat după aceasta, se constată că:

- valorile coeficienților de supratensiune cresc odată cu micșorarea distanței dintre bateria de condensatoare și stația de distribuție. Cele mai mari valori se obțin în cazul amplasării baterie de condensatoare în stație;
- valorile coeficienților de supratensiune cresc cu creșterea gradului de compensare până când este îndeplinită condiția de rezonanță, adică valoarea reactanței capacitive a bateriei de condensatoare este egală cu reactanța inductivă a rețelei. În acest caz, coeficienții de supratensiune au valori maxime;
- inductivitatea sursei influențează semnificativ valorile coeficienților de supratensiune în cazul în care bateria de condensatoare este amplasată în stație;
- valorile supratensiunilor depind de secțiunea conductoarelor liniei, cu cât secțiunea este mai mică, la același grad de compensare, valorile supratensiunilor sunt mai reduse.

În cazul defectelor monofazate, în rețelele cu neutrul izolat s-a constatat că, valorile coeficienților de supratensiune pe fazele sănătoase depind de lungimea linie și de gradul de compensare. Amplitudinile supratensiunilor cresc odată cu creșterea gradului de compensare.

În cazul scurtcircuitelor monofazate în rețelele cu neutrul tratat prin rezistor, valorile coeficienților de supratensiune pe fazele sănătoase cresc cu creșterea gradului de compensare. De exemplu, pentru o linie de $20kV$ și un grad de compensare de 1,5, coeficientul de supratensiune este mai mare cu 11,46%, față de cazul liniei necompensate. Spre deosebire de cazul rețelelor cu neutrul izolat, valorile coeficienților de supratensiune la punerea la pământ a unei faze sunt mult mai mici.

Contribuțiile aduse în acest capitol se referă la:

- întocmirea modelelor matematice de calcul a supratensiunilor pe bateria de condensatoare la scurtcircuite simetrice, în cazul în care bateria este amplasată în stație, respectiv într-un post de transformare în lungul liniei;
- întocmirea modelelor matematice de calcul a supratensiunilor la defecte monofazate în rețele cu neutru izolat, respectiv tratat cu rezistor de limitare și evidențierea efectului compensării capacitive asupra acestora;
- prezentarea unor aplicații prin care se evidențiază influența lungimii liniei, a gradului de compensare, a inductivității sursei asupra valorilor coeficienților de supratensiune pe bateria de condensatoare;

Capitolul 6

SIMULĂRI ȘI DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

În cadrul acestui capitol sunt prezentate determinările experimentale efectuate în laborator și pe o linie electrică de 20kV a SC. ELECTRICA SA., precum și rezultatele obținute prin simulării în ATP.

6.1. Determinări experimentale în laborator

Determinările experimentale s-au efectuat în laboratorul de Rețele Electrice al Catedrei de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică având ca scop următoarele:

- evidențierea efectului compensării capacitive serie asupra rețelei electrice, și anume:
 - creșterea tensiunii la bornele consumatorului, reducerea căderilor de tensiune pe linie;
 - îmbunătățirea factorului de putere al rețelei;
 - creșterea capacității de transport a liniei;
- analiza influenței consumatorului (factorului de putere) asupra efectului compensării serie;
- analiza efectului bateriei de condensatoare asupra propagării poluării armonice;
- analiza supratensiunilor de conectare și deconectare a bateriei de condensatoare serie, supratensiunile pe bateria de condensatoare la scurtcircuit trifazat și monofazat.

În laborator s-a modelat o linie electrică de 20kV, având lungimea de 44 km și secțiunea conductoarelor de Al-Ol, 70mm², care alimentează un consumator, ce absoarbe o putere $S = 6,57 \text{ MVA}$ la $\cos\varphi = 0,84$.

Pentru modelarea rețelei electrice s-au adoptat următoarele scări:

- pentru impedanță: $S_Z = \frac{Z_m}{Z_r} = 1 \frac{\Omega_{model}}{\Omega_{retea}}$
- pentru tensiune: $S_U = \frac{U_m}{U_r} = \frac{200}{20} \cdot \frac{V_{model}}{kV_{retea}} = 10 \cdot \frac{V_{model}}{kV_{retea}}$

Scările pentru curent (S_I) și putere (S_S) sunt:

$$S_I = \frac{I_m}{I_r} = 10 \cdot \frac{A_{model}}{kA_{retea}}, \quad S_S = \frac{S_m}{S_r} = 100 \cdot \frac{VA_{model}}{MVA_{retea}}$$

Linia electrică s-a modelat prin 3 rezistoare de tip RL2-4, reglabile, cu rezistența maximă de 75Ω și trei bobine cu miez feromagnetic, cu posibilitatea de reglare a întrefierului și cinci prize pentru a obține diferite valori ale reactanței, realizate în atelierul Catedrei de Electroenergetică. S-au neglijat capacitățile între faze și între faze și pământ.

Bateria de condensatoare s-a modelat prin condensatoare de tip MEK cu capacitatea de 100μF, luându-se în considerare două valori pentru gradul de compensare a reactanței liniei și anume: $K_C = 1,05$ (câte două condensatoare în paralel pe fiecare fază) și $K_C = 2,1$ (pe fiecare fază câte un condensator).

Consumatorul s-a modelat printr-o reactanță, de valoare 110Ω, în paralel cu o rezistență, de 72,4Ω, pe fiecare fază. Rețeaua, astfel modelată, a fost alimentată printr-un

autotransformator trifazat, având următoarele caracteristici: $S_n = 54kVA$, $U_{np} = 380V$, $U_{ns} = 0...780V$, $I_{np} = 82A$, $I_{ns} = 40A$, conexiunea $Y0$ și s-au efectuat înregistrări ale curenților și tensiunilor pe faze cu ajutorul dispozitivului „TRINET” realizat de firma SC. TELECOM SRL (fig. 6.1).

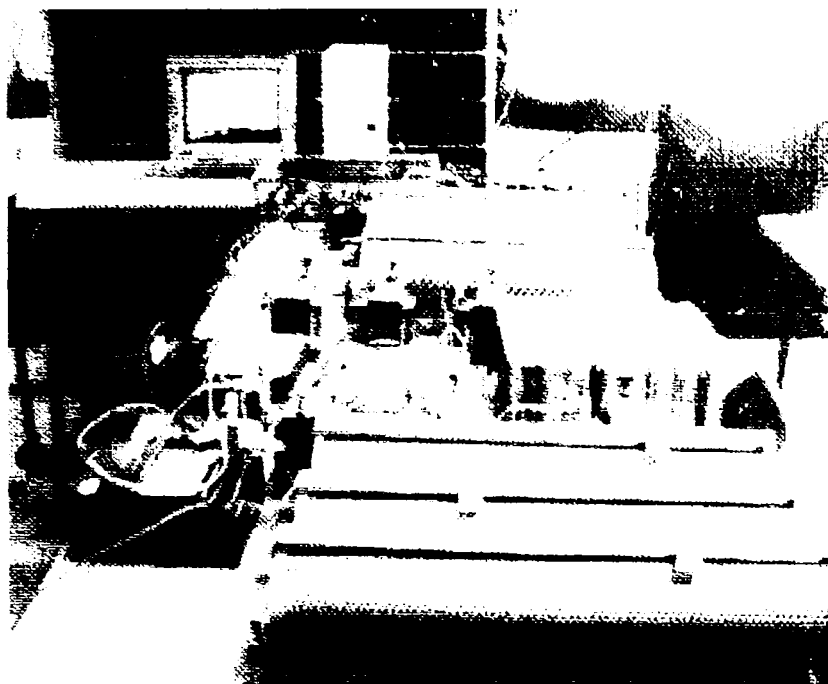


Fig. 6.1. Modelul rețelei electrice de $20kV$ pe care s-au efectuat măsurătorile în laborator

Programul de măsurători a fost următorul:

- a) alimentarea modelului, succesiv, cu tensiunea între faze de $200V$, $190V$ respectiv $180V$ și efectuarea de înregistrări ale curenților pe liniei și ale tensiunii la începutul liniei și la bornele consumatorului, în cazul liniei necompensate, respectiv compensate, pentru $K_C = 1,05$ și $K_C = 2,1$;
- b) considerarea consumatorului inductiv (modelat doar prin bobine) și repetarea măsurătorilor de la punctul a);
- c) compensarea puterii reactive absorbită de consumator în trepte: $K_Q = 0,129$, $K_Q = 0,259$, $K_Q = 0,389$; consumatorul inductiv (modelat doar prin bobine) și idem punctul a);
- d) considerarea consumatorului rezistiv (modelat prin rezistențe) și idem punctul a);
- e) modelarea unui consumator cu caracter capacitiv (rezistențe în paralel cu condensatoare) și repetarea măsurătorilor de la punctul a).

Achizițiile efectuate, curbele de tensiunilor și curenților, analiza armonică și spectrul frecvențelor sunt prezentate în anexa 5.

Pe durata efectuării măsurătorilor datorită faptului că autotransformatorul de alimentare este conectat la rețeaua de alimentare a facultății, care este dezechilibrată, nu s-a putut alimenta modelul cu tensiuni egale pe faze, după cum rezultă din imaginea (fig. 6.2). De asemenea rețeaua modelată nu este perfect simetrică datorită inegalității rezistențelor interne ale bobinelor și ale inductivităților rezistențelor din model, ceea ce va determina o accentuare a dezechilibrului tensiunilor la bornele consumatorului.

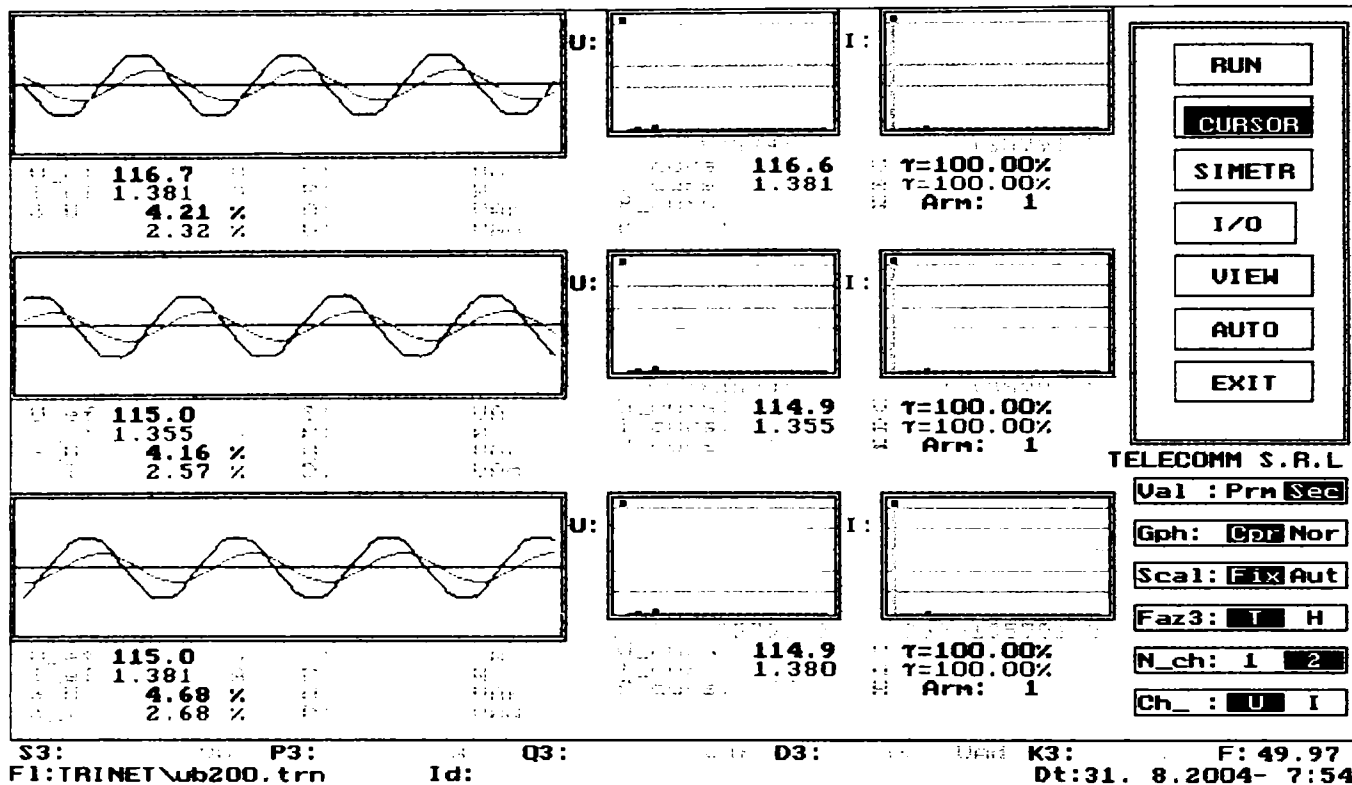


Fig. 6.2 Curbele de tensiune și de curent la începutul liniei

În continuare, pe baza înregistrărilor efectuate la punctul a), se analizează influența compensării capacitive serie asupra tensiunii la bornele consumatorului, a capacității de transport a liniei și a factorului de putere la începutul liniei. Analiza se va efectua pentru faza S, iar concluziile rezultate sunt valabile evident și pentru celelalte două faze.

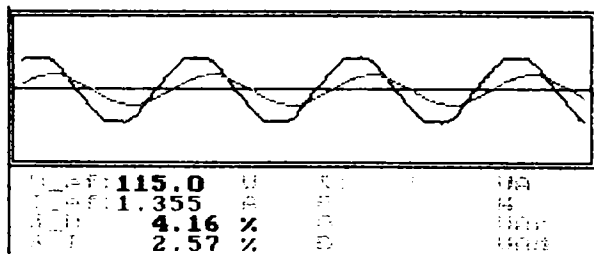


Fig.6.3 Curba tensiunii și a curentului pe faza S la începutul liniei

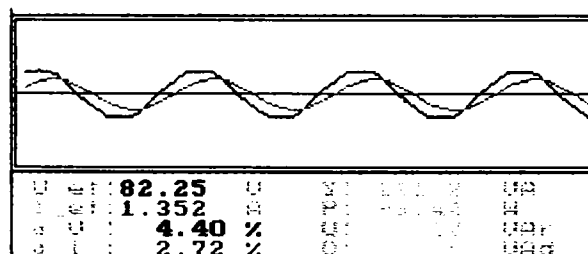
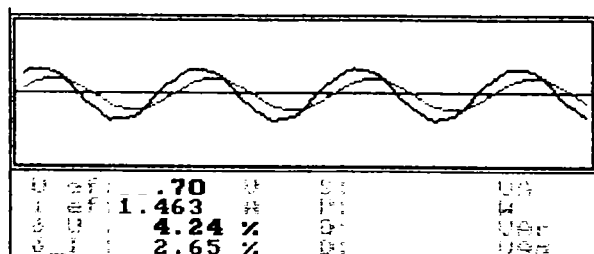
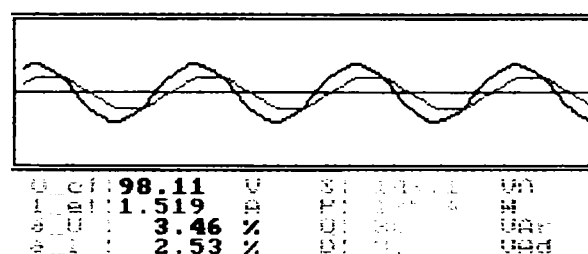


Fig.6.4 Curba tensiunii și a curentului pe faza S la bornele consumatorului, linia fără compensare

Fig. 6.5 Curba tensiunii și a curentului pe faza S la bornele consumatorului, $K_C = 1,05$ Fig.6.6 Curba tensiunii și a curentului pe faza S la bornele consumatorului, $K_C = 2,1$.

Analizând cele prezentate în figurile (6.3), (6.4), (6.5), (6.6) se constată următoarele:

- pierderea de tensiune pe linia fără compensare este de 28,47% din tensiunea de alimentare, în aceste condiții tensiunea la bornele consumatorului este de 142,46V pentru model și de 14,246kV pentru rețeaua reală;
- pentru un grad de compensare 1,05, pierdere de tensiune pe linie se reduce cu 5,6%; tensiunea la bornele consumatorului este 153,63V pentru model și 15,363kV pentru rețeaua reală;

- pentru un grad de compensare de 2,1, pierderea de tensiune pe linie este de 14,68% din tensiunea de alimentare, aproximativ jumătate din pierderea de tensiune pe linia fără compensare. Tensiunea la bornele consumatorului este de 169,93V pentru model și 16,993 pentru rețeaua reală;

În figura 6.7 s-a reprezentat tensiunea pe faza S la bornele consumatorului în funcție de tensiunea de alimentare (de fază) în cazul în care linia este fără compensare, respectiv compensată $K_C = 1,05$ și $K_C = 2,1$. Se observă că odată cu creșterea tensiunii de alimentare diferența dintre tensiunea la bornele consumatorului alimentat prin linia prevăzută cu compensare și linia fără compensare crește.

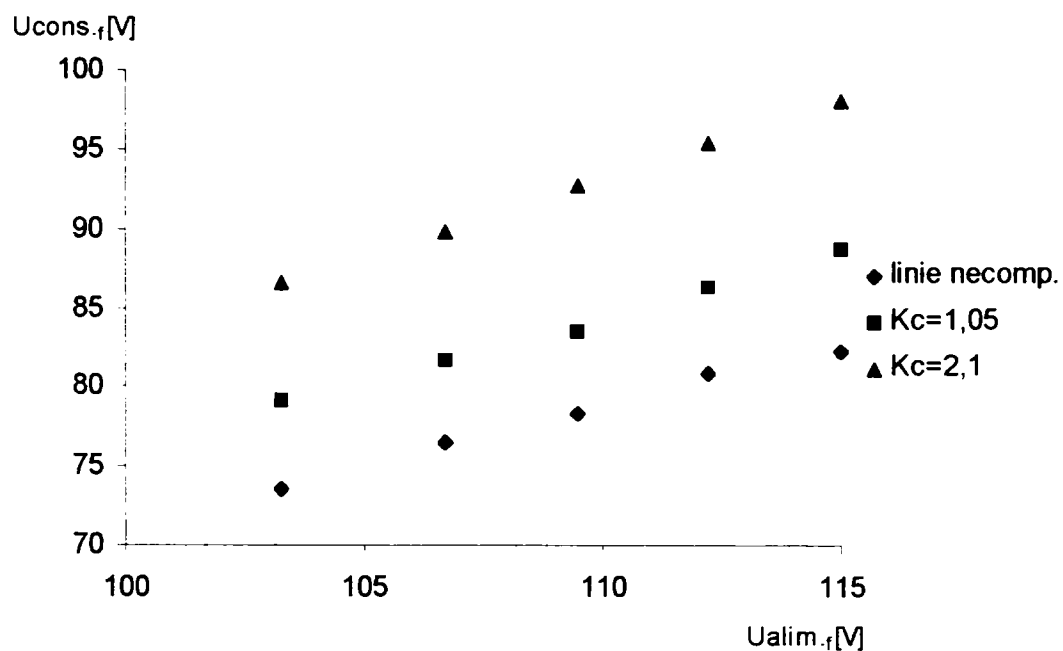


Fig.6.7. Valorile tensiunii la bornele consumatorului în funcție de tensiunea de alimentare

Factorul de putere la începutul liniei crește odată cu creșterea gradului de compensare al reactanței liniei. Din figurile 6.1 și 6.9 se observă că factorul de putere la începutul liniei crește cu 9,6% pentru $K_C = 1,05$ și cu 18,77% pentru $K_C = 2,01$, față de cazul liniei necompensate. În figura 6.8 s-a reprezentat factorul de putere în funcție de tensiunea de alimentare a modelului. Se constată că la un grad de compensare de 2,1 factorul de defazaj are o ușoară tendință de creștere odată cu creșterea tensiunii de alimentare.

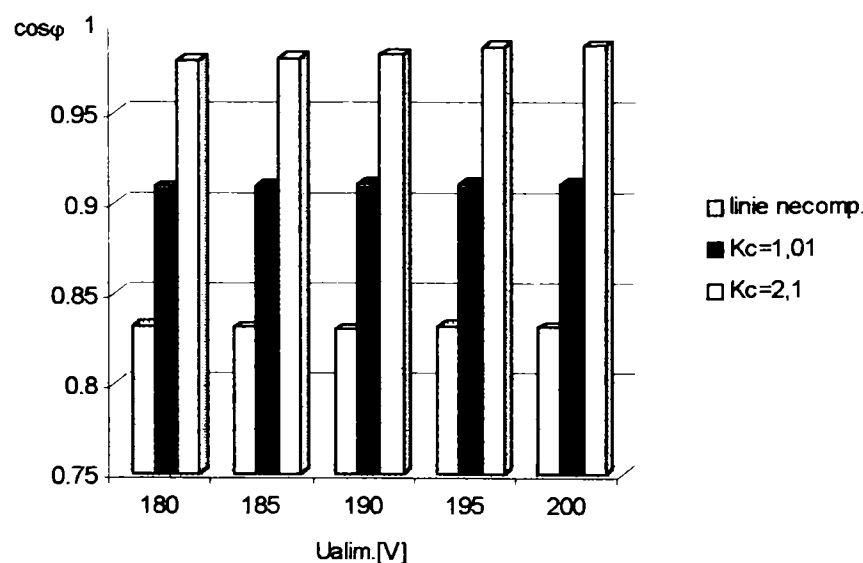


Fig. 6.8. Valorile factorului de putere la începutul liniei în funcție de tensiunea de alimentare

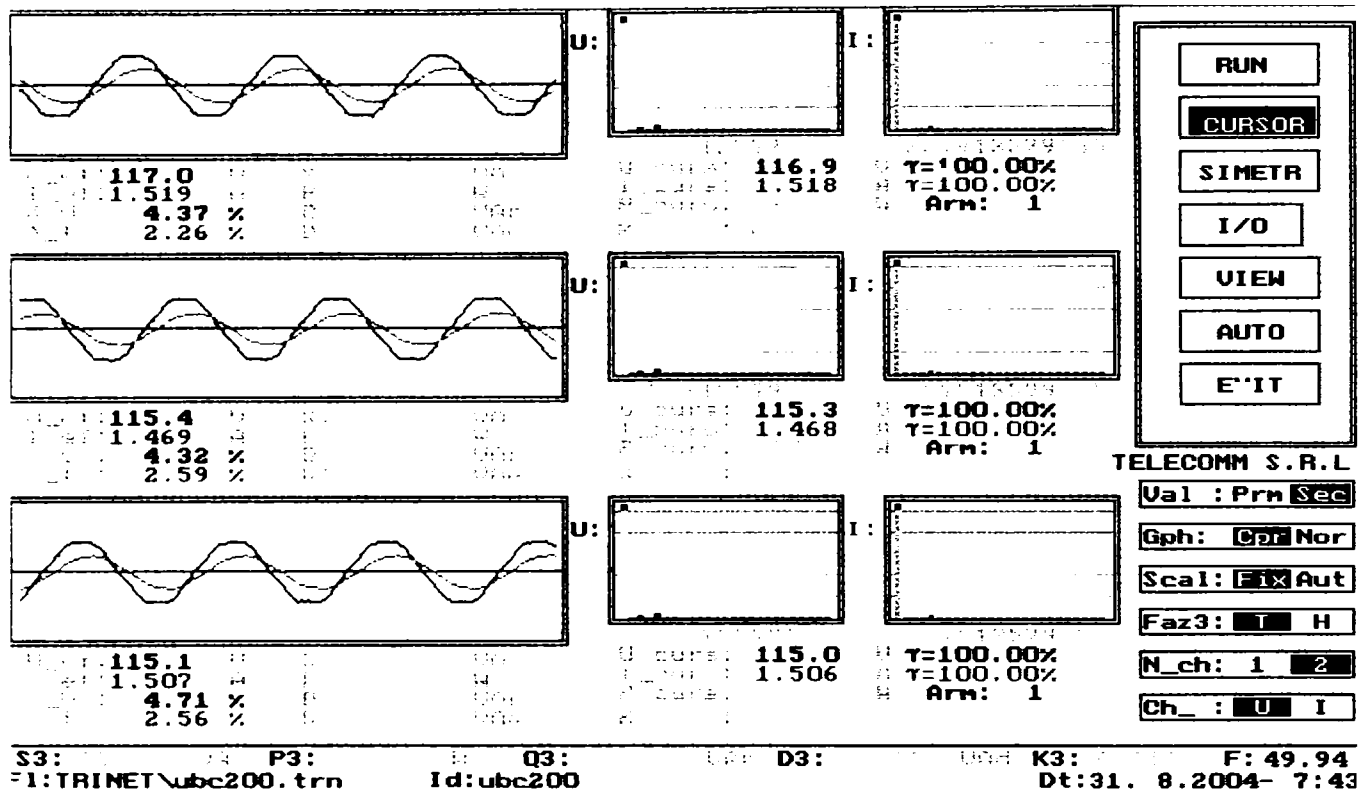


Fig. 6.9 Curbele tensiunilor și curenților la începutul liniei compensate, $K_C = 1,05$.

Figura 6.10 prezintă variația puterii active la bornele consumatorului în funcție de tensiunea de alimentare a modelului și gradul de compensare al reactanței liniei. Se observă că, puterea activă crește odată cu creșterea tensiunii de alimentare și a gradului de compensare al liniei; pentru tensiunea de alimentare a modelului de 200V la un grad de compensare de 1,05 puterea activă la bornele consumatorului crește cu 16,33%, iar pentru $K_C = 2,1$ creșterea este de 36,34%, față de cazul liniei necompensate.

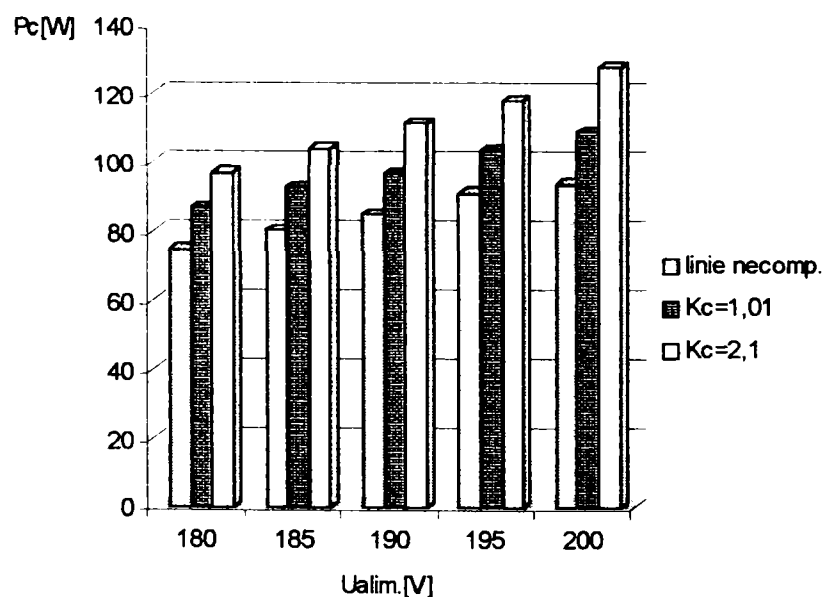


Fig. 6.10. Valorile puterii active absorbite de consumator în funcție de tensiunea de alimentare a modelului, pentru linia compensată și necompensată

Pentru a evidenția influența sarcinii asupra efectului compensării serie, consumatorul s-a considerat:

- pur rezistiv, modelat prin rezistențe de 80Ω ;
- inductiv, modelat prin bobine cu reactanța de 110Ω ;

- c) capacitiv modelat prin condensatoare având capacitatea de $11,25\mu F$ în paralel cu rezistențe de 80Ω ;
- d) inductiv, cu factorul de putere $\cos\varphi=0,84$;

Tabelul 6.1. Valorile tensiunilor la bornele consumatorului pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare și tipuri de consumatori, în cazul liniei compensate și necompensate.

$U_{f\text{cons}}[\text{V}]$	Consumator pur inductiv ($\cos\varphi = 0$)		Consumator pur rezistiv		Consumator inductiv ($\cos\varphi = 0,84$)		Consumator capacitiv	
	$K_c=0$	$K_c=2,1$	$K_c=0$	$K_c=2,1$	$K_c=0$	$K_c=2,1$	$K_c=0$	$K_c=2,1$
103,2	87,57	112	82,65	78,7	73,61	86,66	84,5	76,38
110	92,36	119,9	87,93	82,94	78,33	92,74	90,63	80,68
115,4	98,27	125,4	92,97	88,71	82,25	98,11	95,72	84,91

Analizând rezultatele din tabel 6.1 se constată următoarele:

- compensarea capacitivă serie în cazul unui consumator cu caracter capacitiv conduce la scăderea tensiunii la bornele consumatorului. Rezultă că, în cazul unei supracompensării ale puterii reactive absorbită de consumator, compensarea capacitivă serie are efecte negative asupra tensiunii la bornele acestuia.
- scăderea tensiunii la bornele consumatorului are loc și în cazul în care acesta are un caracter pur rezistiv. Deci, compensarea capacitivă serie nu se va utiliza în cazul în care factorul de putere al consumatorului este mai mare de 0,9 - 0,95.
- pentru consumatorul care absoarbe atât putere activă cât și reactivă, având $\cos\varphi = 0,84$, tensiunea la bornele acestui crește prin compensarea reactanței liniei; pentru tensiunea de alimentare de fază de 115,4V, la $K_C = 1,05$, tensiunea la bornele consumatorului crește cu 7,27% față de cazul liniei necompensate și cu 19,28% pentru $K_C = 2,1$;
- pentru liniile electrice ce alimentează consumatori cu caracter pur inductiv compensarea capacitivă serie are cel mai mare efect asupra creșterii tensiunii la bornele consumatorilor. Tensiunea la bornele consumatorului crește la o valoare mai mare decât tensiunea de alimentare; pentru un grad de compensare de 2,1 și tensiunea de alimentare a modelului de 115,4V creșterea tensiunii la bornele consumatorului este de 27,6% față de cazul liniei necompensate. Rezultă că, compensarea capacitivă serie este eficientă să se utilizeze la linii ce alimentează consumatori cu factor de putere scăzut. Totuși, în practică [C25] compensarea capacitivă serie nu se folosește pe linii unde factorul de putere este mai mic de 0,75 datorită pierderilor de putere pe acestea.

În cazul în care consumatorul inductiv este prevăzut cu instalație de compensare a puterii reactive $K_Q = 0,389$, la tensiunea de alimentare a modelului de 115,4, tensiunea la bornele consumatorului crește cu 5,93% față de cazul în care lipsește compensarea capacitivă transversală. Dacă linia ce alimentează consumatorul este prevăzută cu compensare capacitivă serie tensiunea la bornele acestuia va crește cu 19,21% față de cazul precedent și totodată crește și puterea activă la bornele consumatorului.

Referitor la distorsiunea curbei de curent și tensiune se fac următoarele precizări: tensiunea de alimentare a modelului prezintă armonici care există în rețeaua de alimentare a facultății, dar și datorită autotransformatorului ce alimentează modelul, care funcționează la sarcină redusă. O altă sursă de armonici o reprezintă bobinele cu miez feromagnetic din model. Prezența armonicilor de rang 3, 5, 7, 9, având un nivel ridicat, confirmă faptul că ele sunt cauzate de curentul de magnetizare al miezului feromagnetic al autotransformatorului și a bobinelor cu miez feromagnetic din model [C16].

Ținând seama de cele menționate mai sus, în continuare se va analiza atât influența pe care o are bateria de condensatoare serie asupra nivelelor armonice ale tensiunii și curentului la bornele consumatorului cât și cea a caracterului acestuia.

În figurile 6.11 și 6.12 s-au reprezentat factorul de distorsiune al tensiunii și a curentului la bornele consumatorului, pentru diferite tipuri de consumatori, când linia este prevăzută cu compensare serie, respectiv fără compensare.

În figurile 6.13÷6.20, 6.22, 6.23, s-au reprezentat nivelele armonice ale tensiunii și curentului la bornele consumatorului. Nivelul tensiunii și curentului pe fundamentală este de 100% și de aceea s-a evitat să se reprezintă întreg spectrul de armonici pentru că nu se mai evidențiază influența compensării capacitive serie asupra acestora.

Considerând consumatorul rezistiv (R), din figurile 6.11 și 6.12 se observă că pentru linia fără compensare, factorul de distorsiune al tensiunii și curentului la bornele consumatorului sunt mai mici decât pentru linia cu compensare. Diferența mai mare apare la factorul de distorsiune al tensiunii și aceasta datorită faptului că prin compensarea capacitivă serie se reduce căderea de tensiune armonică pe linie, la armonici de rang inferior ($k < 10$). Din figura 6.13 se observă că nivelele armonice ale tensiunii la bornele consumatorului sunt mai mari pentru linia cu compensare. Micșorându-se reactanța liniei pe armonicile de rang inferior, bineînțeles că va crește curentul pe aceste armonici, (fig. 6.14).

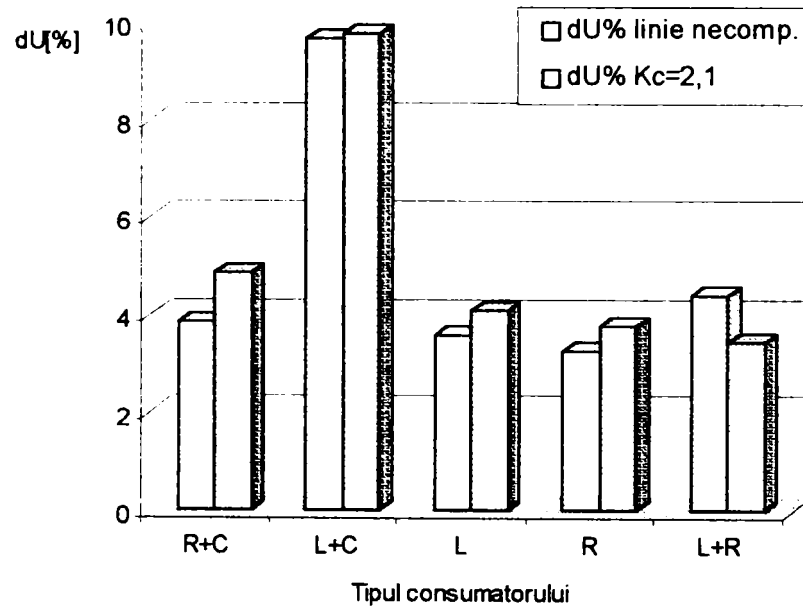


Fig.6.11 Valorile factorului de distorsiune al tensiunii la bornele consumatorului pentru linia fără compensare și pentru linia compensată ($K_C = 2,1$).

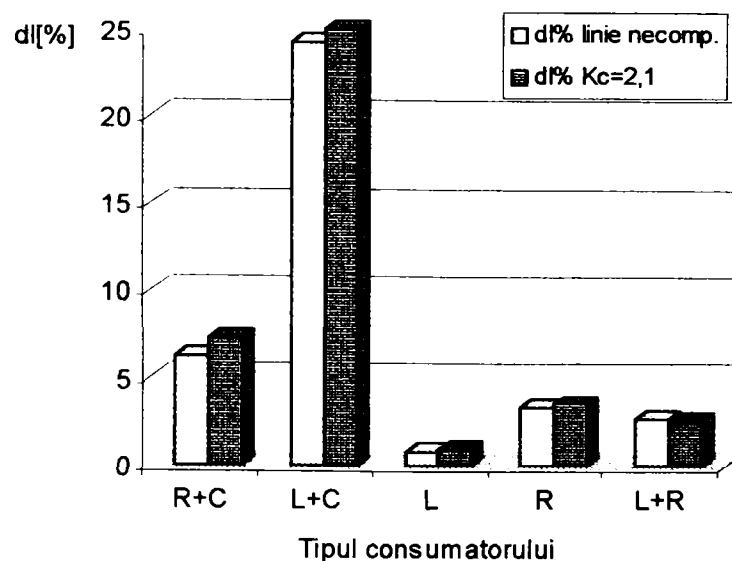


Fig.6.12 Valorile factorului de distorsiune al curentului absorbit de consumator, pentru linia fără compensare și linia compensată ($K_C = 2,1$).

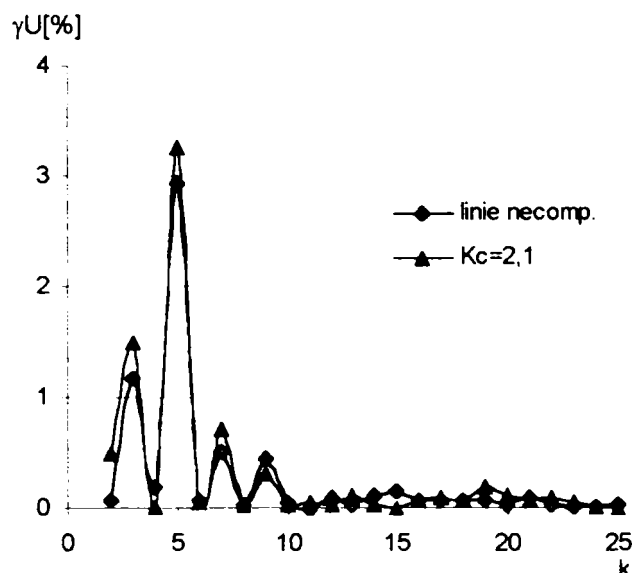


Fig. 6.13. Valorile nivelului armonicilor de tensiune la bornele consumatorului rezistiv

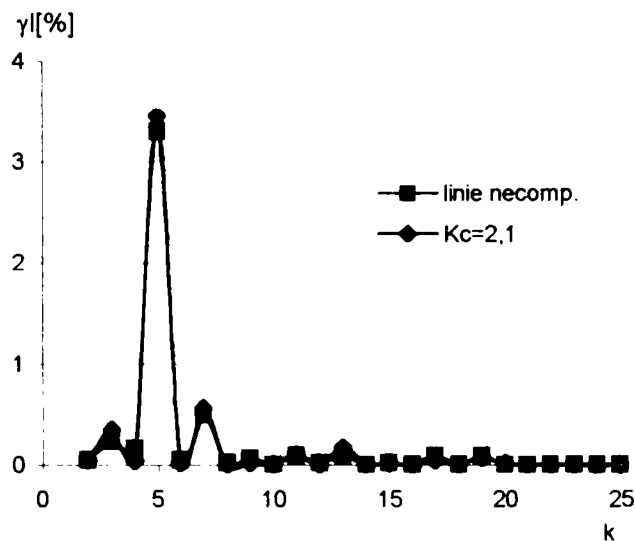


Fig. 6.14. Valorile nivelului armonicilor de curent absorbit de un consumator rezistiv

Pentru consumatorul inductiv, modelat numai prin reactanțe, impedanța armonică a acestuia este mult mai mare decât impedanța liniei. Prin urmare, nivelul armonicilor de tensiune și de curent la bornele consumatorului este dictat de aceasta. Pentru armonicile inferioare tensiunea la bornele consumatorului este puțin mai mare în cazul liniei cu compensare capacitivă față de linia fără compensare (fig. 6.11 și fig. 6.15). Din figura 6.16 se observă că pe armonica de rang 3, curentul are o valoare mai mare în cazul compensării capacitive serie; aceasta poate fi explicată prin saturația miezului bobinei consumatorului.

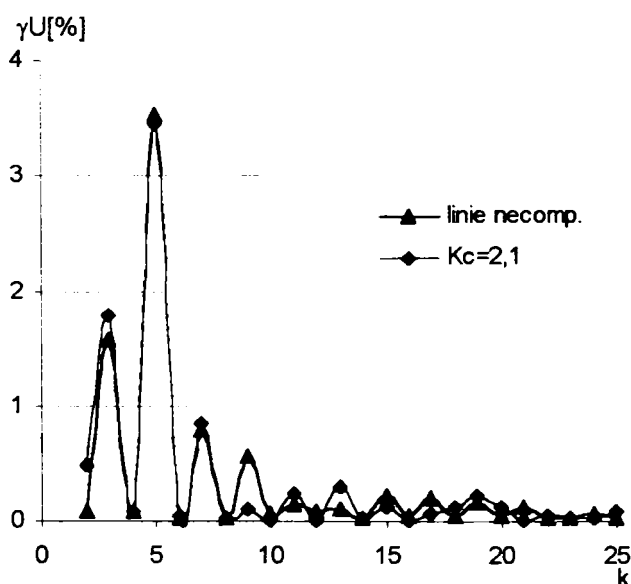


Fig. 6.15. Valorile nivelului armonicilor de tensiune la bornele consumatorului inductiv

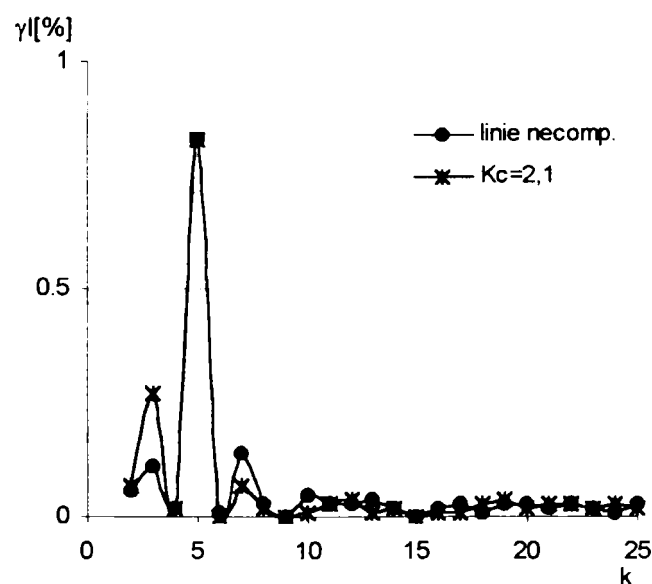


Fig. 6.16. Valorile nivelului armonicilor de curent absorbit de un consumator inductiv

Se cunoaște că, bateriile de condensatoare folosite pentru îmbunătățirea factorului de putere la consumator nu sunt surse de armonici, dar contribuie la amplificarea acestora. În studiul influenței consumatorului asupra nivelelor armonicilor s-a considerat un caz particular când consumatorul are un caracter capacitiv. Din figurile 6.11 și 6.12 se observă că factorul de distorsiune al curbei de curent, respectiv de tensiune este mai mare decât în cazurile discutate anterior chiar și pentru linia fără compensare. Calculând impedanța armonică „văzută” de la bornele de alimentare ale modelului se constată că pe armonica de rang 5 apare o rezonanță serie, ceea ce determină o amplificare a curentului pe această armonică. Amplificarea

curentului va conduce și la o creștere a tensiunii pe armonici. Prin compensarea capacitivă serie crește curentul pe linie și tensiunea la bornele consumatorului. Se observă din figurile 6.17 și 6.18 creșterea nivelului armonic al tensiunii și al curentului la bornele consumatorului. De exemplu, nivelul armonicii curentului pe armonica de rang 5 crește cu 16,18% față de linia fără compensare.

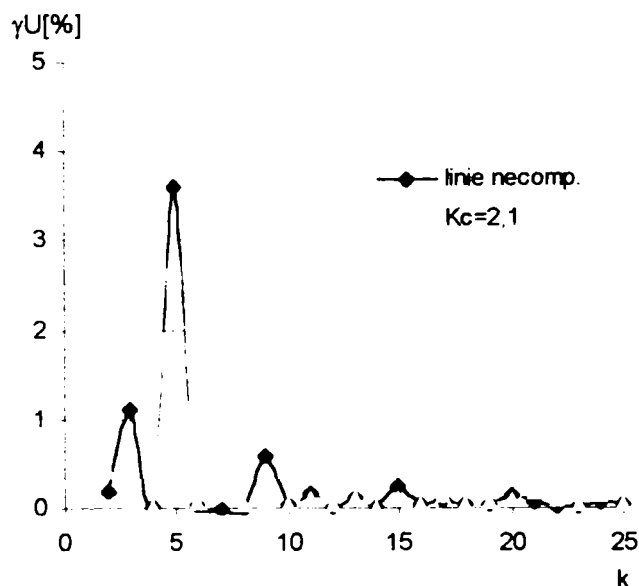


Fig.6.17. Valorile nivelului armonicilor de tensiune la bornele consumatorului cu caracter capacitiv

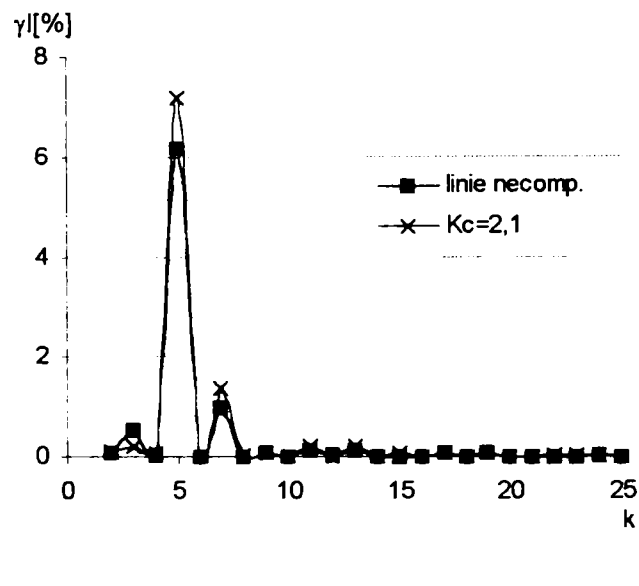


Fig.6.18. Valorile nivelului armonicilor de curent absorbit de un consumator capacitiv

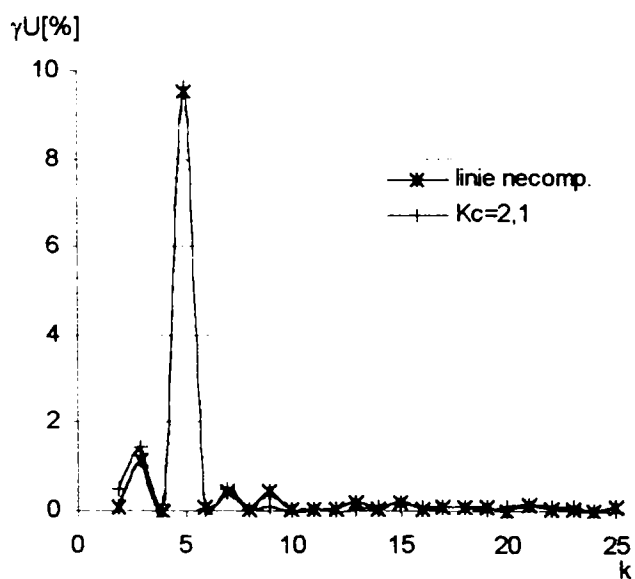


Fig.6.19. Valorile nivelului armonicilor de tensiune la bornele consumatorului inductiv, prevăzut cu compensare capacitivă derivație, $K_Q=0,389$

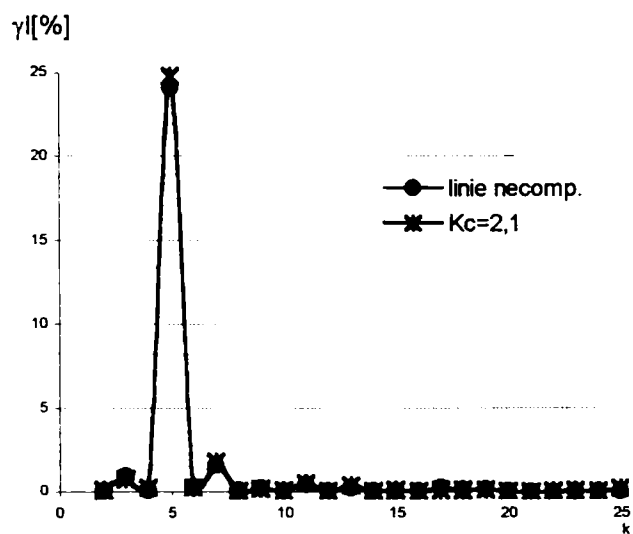


Fig.6.20. Valorile nivelului armonicilor de curent absorbit de un consumator inductiv, prevăzut cu compensare capacitivă derivație, $K_Q=0,389$

În cazul unui consumator pur inductiv, prevăzut la borne cu baterii de condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere, pe armonica de rang 5 apare o rezonanță serie, impedanța armonică la această frecvență are un caracter practic rezistiv și este aproximativ egală cu rezistența liniei. Pe această armonică apare o puternică amplificare a valorii curentului, determinată de prezența bateriei de condensatoare derivație. Nivelul armonic al curentului la această frecvență este de 24,14% pentru linia fără compensare și de 24,84% pentru linia cu compensare (fig. 6.20). Această amplificare a curentului armonic determină și o creștere a

tensiunii armonice la bornele consumatorului. Astfel, factorul de distorsiune al curbei de tensiune este de 9,66%, iar pentru curent este de 24,93%. Compensarea capacitivă serie influențează foarte puțin distorsiunea curbei de tensiune și de curent. Factorul de distorsiune al curbei tensiunii pentru linia cu compensare crește cu 1,14% față de linia fără compensare, iar cel de curent cu 2,93%. Puternica distorsiune a curbelor de tensiune și curent este determinată de existența curentului de magnetizare al miezurilor feromagnetice ale bobinelor și amplificată de condensatoarele derivație. În figura 6.21 sunt prezentate oscilogrammele curbelor de tensiune și de curent în cazul consumatorului inductiv prevăzut la borne cu o instalație de compensare capacitivă derivație, gradul de compensare a puterii reactive fiind de 0,389. Din această figură se observă puternica distorsiune a curbelor de curent și tensiune.

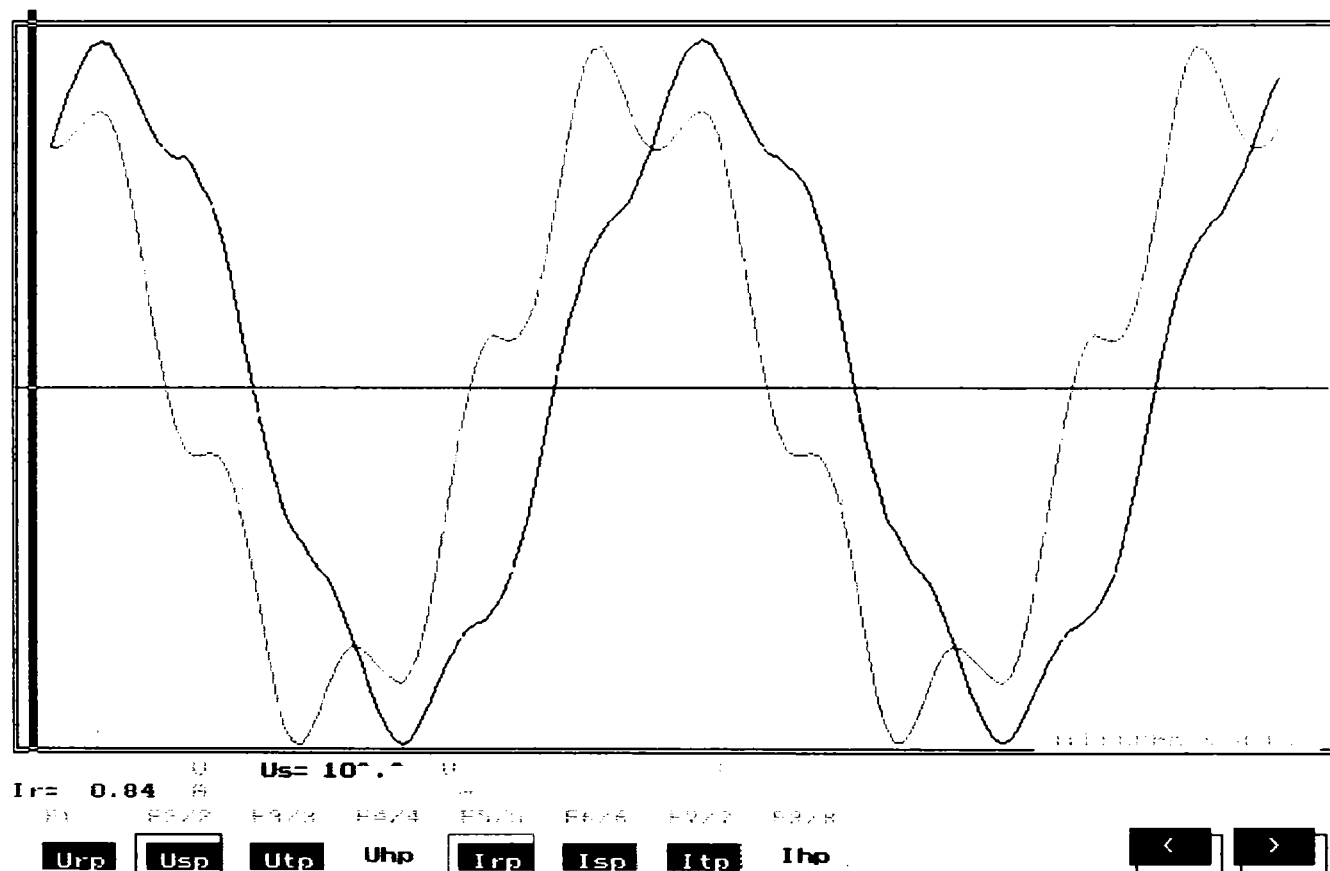


Fig.6.21. Oscilograma curbei de tensiune și curent la bornele consumatorului inductiv prevăzut cu compensare capacitivă a puterii reactive $K_Q=0,389$, când gradul de compensare al liniei este de 2,1.

În cazul consumatorului cu caracter inductiv, având factorul de putere de 0,84, valorile factorului de distorsiune al curbei de tensiune și cel al curbei de curent sunt mai mici în cazul liniilor prevăzute cu compensare capacitivă serie decât în cazul liniilor fără compensare (fig.6.11, fig.6.12). Este cunoscut faptul că rezistența consumatorului contribuie la reducerea semnificativă a distorsiunii armonice [C16]. Prin compensarea capacitivă serie crește curentul prin circuit și bineînțeles crește și curentul activ absorbit de consumator, ceea ce determină o reducere a distorsiunii curbei de tensiune și de curent. Din cele prezentate în figurile 6.22 și 6.23 se observă că nivelul armonicilor de tensiune și de curent sunt mai reduse decât în cazul consumatorului rezistiv. Tensiunea la bornele consumatorului cu caracter inductiv este în general mai mică decât în cazurile precedente și ca urmare, valoarea curentului prin bobine este mai mare fapt ce determină o limitare a saturației miezului acestora (Funcționarea bobinei cu întrefier se face în partea inferioară a caracteristicii magnetice).

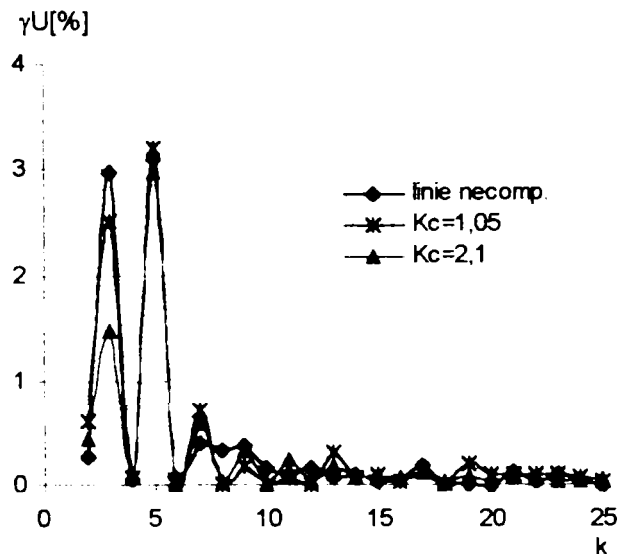


Fig.6.22. Valorile nivelului armonicilor de tensiune la bornele unui consumator inductiv

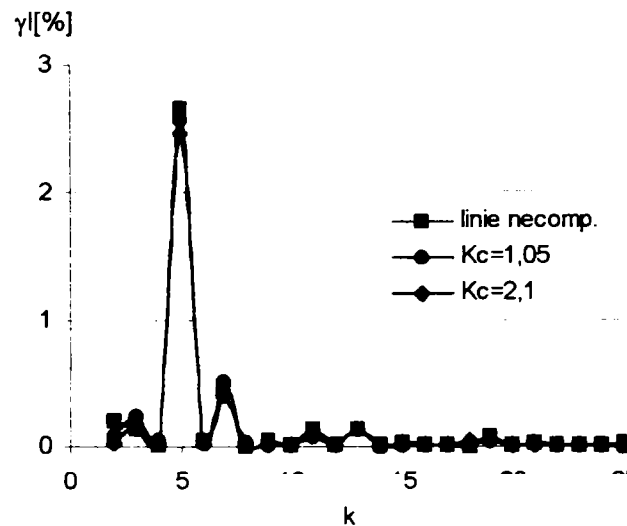


Fig.6.23. Valorile nivelului armonicilor de curent absorbit de un consumator inductiv

Pentru a determina supratensiunile pe bateria de condensatoare și la bornele consumatorului s-a considerat același model de rețea: linia modelată având lungimea de 44km , iar consumatorul modelat prin reactanțe de valoare $133,3\Omega$ și rezistența de 100Ω , ce absoarbe o putere de 5MVA la $\cos\varphi=0,8$. Conectarea și deconectarea bateriei de condensatoare s-a realizat prin deschiderea și închiderea unui întreruptor, în paralel cu bateria. Înregistrările tensiunilor și curenților s-au efectuat cu perturbograful digital CDR10 (Anexa 6.3). Semnalul de trigger s-a fixat pe intrarea analogică de tensiune la bornele bateriei de condensatoare.

Programul de măsurători a fost următorul:

- alimentarea modelului cu tensiune între faze de 200V , deschiderea întreruptorului de sântare a bateriei și efectuarea înregistrărilor;
- repetarea operațiilor de la punctul a) când se închide întreruptorul;
- conectarea și deconectarea liniei necompensate (întreruptorul închis);
- conectarea și deconectarea liniei prevăzută cu compensare, $K_C=1,05$, (întreruptorul deschis);
- conectarea și deconectarea liniei compensate cu un scurtcircuit simetric după bateria de condensatoare;
- considerarea unei rețele cu neutrul tratat prin rezistor, ($R=6,2\Omega$) și conectarea, respectiv deconectarea liniei compensate cu un scurtcircuit FN după bateria de condensatoare;
- pentru rețeaua cu neutrul tratat prin rezistor, conectarea și deconectarea liniei compensate cu un scurtcircuit 3FN după bateria de condensatoare.

a) Conectarea bateriei de condensatoare nu este sincronă, succesiunea introducerii condensatoarelor în circuit este faza S, R, T. Pe faza S condensatorul este introdus în circuit la trecerea prin maximul negativ al tensiunii, ceea ce conduce la o valoare maximă a supratensiunii pe bateria de condensatoare de $1,47U_{cf}$ la 5ms de la conectare. Supratensiunile pe celelalte două faze au valori mai reduse: $1,27U_{cf}$ faza R și $1,46U_{cf}$ faza T. Procesul tranzitoriu care apare la conectarea bateriei de condensatoare nu determină supratensiuni la bornele consumatorului (fig.6.24).

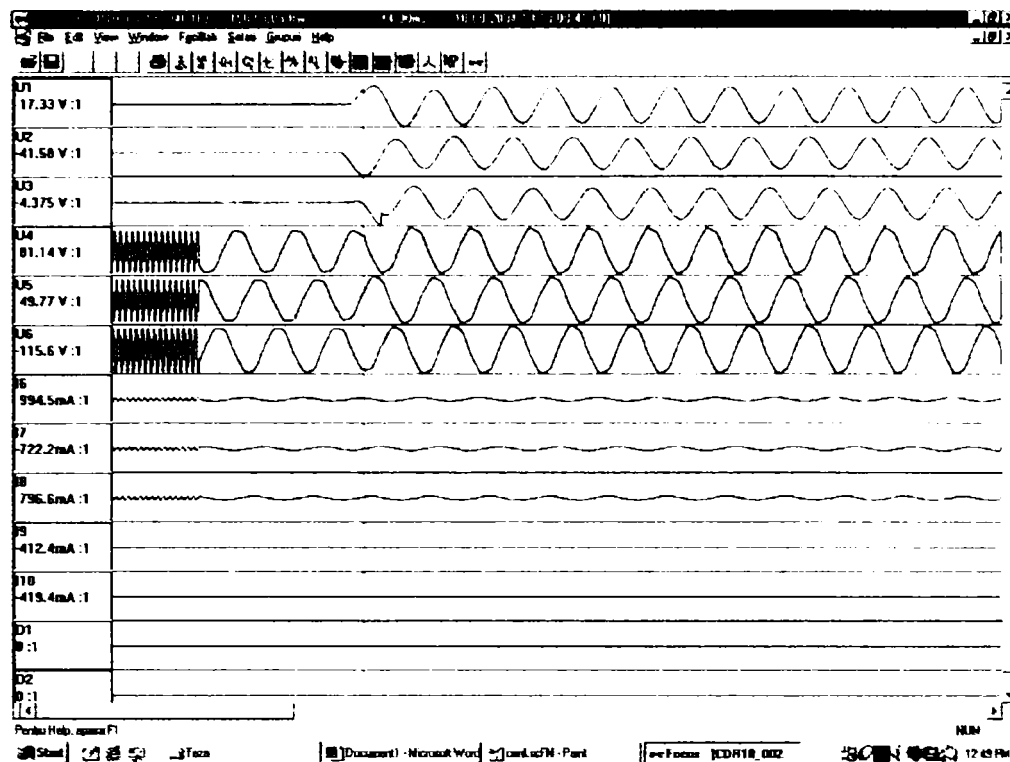


Fig. 6.24. Variațiile tensiunii la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului, la conectarea bateriei de condensatoare.

La fel ca și conectarea, deconectarea bateriei de condensatoare este nesincronă. Prin deconectarea bateriei de pe faza R apare un dezechilibru ce determină o creștere a tensiunii la bornele bateriei pe faza T de $1,097U_{cf}$.

La conectarea liniei cu un scurtcircuit trifazat după bateria de condensatoare se constată o creștere semnificativă a tensiunii pe bateria de condensatoare (fig.6.25). Astfel, coeficienții de supratensiune la bornele bateriei de condensatoare sunt: 4,9 pe faza R; 5,799 pe faza S și 5,209 pe faza T. Valoarea curentului de scurtcircuit trifazat după bateria de condensatoare este limitată de rezistența liniei (lungimea liniei este de 44km).

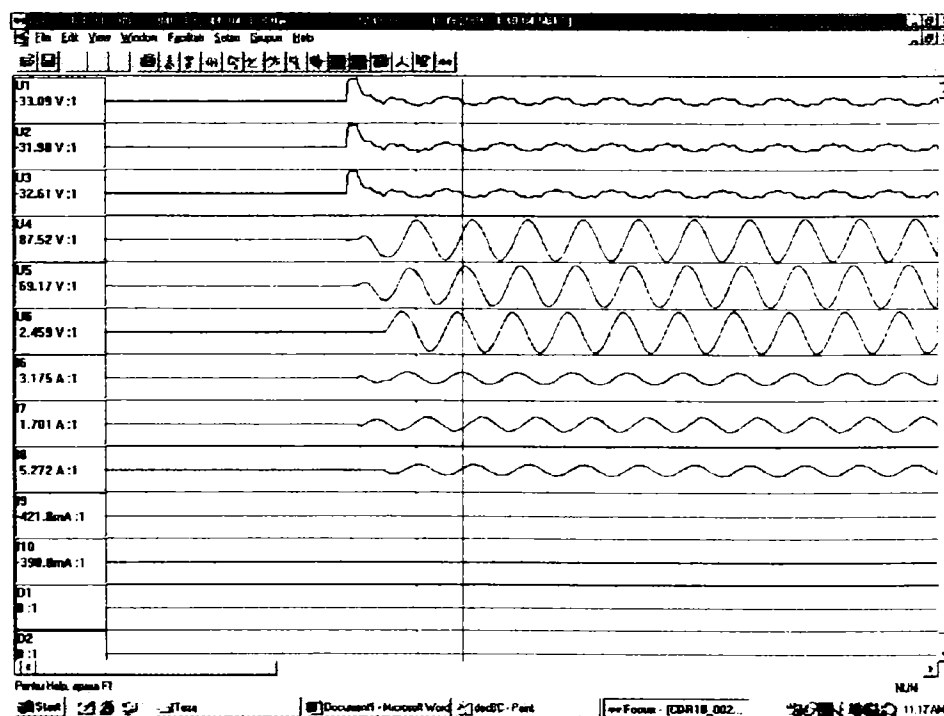


Fig. 6.25. Variațiile tensiunii la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului, respectiv a curentului prin circuit, la conectarea liniei cu un scurtcircuit simetric după bateria de condensatoare.

La un scurtcircuit 3FN după bateria de condensatoare valorile coeficienților de supratensiune sunt mai mici: 4,82 pe faza R, 5,48 pe faza S și 5,47 pe faza T, (fig. 6.26).

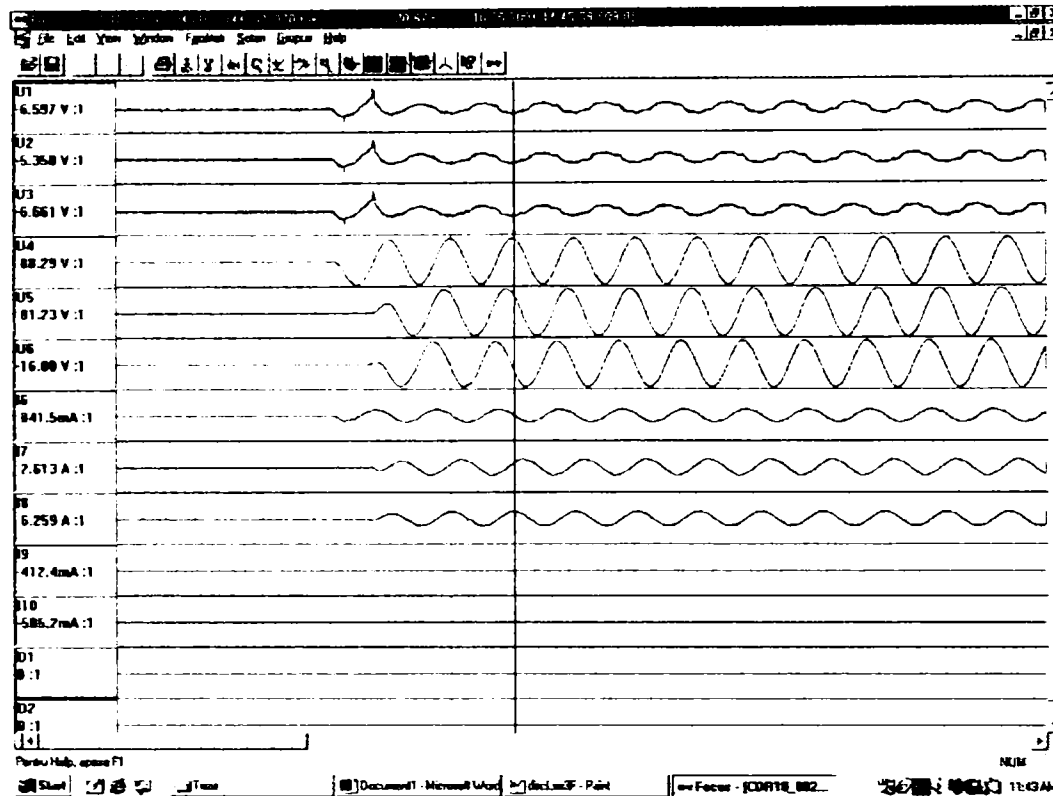


Fig. 6.26. Variațiile tensiunii la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului și a curentului prin circuit, la conectarea liniei prezentând un scurtcircuit simetric după bateria de condensatoare.

La conectarea liniei prevăzută cu compensare capacitivă serie, cu un scurtcircuit FN pe faza T, după bateria de condensatoare apar supratensiuni de valori semnificative la bornele bateriei de condensatoare, pe fazele sănătoase ($K=2,56$ pe faza R și $K=2,54$ pe faza S) (fig.6.27). Pe faza T, datorită curentului de scurtcircuit de valoare mare coeficientul de supratensiune la bornele bateriei de condensatoare este de 4,89.

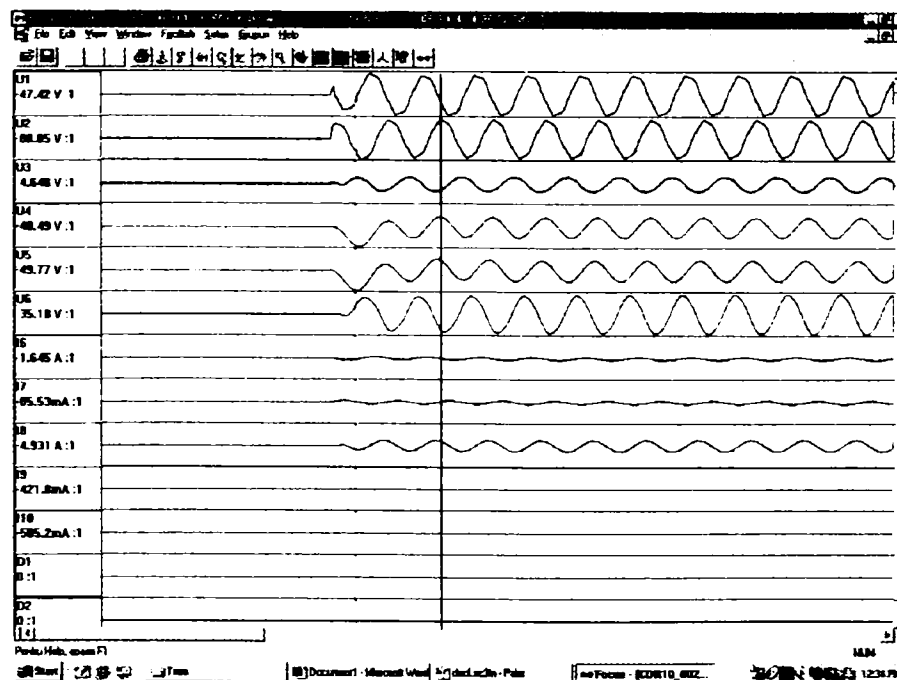


Fig. 6.27. Variațiile tensiunii la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului și a curentului prin circuit, la conectarea liniei prezentând un scurtcircuit FN după bateria de condensatoare.

La deconectarea liniei cu defect trifazat sau monofazat după bateria de condensatoare nu apar supratensiuni (Anexa 5).

Înregistrările efectuate, pe modelul de rețea, în laborator confirmă cele arătate în capitolul 5 că la scurtcircuite după bateria de condensatoare apar supratensiuni de valori mari la bornele acesteia. Se menționează că neglijând capacitățile liniei (fiind de valori reduse) procesele tranzitorii care apar la conectare și deconectare sunt aperiodice, lipsește componenta oscilantă.

6.2. Măsurători în rețea

Pentru a arăta necesitatea compensării liniilor electrice aeriene de medie tensiune, având lungimi mari, s-au efectuat măsurători pe o linie electrică de $82,5\text{km}$, obținută prin buclarea a patru linii de 20kV din rețelele de distribuție ale SC. ELECTRICA SA Timișoara, și anume LEA Urseni- LEA Silagiu-LEA Bacova – LEA Surgani. Măsurătorile s-au efectuat în patru posturi de transformare repartizate în lungul liniei și în stația Fratelia, la începutul liniei. În stația Fratelia s-au înregistrat tensiunile și curenții pe linie cu perturbograful digital CDR10ST. În postul de transformare Com. Albina s-au efectuat înregistrări cu TRINET-ul, iar în celelalte trei posturi de transformare s-au măsurat tensiunea, curentul și factorul de putere pe faza S. Posturile de transformare în care s-au efectuat măsurătorile sunt: Sacosu Com. la distanța de $20,45\text{km}$ de începutul liniei, Bacova Sat la distanța de $46,069\text{km}$, Com. Albina la distanța de $60,25\text{km}$ și la sfârșitul liniei în postul IAS Blocuri Recaș. S-au efectuat 7 măsurători pentru diferite valori ale tensiunii la începutul liniei obținute prin modificarea numărului de ploturi ale transformatorului din stație. Pe baza informațiilor furnizate de SC. Electrica S.A despre încărcarea transformatoarelor din posturile de transformare, lungimile liniilor, secțiunilor conductoarelor precum și a mărimilor măsurate la începutul liniei s-a creat o bază de date cu ajutorul căreia s-a determinat tensiunile și puterile absorbite în nodurile rețelei. Ramificațiile care pleacă de la fiderul principal s-au considerat ca și consumatori racordați în nodurile rețelei. Pentru calculul tensiunilor în noduri și ale puterilor absorbite, precum și a locului de amplasare a bateriei de condensatoare și a valorii reactanței acesteia s-a creat un program de calcul în PASCAL. Valoarea reactanței bateriei de condensatoare s-a determinat din condiția ca suma pătratelor abaterii tensiunii în nodurile rețelei să fie minimă. În anexa 4 sunt prezentate înregistrările efectuate cu CDR10ST pe linia LEA Urseni ce pleacă din stația Fratelia, înregistrările efectuate cu TRINET-ul în postul de transformare Com. Albina, caracteristicile transformatoarelor din posturi și din stația Fratelia, baza de date folosită la calculul tensiunilor și puterilor în nodurile rețelei. În anexa 6.2 este prezentat programul de calcul a tensiunilor și a puterilor înainte de compensare și după compensare.

În tabelul 6.2 sunt prezentate valorile puterilor active, reactive, curentul și tensiunea pe barele de MT ale stației Fratelia la modificarea numărului de ploturi ale transformatorului din stație, în condițiile în care tensiunea pe bara 110kV este constantă, de valoare 113kV .

Tabelul 6.2 Mărimile măsurate pe bara de MT a stației Fratelia

Nr. plot	P [MW]	Q [MVar]	U_{MT} [kV]	I [A]	p[%]
2	13,4	2	19,7	410	+ 8 x 1,78
3	13,8	2,1	20,04	415	+ 7 x 1,78
4	14	2,35	20,1	418	+ 6 x 1,78
5	14,4	2,8	20,2	425	+ 5 x 1,78
6	14,75	3	20,5	430	+ 4 x 1,78
7	14,8	3,2	20,9	435	+ 3 x 1,78
8	15	3,85	21,2	430	+ 2 x 1,78

În tabelele 6.3, 6.4 și 6.5 sunt prezentate valorile tensiunii, curentului și unghiul de defazaj măsurate pe baza cărora s-au calculat factorul de putere și puterile active și reactive absorbite de

consumatori din posturi de transformare Sacoșu Com, Bacova Sat și IAS Blocuri Recaș. Măsurătorile s-au efectuat la barele de joasă tensiune ale posturilor de transformare.

Tabelul 6.3 Mărimi măsurate și calculate în postul de transformare Sacoșu Com.

U_r [V]	I [A]	φ	$\cos\varphi$	P_{c_f} [W]	Q_{c_f} [VAR]
206.2	90	22	0.927183855	17206.68	6951.95
209	92	19	0.945518576	18180.43	6260.02
210	90	20	0.939692621	17760.19	6464.18
213	88	20	0.939692621	17613.59	6410.83
216.5	87	15	0.965925826	18193.69	4874.98
219.8	89	18	0.951056516	18604.76	6045.05
223	101	23	0.920504853	20732.53	8800.43

Tabelul 6.4 Mărimi măsurate și calculate în postul de transformare Bacova Sat

U_r [V]	I [A]	φ	$\cos\varphi$	P_{c_f} [W]	Q_{c_f} [VAR]
205	21.4	17.4	0.954240	4186.25	1311.89
207	21	16.5	0.958819	4167.99	1234.61
209.1	25	23.1	0.919821	4808.37	2050.94
212	26.5	23	0.920504	5171.39	2195.13
215	25.6	25.3	0.904082	4976.07	2352.18
219	24.8	23.5	0.917060	4980.74	2165.68
222	25.9	22.5	0.923879	5312.12	2200.35

Tabelul 6.5 Mărimi măsurate și calculate în postul de transformare IAS Blocuri Recaș

U_r [V]	I [A]	φ	$\cos\varphi$	P_{c_f} [W]	Q_{c_f} [VAR]
192	21.9	8.4	0.989272	4159.69	614.25
194.8	23.4	9.2	0.987136	4499.68	728.79
195	27	19.2	0.944376	4972.14	1731.48
198	26.1	17.7	0.952661	4923.16	1571.18
201	25.8	15.2	0.965016	5004.38	1359.66
205	24.6	9.6	0.985996	4972.38	841.01
208	23.8	9	0.987688	4889.45	774.41

Din tabelul 6.5 se observă că la valoarea tensiunii de 19,9kV pe bara de MT a stației de distribuție, tensiunea în ultimul post de transformare alimentat de linia electrică este de 16,707kV, iar pentru valoarea tensiunii pe bara stație de 21,2kV, în același post tensiunea este de 18,1kV. Pierderea de tensiune pe fider este de aproximativ 3kV. Rezultă că pentru a îmbunătăți profilul tensiunii în lungul liniei este necesară compensarea căderii de tensiune.

După cum s-a precizat anterior, ramificațiile care pleacă de la fiderul principal s-au echivalat prin consumatori, ținându-se seama de pierderile de putere activă și reactivă în posturile de transformare și pe liniile de alimentare ale acestora. Rețeaua de distribuție s-a redus astfel la un fider care alimentează 45 de consumatori racordați în lungul liniei (fig.1 Anexa 6.1). Baza de date conține curenții activi și reactivi absorbiți de consumatori, rezistențele și reactanțele tronsoanelor dintre nodurile de consum (tabelul.A.6.1 Anexa 6.1). Aceasta s-a creat pentru cazul în care tensiunea pe bara de MT a stației este de 20,04kV și puterile la începutul liniei sunt de 2,512MW și 0,867MVAR. Rețeaua s-a considerat simetrică și echilibrată.

În urma efectuării calculelor s-au obținut valorile tensiunilor în noduri, puterile active și reactive absorbite fiind consemnate în tabelul 6.6. Comparând valorile măsurate în cele 4 posturi de transformare cu cele rezultate din calcule, erorile obținute sunt: de 1,9% în postul IAS Blocuri Recaș, 1,8% în postul Com Albina și de 0,76% în postul Bacova Sat. Din condiția ca suma pătratelor abaterii tensiunii în nodul de consum să fie minimă a rezultat reactanța bateriei de condensatoare de valoare 44,966Ω. Locul optim de amplasare a bateriei de condensatoare pentru care s-a obținut cea mai mică valoare a sumei pătratelor abaterilor tensiunii în nodul de consum (5,99%) este nodul 12. Tensiunile în nodurile de consum după compensare, când bateria este amplasată în nodul 12 sunt trecute în penultima coloană din

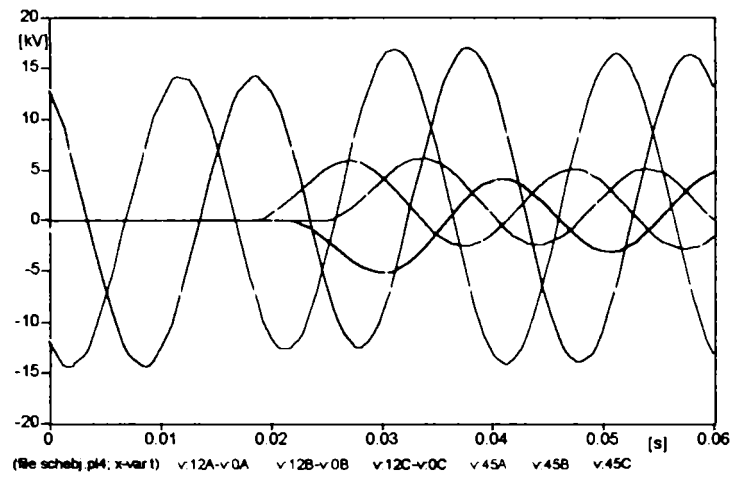


Fig.6.28. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului de la sfârșitul liniei la conectarea bateriei .

La deconectarea bateriei de condensatoare după cum se observă din figura 6.29 nu apar supratensiuni la bornele consumatorilor,

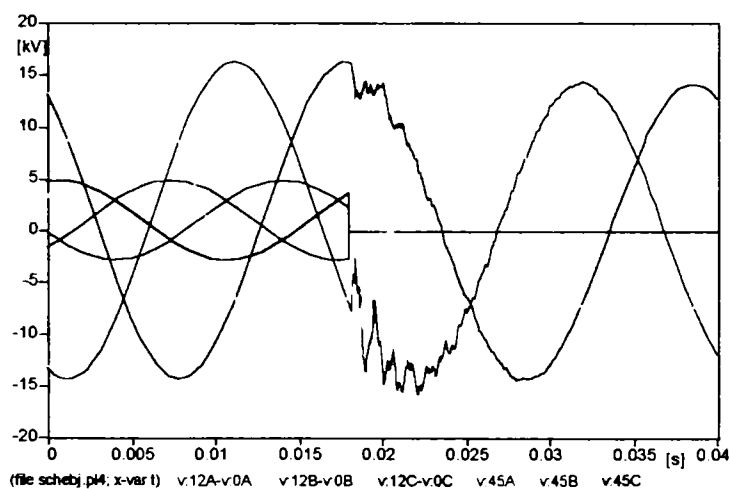


Fig.6.29. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului de la sfârșitul liniei la deconectarea bateriei .

În cazul unui scurtcircuit simetric imediat după bateria de condensatoare la bornele acesteia apare o supratensiune de valoare semnificativă. Coeficientul de supratensiune maxim pe faza T are valoarea de 7,1 (scurtcircuitul apare la trecere prin maximul negativ al tensiunii bateriei de condensatoare, pe faza T), (fig. 6.30).

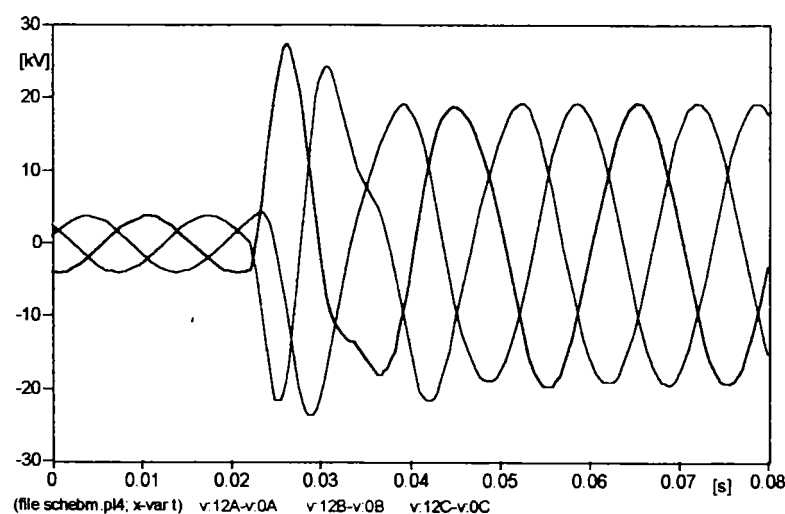


Fig.6.30. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare la un scurtcircuit simetric.

Așa cum s-a arătat în capitolul 3 locul de amplasare și valoarea reactanței bateriei de condensatoare depind de tensiunea de la începutul liniei. Folosirea a două instalații de compensare pentru îmbunătățirea profilului tensiunii în lungul liniei este mult mai costisitoare și din acest motiv, pentru a obține tensiuni în noduri cât mai apropiate de valoarea nominală se poate folosi o instalație de compensare dacă tensiunea la începutul liniei este mai mare decât tensiunea nominală.

6.3. Simulări în ATP

Pe baza rezultatelor obținute din programul de calcul al tensiunilor și al puterilor în noduri "Tensiuni" s-a modelat în ATP rețeaua de distribuție trifazată, considerată simetrică și echilibrată. S-a considerat că stația de distribuție este racordată la un sistem de putere infinită, care menține constantă tensiunea pe barele de $110kV$, la valoarea de $113kV$. Cunoscând puterile active și reactive pe barele de medie tensiune ale stației, s-au echivalat toate plecările din această stație, cu excepția liniei studiate, cu un consumator trifazat, modelat prin impedanțe în conexiune Y. Pe bara de medie tensiune a stației este racordată o baterie de condensatoare de putere $2,4MVA_r$ pentru compensarea puterii reactive, care s-a modelat prin capacități de $19,108\mu F$, în conexiune stea. Transformatorul din stație are puterea nominală de $25MVA$ și conexiunile înfășurărilor $Y0/\Delta$. Rețeaua de distribuție este cu neutrul tratat prin rezistor de limitare; bobina de creare a neutrului artificial are impedanța homopolară de $(10,5 + j24,4)\Omega$, iar valoarea rezistenței rezistorului este de 36Ω . Pentru reprezentarea în ATP a transformatorului din stație și a tronsoanelor liniei studiate s-au folosit modelul BCTRAN, respectiv modelele LCC – linii cu parametrii constanți. În modelul transformatorului s-au introdus și capacitățile înfășurărilor față de pământ calculate cu relațiile (5.1) și (5.2). Rezultatele obținute pentru tensiunile în noduri sunt apropiate de cele obținute prin calcul, diferențele mici care apar sunt datorate luării în considerare și a capacităților tronsoanelor de linie. Pentru conectarea și deconectarea bateriei de condensatoare, respectiv a liniei s-au folosit întreruptoare ideale comandate în timp.

Bateria de condensatoare serie s-a modelat prin capacități de $66\mu F$, care fizic poate fi realizată folosind condensatoare trifazate de tip MODULO 25, uscate, realizate din folie polipropilenă metalizată, având următoarele caracteristici: $U_n = 450V$, $Q_n = 29,5kVA_r$, $C_n = 3 \times 154\mu F$ și conexiunea triunghi. Pentru a realiza bateria de condensatoare sunt necesare 12 unități pe fază (două ramuri în paralel, formate din 6 condensatoare inserate).

Scopul modelării rețelei este de a determina supratensiunile care apar pe bateria de condensatoare și de a arăta influența pe care o are aceasta asupra valorilor supratensiunilor din rețea, datorate manevrelor și defectelor pe linie. În acest sens, s-au simulat:

- conectarea și deconectarea baterie de condensatoare;
- scurtcircuit trifazat imediat după bateria de condensatoare;
- scurtcircuit monofazat imediat după bateria de condensatoare;
- deconectarea liniei la un scurtcircuit trifazat, când bateria de condensatoare este protejată cu MOV;
- deconectarea liniei la un scurtcircuit monofazat, când bateria de condensatoare este protejată cu MOV;

La conectarea bateriei de condensatoare apar supratensiuni la bornele acesteia. Coeficientul de supratensiune pe faza T are valoarea de 1,6, iar pe celelalte faze valorile supratensiunilor sunt mult mai mici. Valoarea supratensiunii la bornele bateriei depinde de momentul deschiderii întreruptorului de șuntare. La bornele consumatorului nu apar supratensiuni, după amortizarea componentei aperiodice iau valoarea tensiunii este de $18,753kV$, (fig. 6.28).

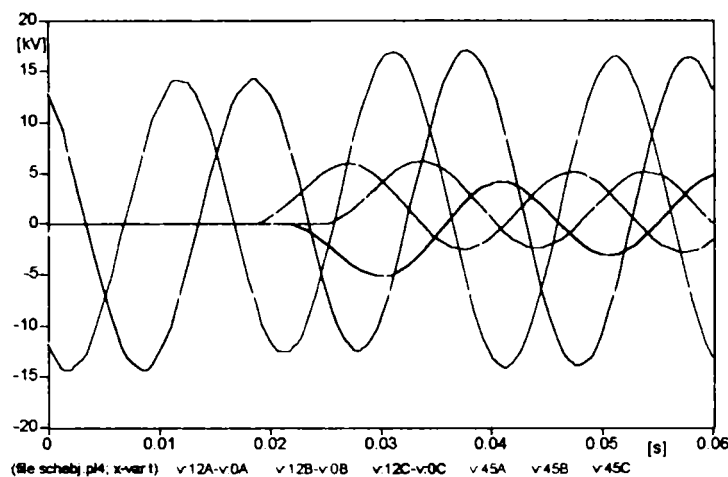


Fig.6.28. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului de la sfârșitul liniei la conectarea bateriei .

La deconectarea bateriei de condensatoare după cum se observă din figura 6.29 nu apar supratensiuni la bornele consumatorilor,

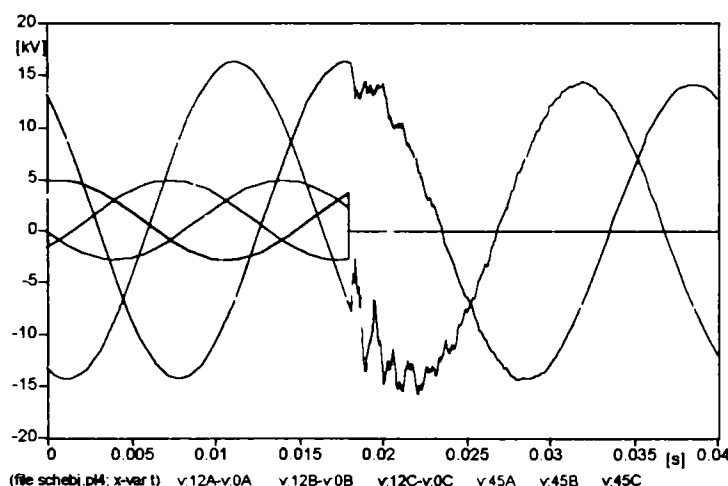


Fig.6.29. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare și ale consumatorului de la sfârșitul liniei la deconectarea bateriei .

În cazul unui scurtcircuit simetric imediat după bateria de condensatoare la bornele acesteia apare o supratensiune de valoare semnificativă. Coeficientul de supratensiune maxim pe faza T are valoarea de 7,1 (scurtcircuitul apare la trecere prin maximul negativ al tensiunii bateriei de condensatoare, pe faza T), (fig. 6.30).

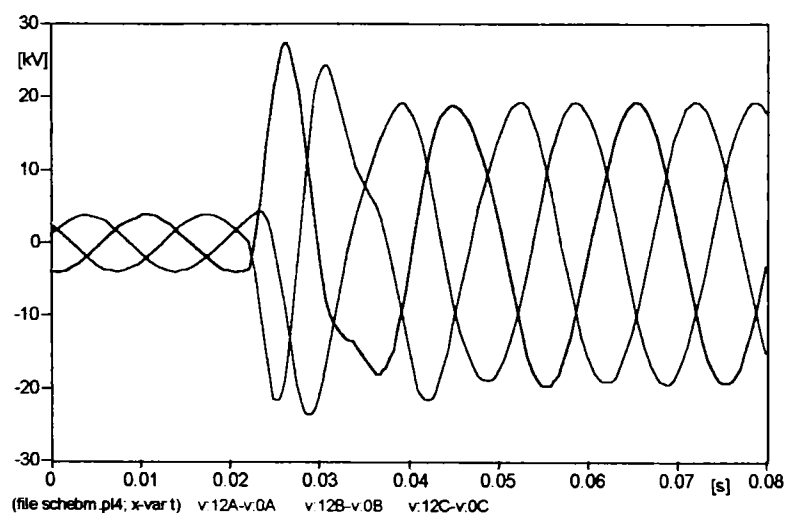


Fig.6.30. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare la un scurtcircuit simetric.

Pentru protecția bateriei de condensatoare în derivație cu aceasta s-a prevăzut o baterie de varistoare formată din 6 elemente în paralel, de tip AC4000-NSC, cu următoarele caracteristici: tensiunea de funcționare continuă $3200V$, $U_n = 4000V$, $I_{8/20\mu s} = 5kA$, $I_{max} = 65kA$, $I_{2000\mu s} = 200A$. În aceste condiții tensiunea pe bateria de condensatoare este limitată la valoarea $1,2U_{BC}$, iar pentru a proteja varistoarele după $18ms$ de la apariția defectului este acționat întreruptorul de șuntare a instalației de compensare, (fig. 6.31).

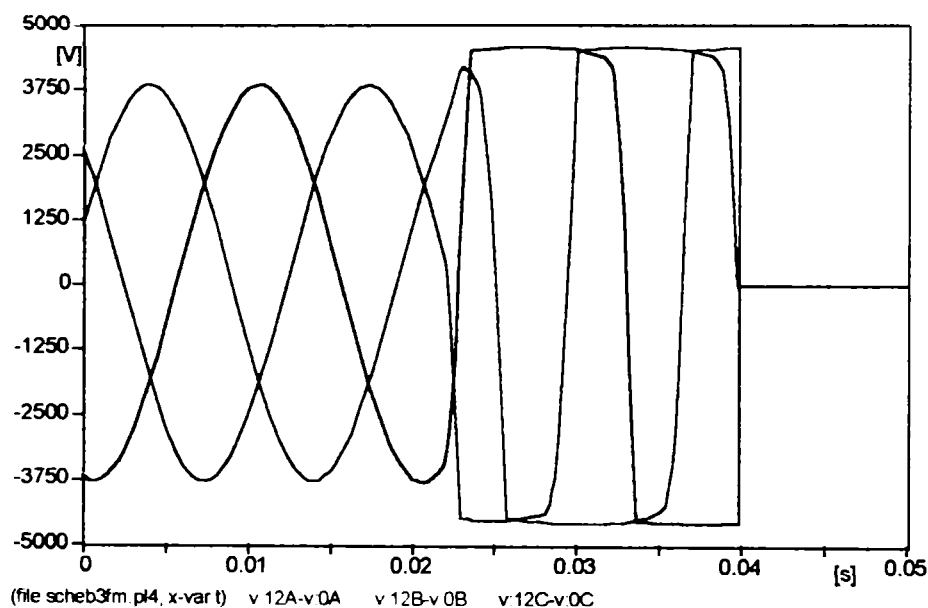


Fig.6.31. Variația tensiunilor pe bateria de condensatoare, protejată de MOV, la un scurtcircuit simetric.

Prezența bateriei de condensatoare pe linie, la un scurtcircuit simetric determină apariția unor supratensiunii la începutul liniei. Astfel, coeficientul de șoc este de 1,26, pe faza T, iar componenta periodică a coeficientului de supratensiune este de 1,048 (fig. 6.32). Protejarea bateriei de condensatoare prin MOV conduce la o limitare a supratensiunii la începutul liniei, coeficientul de supratensiune este de 1,096, adică mai mic cu 16,7% față de cazul precedent (fig. 6.33).

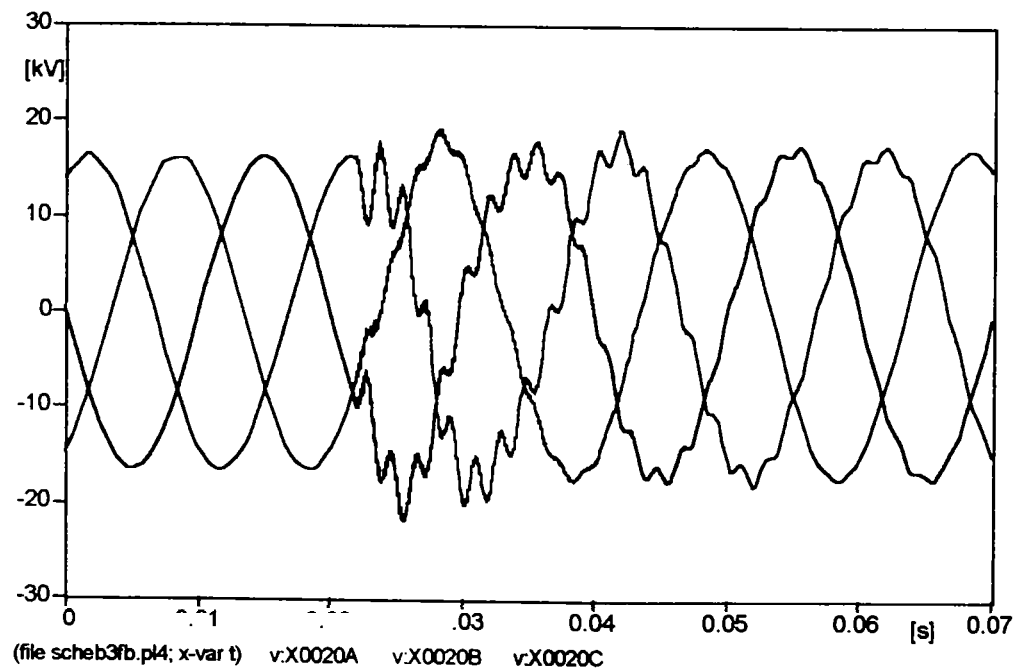


Fig.6.32. Variația tensiunilor la începutul liniei la apariția unui scurtcircuit simetric, linia compensată

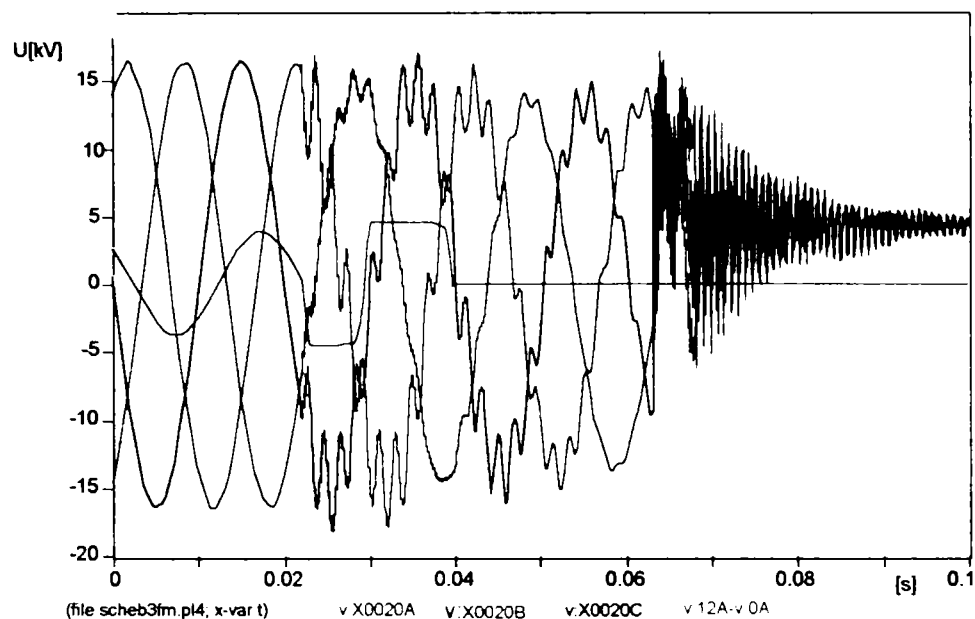


Fig.6.33 Variația tensiunilor la începutul liniei la scurtcircuit simetric, când bateria de condensatoare este protejată cu MOV și linia deconectată la 38ms de la apariția defectului

Comparând figurile 6.33 și 6.43 se observă că, în cazul liniei fără compensare la scurtcircuit trifazat nu apar supratensiunii la începutul acesteia. La deconectarea liniei defecte coeficientul de supratensiune este mai mic în cazul liniei compensate (1,043), cu bateria protejată decât în cazul linie fără compensare (1,078).

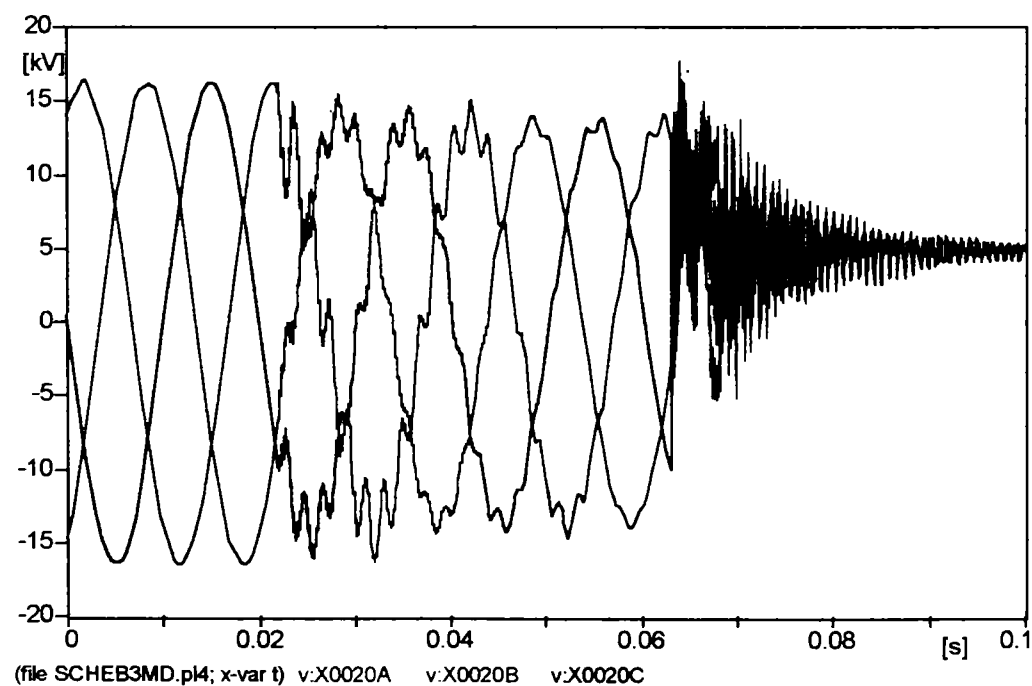


Fig.6.34. Variația tensiunilor la începutul liniei fără compensare, la scurtcircuit simetric și linia deconectată la 38ms de la apariția defectului

La scurtcircuit monofazat, pe faza avariata tensiunea la bornele bateriei de condensatoare crește foarte mult, coeficientul de supratensiune fiind de 4,39 (fig. 6.35). Supratensiunea la bornele bateriei care apare pe faza avariata este limitată de varistor (fig. 6.36).

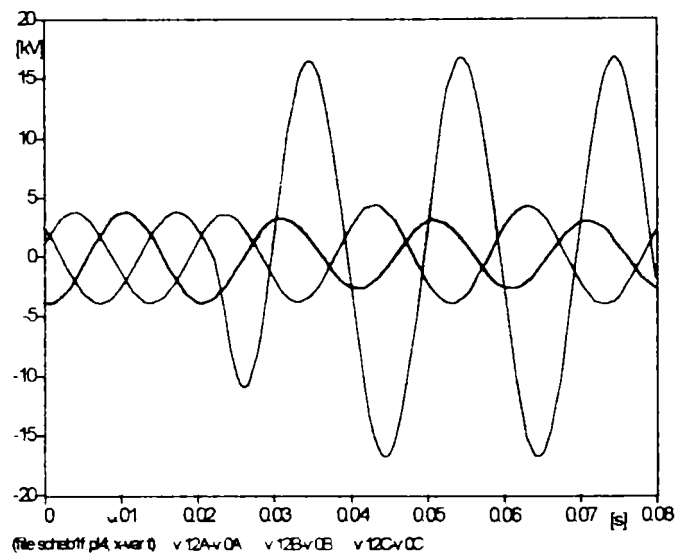


Fig. 6.35. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare la un scurtcircuit FN, imediat după baterie

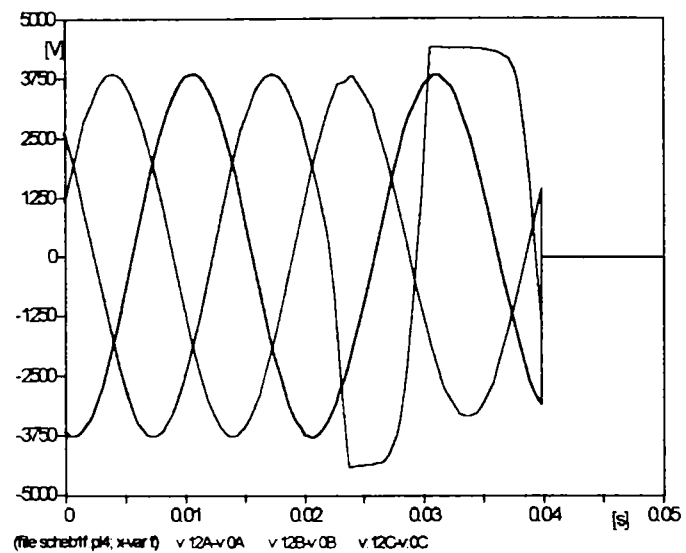


Fig. 6.36. Variația tensiunilor la bornele bateriei de condensatoare la un scurtcircuit FN, bateria protejată cu MOV

Este cunoscut faptul că la defecte monofazate în rețele cu neutrul tratat prin rezistor de limitare pe fazele sănătoase apar supratensiuni. În condițiile în care, linia este prevăzută cu compensare serie și defectul apare după bateria de condensatoare, pe fazele sănătoase valorile coeficienților de supratensiune la începutul liniei sunt mai mari decât în cazul liniilor fără compensare, de exemplu: pe faza S coeficientul de supratensiune pentru linia fără compensare este 1,397, iar pentru linia cu compensare este de 1,715; pe faza T coeficientul de supratensiune este mai mare pentru linia fără compensare de 1,868 decât la cea compensată (1,69). Figura 3.37 prezintă variațiile tensiunii la începutul liniei, prevăzută cu compensare capacitivă serie la un scurtcircuit monofazat, imediat după bateria de condensatoare. În cazul unui scurtcircuitului FN după bateria de condensatoare când aceasta este protejată prin MOV, tensiunea pe faza T crește și se scade cea de pe faza S (fig.6.38), ceea ce se întâmplă și în cazul liniei fără compensare (6.39).

Valorile coeficienților de supratensiune la un scurtcircuit FN, în cazul liniei fără compensare sunt apropiate de cele date în literatură [C22], [C32].

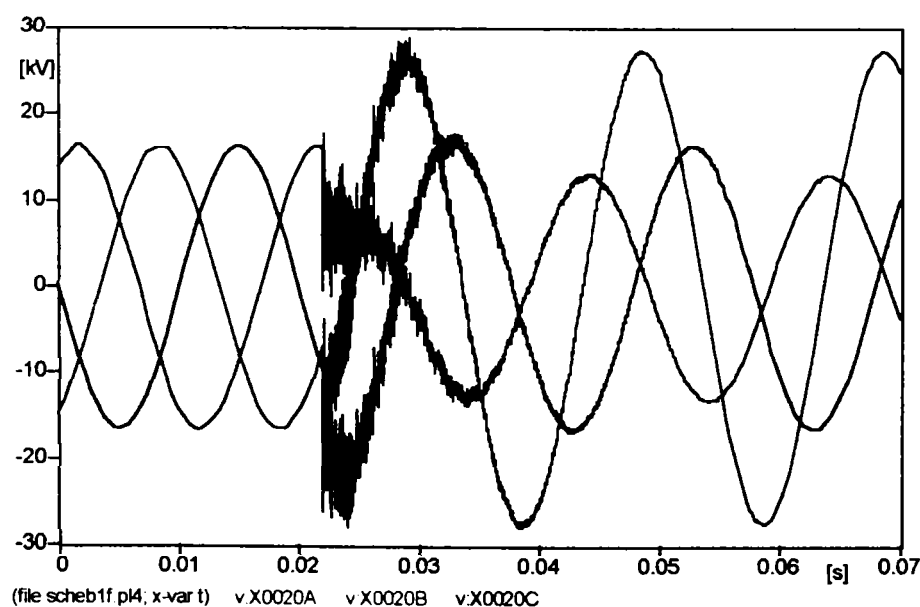


Fig. 6.37. Variația tensiunilor la începutul liniei, prevăzută cu compensare serie, la un scurtcircuit FN, imediat după baterie de condensatoare

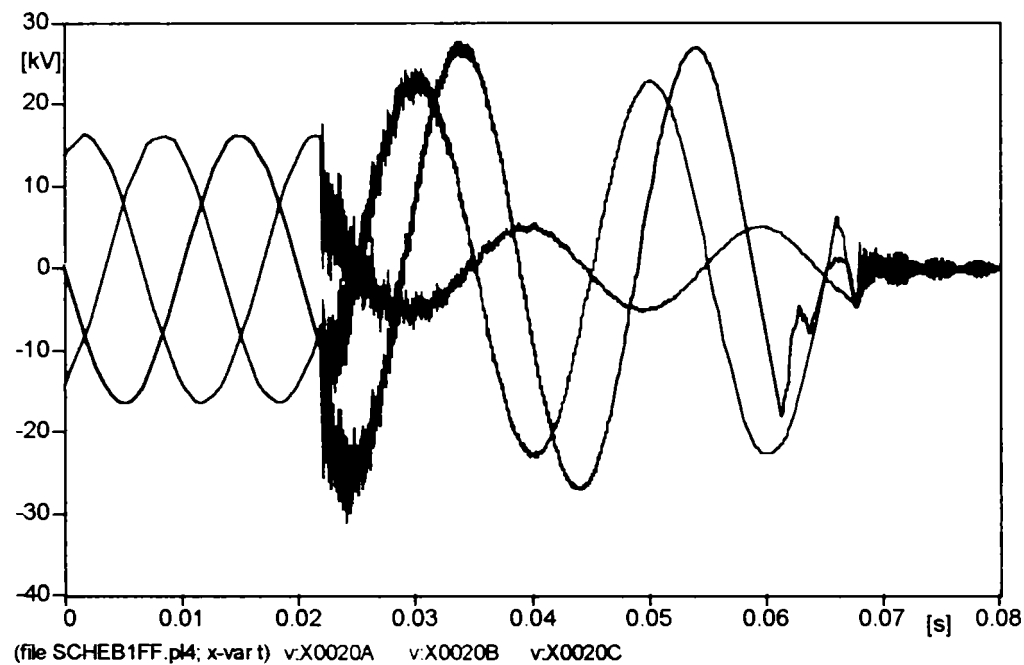


Fig. 6.38. Variația tensiunilor pe faze la începutul liniei fără compensare la un scurtcircuit FN.

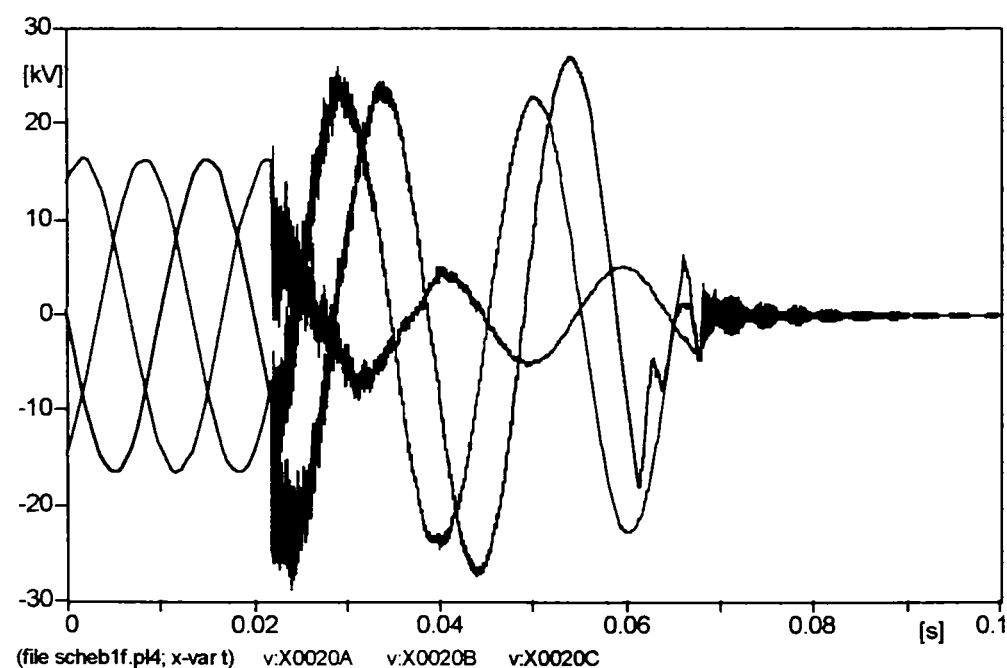


Fig. 6.39. Variația tensiunilor de fază la începutul liniei, prevăzută cu compensare serie, la un scurtcircuit FN, bateria protejată cu MOV

La bornele consumatorului de la sfârșitul liniei apar supratensiuni de valori semnificative la un defect monofazat după bateria de condensatoare datorate deplasării tensiunii punctului neutru al consumatorului. Coeficientul de supratensiune pe faza T are valoare 2,43 pentru linia cu compensare (fig. 6.40) și 2,4 pentru linia fără compensare (fig. 6.41). Pe faza S valoarea coeficientului de supratensiune este mult mai mare pentru linia compensată, (2,27) decât pentru linia fără compensare, (1,92). Prin urmare, protejarea bateriei de condensatoare cu MOV determină o reducere a supratensiunilor la bornele consumatorului cu aproximativ 12,16%, față de cazul când aceasta nu ar fi protejată (fig. 6.42).

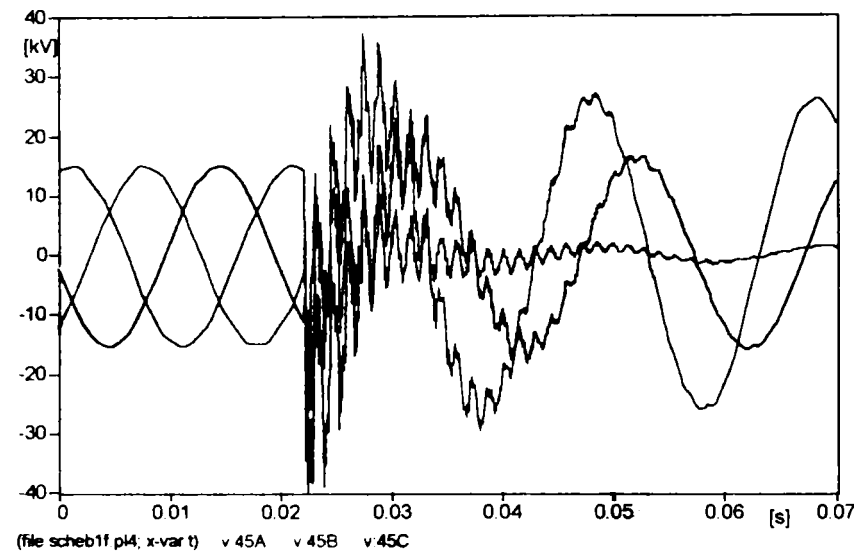


Fig.6.40. Variația tensiunilor la bornele consumatorului când linia este prevăzută cu compensare serie și apare un scurtcircuit FN după baterie

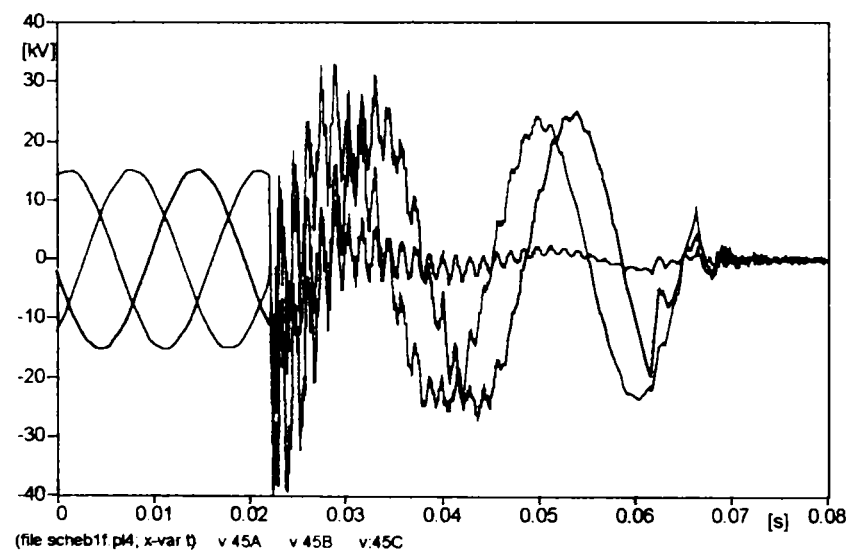


Fig.6.41. Variația tensiunilor la bornele consumatorului când linia este prevăzută cu compensare serie și apare un scurtcircuit FN după baterie, bateria protejată cu MOV

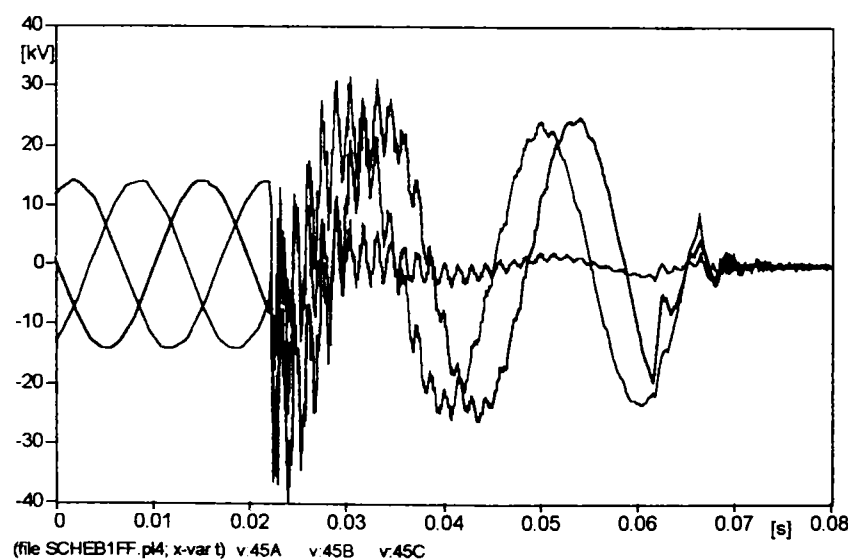


Fig.6.42. Variația tensiunilor la bornele consumatorului când linia nu este prevăzută cu compensare și apare un scurtcircuit FN după baterie

6.4. Concluzii

Scopul acestui capitol este de evidențierea prin determinări experimentale și simulări efectele compensării serie asupra funcționării rețelelor și de a prezenta modul de efectuare a măsurătorilor, rezultatele obținute prin prelucrarea acestora și unele concluzii desprinse din analiza rezultatelor.

Determinările experimentale s-au efectuat în laborator pe un model de rețea și o linie electrică de $20kV$ a SC. ELECTRICA SA.

Pentru realizarea determinărilor experimentale s-a modelat în laborator o rețea electrică de $20kV$. Bateria de condensatoare pentru compensarea serie a fost amplasată la sfârșitul liniei. Măsurătorile efectuate pe model au evidențiat următoarele aspecte:

- efectul compensării serie asupra căderilor de tensiune pe linie și asupra tensiunii la bornele consumatorului. Rezultatele obținute arată că eficiența bateriei de condensatoare în îmbunătățirea profilului tensiunii depinde esențial de caracterul sarcinii. Pentru sarcini rezistive sau cu caracter capacitiv tensiunea la bornele consumatorului se reduce prin compensarea serie. În cazul liniilor ce alimentează consumatori cu caracter inductiv, eficiența bateriei de condensatoare crește odată cu scăderea factorului de putere.
- creșterea puterii active la bornele consumatorului (creșterea capacității de transport) și a factorului de putere al rețelei prin compensarea capacitivă serie este semnificativă;
- compensarea capacitivă contribuie la amplificarea distorsiunii curbei de tensiune și de curent pe armonicile de rang inferior. Amplificarea distorsiunilor depinde însă de caracterul consumatorului și încărcarea rețelei;
- conectarea și deconectarea bateriei de condensatoare nu produce supratensiuni în rețea. La bornele bateriei de condensatoare apar supratensiuni datorate procesului tranzitoriu de încărcare;
- scurtcircuitele simetrice după bateria de condensatoare determină o creștere semnificativă a tensiunii la bornele acesteia. Valoarea coeficientului de supratensiune depinde de locul de amplasare a bateriei și de gradul de compensare;
- scurtcircuitele monofazate conduc la creșterea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare pe faza avariata și a tensiunilor la bornele consumatorului pe fazele sănătoase;
- conectarea liniei compensate cu un scurtcircuit după bateria de condensatoare determină apariția unor supratensiuni de valori semnificative la bornele bateriei de condensatoare și pe fazele sănătoase.

Măsurătorile efectuate pe linia reală de $20kV$ și de lungime $82,5km$ au scos în evidență faptul că abaterea relativă a tensiunii la bornele consumatorului de la sfârșitul liniei față de tensiunea nominală este de $16,46\%$ în cazul în care tensiunea la începutul liniei este de $19,9kV$ și de $9,5\%$ în condițiile în care tensiunea la începutul liniei este de $21,2kV$. Valorile abaterii tensiunii în nodul de consum față de tensiunea nominală sunt mult peste limitele admisibile $\pm 5\%$. Rezultatele obținute prin efectuarea calculelor au arătat că prin compensarea capacitivă serie se îmbunătățește mult profilul tensiunii în lungul liniei. Folosirea a două instalații de compensare amplasate în lungul liniei a determinat o îmbunătățire semnificativă a profilului tensiunii în lungul liniei, abaterea tensiunii în noduri de la valoarea nominală se încadrează în limitele admisibile de $\pm 5\%$.

Simulările efectuate pe rețeaua modelată în ATP au scos în evidență următoarele:

- la scurtcircuite pe linie, tensiunea la bornele bateriei de condensatoare crește de câteva ori față de regimul normal de funcționare;
- la scurtcircuite trifazate, supratensiunile la bornele bateriei de condensatoare au valorile cele mai mari;

- folosirea varistoarelor pentru protecția bateriei de condensatoare conduce la limitarea tensiunii pe baterie la o valoare admisibilă și totodată contribuie la reducerea amplitudinii supratensiunilor în rețea;
- supratensiunile care apar la începutul liniei la scurtcircuit monofazat pe linia fără compensare sunt apropiate de valorile date în literatură;
- bateria de condensatoare determină o creștere a supratensiunilor la începutul liniei, la scurtcircuite monofazate, dar la valori foarte mari, de fapt rezultatele obținute arată că prin compensare capacitivă se schimbă faza pe care apare supratensiunea maximă și nu valoarea acesteia.
- la scurtcircuite monofazate apar supratensiuni de valori mari la bornele consumatorului datorită faptului că neutrul acestuia este izolat [C22]. Rezultatele obținute pentru linia fără compensare se încadrează în valorile date în literatură pentru rețelele cu neutru izolat. Compensarea capacitivă serie determină o creștere a supratensiunii la bornele consumatorului de 1,25% pe faza T și de 18,23% pe faza S, față de cazul în care linia este fără compensare.

Contribuțiile aduse de autoare la acest capitol se referă la:

- evidențierea în laborator pe un model de rețea a efectelor compensării capacitive serie asupra funcționării rețelelor compensate;
- elaborarea unui program de calcul a tensiunilor și puterilor în nodurile rețelei, precum și de determinare locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- stabilirea unor concluzii privind eficiența compensării capacitive serie în obținerea unui profil îmbunătățit a tensiunilor în noduri rețelele de medie tensiune;
- modelarea rețelei electrice de 20kV în ATP și evidențierea efectului compensării capacitive asupra amplitudinii supratensiunilor în rețea.

Capitolul 7

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

Rețelele electrice de distribuție de medie și joasă tensiune reprezintă mai bine de trei sferturi din totalul rețelelor de transport și de distribuție din România, în condițiile în care consumul de energie electrică s-a descentralizat, repartizându-se în centre de consum situate mai ales la nivelul de medie tensiune. Utilizarea energiei electrice în puncte tot mai îndepărtate de aglomerările urbane au condus la existența unor rețele de distribuție extinse, cu linii de medie tensiune ce ating lungimi mari, de ordinul zecilor de km, chiar în condițiile normale de funcționare, adică în regim permanent. În situații de avarie, lipsa unor puncte de injecție distribuite a condus la realizarea unor lungimi foarte mari, atingând în unele situații și cifra de 100km.

Pentru aceste linii, asigurarea condițiilor tehnice de funcționare și cu atât mai mult a celor reclamate de menținerea calității energiei furnizate devine o problemă deosebită. Dacă nivelul pierderilor de putere și energie nu afectează relația furnizor-consumator în contextul economiei de piață, nivelul indicatorilor de calitate ai energiei este determinant în relația contractuală stabilită între cei doi. În cadrul acesteia indicatorii ce privesc calitatea tensiunii sunt determinanți. Variațiile de tensiune, nesimetria, deformarea curbei tensiunii, golurile sau șocurile sunt perturbații ale tensiunii, care pot afecta defavorabil funcționarea receptoarelor consumatorilor, dar și sistemele de automatizare, monitorizare și conducere ale rețelei. Ca urmare se impune realizarea reglajului de tensiune cât mai îngrijit, evitându-se scăderea nivelului de tensiune în nodurile consumatoare "îndepărtate".

Pentru asigurarea acestui deziderat se folosesc diferite metode și mijloace. Una dintre ele fiind modificarea valorii reactanței rețelei, iar mijlocul-compensarea capacitivă serie. Cunoscută și folosită în mod deosebit în rețelele de înaltă tensiune, la nivelul de medie și joasă tensiune a fost puțin folosită (la noi în țară deloc) din cauza costurilor ridicate ale bateriilor de condensatoare și instalațiilor de protecției și reglare.

Actualmente însă, în condițiile noilor tehnologii s-au realizat și au pătruns în țara noastră echipamente performante care reactualizează considerarea compensării capacitive serie în defavoarea altor metode, care vin în contradicție mai ales cu mediul înconjurător.

Pe această direcție se înscrie și lucrarea de față care și-a propus să evidențieze avantajele oferite de compensarea capacitivă serie a rețelelor de medie tensiune, ca mijloc de reglare a tensiunii. Cu această ocazie au fost abordate problemele specifice compensării, s-au efectuat comparații și analize cu, compensarea capacitivă transversală (mult mai răspândită la acest nivel de medie tensiune) și s-au dezvoltat metodologii de soluționare a problemelor ce trebuiesc rezolvate cu ocazia implementării acestei metode de compensare. Centrul de greutate a fost orientat, așa cum era de așteptat asupra calității tensiunii, asigurarea acesteia făcându-se prin reglarea tensiunii.

Referitor la rolul compensării capacitive serie a rețelelor de distribuție lucrarea evidențiază faptul că prin compensarea se asigură: îmbunătățirea profilului tensiunii în nodurile de consum, reducerea fenomenelor de flicker și a fluctuațiilor de tensiune și o stabilitate sporită a tensiunii în nodurile de consum. În ceea ce privește îmbunătățirea performanțelor rețelelor electrice de distribuție prin compensarea capacitivă serie se realizează: scăderea semnificativă a căderilor de tensiune pe liniile de distribuție, creșterea capacității de transport ale acestora, reducerea pierderilor de putere pe linii și îmbunătățirea factorului de putere al rețelelor de distribuție.

În legătură cu problemele compensării capacitive serie, acestea sunt: stabilirea locului de amplasare al bateriei de condensatoare, determinarea valorii reactanței acesteia și protecția ei, iar soluționarea lor poate fi realizată după cum urmează.

Pentru stabilirea locului optim de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare cei mai utili sunt indicatorii integrali de calitate ai tensiunii și anume: abaterea medie și media pătratelor abaterilor tensiunii în noduri. O atenție deosebită trebuie acordată sensibilității acestora cu cele două variabile: locul de amplasare și valoarea reactanței. De remarcat că aplicarea metodei sensibilității în abordarea acestor aspecte asigură rigoarea științifică și alinierea la folosirea metodei generale a sensibilității mărimilor caracteristice (de stare) în electroenergetică. De asemenea a rezultat că: locul de amplasare al bateriei de condensatoare depinde de tensiunea la începutul liniei, cu cât tensiunea este mai mare cu atât bateria de condensatoare va fi amplasată mai departe de stația de distribuție; valoarea reactanței bateriei scade odată cu creșterea tensiunii la începutul liniei; secțiunea conductoarelor liniei influențează locul de amplasare și valoarea reactanței bateriei de condensatoare, cu cât secțiunea liniilor va fi mai mică cu atât bateria de condensatoare se va amplasa mai aproape de stația de transformare și valoarea reactanței acesteia va fi mai mare; încărcarea liniilor influențează de asemenea locul de amplasare al bateriei de condensatoare și valoarea acesteia, cu cât liniile sunt mai încărcate bateria va fi amplasată mai aproape de stație și valoarea reactanței va fi mai mare; gradul de compensare al reactanței liniei scade odată cu scăderea factorului de putere al consumatorului; locul de amplasare al bateriei depinde și de lungimea liniei, cu cât lungimea liniei este mai mare cu atât bateria de condensatoare va fi amplasată mai aproape de stație de transformare.

O concluzie deosebit de utilă a rezultat referitor la influența caracteristicilor statice de tensiunea asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare. Sub acest aspect s-a constatat că locul de amplasare al bateriei de condensatoare este puțin influențat de caracteristicile statice de tensiune, în timp ce valoarea reactanței bateriei poate fi semnificativ influențată de acestea.

Cât privește schemele de protecție a bateriei de condensatoare, acestea depind de puterea bateriei, de valoarea curentului de scurtcircuit de pe linie și de importanța liniei. Reglarea valorii capacității bateriei de condensatoare se poate realiza în trepte sau continuu, utilizând dispozitive bazate pe electronica de putere.

Referitor la comportarea rețelelor prevăzute cu instalații de compensare și poluate armonic de menționat că în lucrarea s-au folosit două metode, și anume: metoda scanării frecvenței și metoda tensiunilor, una pentru a evidenția efectul compensării capacitive serie asupra fenomenului de propagare a poluării armonice, considerând consumatorul deformant ca sursă de tensiune constantă în domeniul suprasincron și subsincron, alta pentru a evidenția influența locului și numărului surselor de poluare asupra valorilor tensiunilor armonice nodurile, precum și asupra solicitărilor bateriilor de condensatoare. Scopul principal a fost de a reliefa participarea sau nu a bateriilor de condensatoare serie la realizarea impedanței armonice și a coeficienților de transfer. De subliniat că, rezultatele obținute depind de faptul că sursa de poluare este racordată sau nu la linia compensată.

Astfel, dacă sursa de poluare este racordată la linia compensată, în domeniul suprasincron, valoarea impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului neliniar depinde de parametrii rețelei, ai sistemului, ai consumatorului liniar, și ai bateriei de condensatoare derivație. Fenomenul de propagare armonică nu este influențat de prezența bateriei de condensatoare serie, nu se modifică rangul armonicilor pentru care apar amplificări semnificative ale curenților și tensiunilor armonice în nodurile rețelei și valorile coeficienților de transfer cresc foarte puțin cu gradul de compensare K_c , doar pentru armonici inferioare ($k < 10$). Spre deosebire de bateria de condensatoare serie, cea derivație modifică atât forma de variație a impedanței armonice și a coeficienților de transfer, cât și valorile acestora. De menționat că, coeficientul de amplificare al curentului armonic absorbit de consumatorul

liniar este sensibil influențat de modelul armonic adoptat și de puterea bateriei de condensatoare derivație, valoarea lui crește odată cu creșterea rangului armonicii. Referitor la domeniul frecvențelor de rezonanță, acesta depinde de puterea bateriei de condensatoare derivație: cu cât puterea baterie de condensatoare derivație este mai mare cu atât fenomenul de rezonanță apare la frecvențe mai mici. Modelul armonic adoptat pentru consumatorul liniar influențează atât forma de variație a impedanței armonice cât și valoarea ei, precum și valorile coeficienților de transfer a curentului la bornele bateriei de condensatoare derivație, respectiv la bornele sistemului.

În ceea ce privește solicitarea celor două baterii de condensatoare se poate menționa că: bateria de condensatoare derivație este suprasolicitată cu tensiunii și curenți armonici, care depind de modelul armonic adoptat pentru consumatorului liniar și de puterea baterie de condensatoare, iar bateria de condensatoare serie poate fi solicitată cu tensiuni armonice în funcție de gradul de compensare al liniei Kc , doar la armonici inferioare ($k < 10$).

În domeniul subsincron se constată că, bateria de condensatoare serie are o influență semnificativă asupra impedanței armonice și a coeficienților de transfer. Ea poate suprasolicitată cu tensiuni la borne, care la frecvența de rezonanță subsincronă au valori mari. De remarcat faptul că, funcționarea bateriei de condensatoare în domeniul subsincron trebuie evitată deoarece chiar pentru grade de compensare mici amplificarea tensiunii la bornele bateriei de condensatoare este periculoasă pentru izolația acesteia. Tensiunea la bornele baterie de condensatoare derivație depinde de gradul de compensare al linie și crește odată cu creșterea rangului subarmonicii, ceea ce poate conduce la o suprasolicitare a izolației acesteia.

În cazul în care sursa de poluare armonică este racordată la barele de MT ale stației de distribuție se constată că, în domeniul suprasincron, valoarea impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului neliniar crește puțin cu micșorarea puterii baterie de condensatoare derivație, în timp ce frecvențele de rezonanță scad cu creșterea puterii bateriei. Spre deosebire de cazul precedent, coeficientul de transfer al curentului la barele sistemului are valori mult mai mari, iar bateria de condensatoare derivație este mai solicitată. De asemenea, consumatorul liniar este sensibil afectat de prezența consumatorului deformant, care, în funcție de modelul armonic adoptat, poate fi alimentat cu tensiuni mult mai mari.

În domeniul subsincron se poate menționa că, variația coeficientului de transfer a tensiunii armonice la bornele consumatorului liniar și valoare acestuia sunt sensibil influențate de gradul de compensare și de modelul armonic al consumatorului. Valoarea coeficientul de amplificare a tensiunii armonice la bornele bateriei de condensatoare serie depinde atât de gradul de compensare al liniei cât și de modelul armonic al consumatorului și are valori mult mai mari decât în cazul în care sursa de poluare era alimentată prin linia compensată. Referitor la bateria de condensatoare derivație, aceasta nu este supusă unor suprasolicitări, coeficientul de transfer al curentului armonic la bornele ei are valori reduse.

În condițiile folosirii metodei tensiunilor în noduri s-a constatat că, tensiunile armonice în nodurile rețelei depind de locul unde apare neliniaritatea, cresc dacă numărul consumatorilor deformanți crește. Pentru frecvențele de rezonanță armonică solicitarea bateriei de condensatoare în curenți armonici crește semnificativ.

Referitor la determinările experimentale, acestea validează rezultatele teoretice obținute și chiar le extind. De remarcat că, alături de echipamente clasice: ampermetre, voltmetre, cosfimetre și wattmetre s-au folosit sisteme de achiziții moderne TRINET și CDR.

O atenție deosebită s-a acordat regimurilor de scurtcircuit monofazat și trifazat și corespunzător valorilor supratensiunilor care s-au produs pe bateria de condensatoare. Cu această ocazie, s-a constatat că la bornele bateriei de condensatoare apar supratensiuni periculoase pentru izolația bateriei de condensatoare, că situația cea mai dezavantajoasă este în cazul scurtcircuitelor trifazate.

Simulările efectuate în ATP au completat pe cele experimentale și atestă că compensarea capacitivă serie este utilă în rețelele de medie tensiune lungi, care ating lungimi $> 50km$, tensiunea în noduri încadrându-se în banda admisibilă.

În încheierea concluziilor autoarea consideră că, compensarea capacitivă serie poate oferi actualmente o soluție rezonabilă și mai ales utilă pentru asigurarea calității energiei electrice livrate consumatorilor de linii de medie și chiar joasă tensiune “lungi”, că poate îmbunătăți stabilitatea de tensiune prin creșterea rezervei de tensiune, limita fenomenul de flicker și compensa fluctuațiile de tensiune. Lucrarea poate fi dezvoltată considerând comanda valorii reactanței bateriei de condensatoare folosind dispozitive POWER CUSTOMER bazate pe electronica de putere și tehnici de inteligență artificială.

Contribuțiile aduse de autoare în această lucrare se referă la:

- sistematizarea problemelor teoretice pe care le comportă analiza compensării capacitive serie;
- evidențierea avantajelor și dezavantajelor compensării capacitive serie;
- aprecierea eficienței compensării capacitive serie la reglajul tensiunii;
- evidențierea rolului caracteristicilor statice a consumatorilor cu tensiunea în efectuarea comparației dintre cele două compensări capacitive: serie și paralel;
- analiza rolului compensării capacitive serie asupra stabilității tensiunii la bornele consumatorilor;
- efectuarea unor aplicații pentru a evidenția eficiența compensării serie în problemele de reglare a tensiunii în rețelele de distribuție;
- prezentarea unor studii de caz care să evidențiază efectele benefice ale compensării capacitive asupra funcționării rețelelor de distribuție și rolul acesteia în stabilitatea tensiunii la bornele consumatorilor
- întocmirea unei sinteze bibliografice privind schemele de protecție ale bateriei de condensatoare, comentarea acestora;
- determinarea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare utilizând indicatorii integrali de calitate ai tensiunii și verificarea folosind metoda sensibilității;
- studiul influenței caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- prezentarea unor aplicații prin care se evidențiază influența modului de repartitie a sarcinilor asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- prezentarea unei aplicații prin care se evidențiază influența caracteristicilor statice de tensiune asupra locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- prezentarea unei aplicații prin care arată cum se realizează reglarea valorii reactanței bateriei de condensatoare folosind TSC;
- sistematizarea problemelor teoretice privind modelarea armonică a elementelor de rețea și calculul circulației de curenți și tensiuni armonice în rețelele prevăzute cu compensare capacitivă serie și paralel;
- stabilirea expresiilor coeficienților de transfer și a impedanței armonice pentru o rețea în care sursa de poluare are locații diferite;
- evidențierea efectului compensării serie și paralel asupra valorii impedanței armonice și a coeficienților de transfer ai tensiunii și curentului în regim suprasincron, respectiv subsincron;
- efectuarea unor studii de caz pentru a evidenția influența schemei echivalente a consumatorului liniar, a gradului de compensare al reactanței linie și a puterii bateriei de condensatoare derivație asupra fenomenului de propagare a poluării armonice și subarmonice;

- prezentarea unei aplicații de calcul a circulației de curenți și tensiuni armonice când sursele de poluare sunt distribuite, evidențierea efectului acestora asupra bateriilor de condensatoare serie și derivație.
- întocmirea modelelor matematice de calcul a supratensiunilor pe bateria de condensatoare la scurtcircuite simetrice, în cazul în care bateria este amplasată în stație, respectiv într-un post de transformare în lungul linie;
- întocmirea modelelor matematice de calcul a supratensiunilor la defecte monofazate în rețele cu neutru izolat, respectiv tratat cu rezistor de limitare și evidențierea efectului compensării capacitive asupra acestora;
- prezentarea unor aplicații prin care se evidențiază influența lungimii liniei, a gradului de compensare, a inductivității sursei asupra valorilor coeficienților de supratensiune pe bateria de condensatoare;
- evidențierea în laborator pe un model de rețea a efectelor compensării capacitive serie asupra funcționării rețelelor compensate;
- elaborarea unui program de calcul a tensiunilor și puterilor în nodurile rețelei, precum și de determinare locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare;
- stabilirea unor concluzii privind eficiența compensării capacitive serie în obținerea unui profil îmbunătățit a tensiunilor în noduri rețelele de medie tensiune;
- modelarea rețelei electrice de $20kV$ în ATP și evidențierea efectului compensării capacitive asupra amplitudinii supratensiunilor în rețea.

BIBLIOGRAFIE

TRATATE ȘI CURSURI UNIVERSITARE

- [C1] Arie A., Negus C., Golovanov C., Golovanov N., *Poluarea cu armonice a sistemelor electroenergetice funcționând în regim permanent simetric*, Editura Academiei Române, București, 1994.
- [C2] Arrillaga J., Arnold C.P., *Computer analysis of power systems*, John Wiley, 1990.
- [C3] Barret J.P., Bornard P., Meyer B., *Power system simulation*, Chapman & Hall, London, 1997.
- [C4] Bercovici Martin, Arie A., Poeată A., *Rețele electrice. Calculul electric*, Editura Tehnică, București, 1974.
- [C5] Buta A., Pană A., Milea L., *Calitatea energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2001.
- [C6] Buta A., *Transportul și distribuția energiei electrice*, Litografia Universității Tehnice, Timișoara, 1991.
- [C7] Buta A., Milea L., Pană A., *Impedanța armonică a rețelelor sistemelor electroenergetice*, Editura Tehnică, București, 2000.
- [C8] Buta A., Pană A., *Transportul și distribuția energiei electrice. Îndrumător de proiectare*, Centrul de multiplicare Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1997.
- [C9] Clarke E., *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice*, Editura tehnică, București, traducere selectivă din limba engleză.
- [C10] Chioreanu V., *Materiale electrotehnice*, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1990.
- [C11] Cristescu D., Olah R., *Supratensiuni și izolația rețelelor electrice*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1983.
- [C12] Crișan O., *Sisteme electroenergetice*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1978.
- [C13] Deleșega I., Andea P., *Procese de comutație. Calitatea energiei electrice*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2002.
- [C14] Drăgan G., Golovanov N., Mazzeti C., Moraru A., Nicoară B., Nucci Alberto Carlo, Costea M., Grăgan D. L. *Tehnica tensiunilor înalte*, vol. II, Editura Academiei Române, Editura AGIR, București, 2001.
- [C15] Drăgan G., Miclescu Th, Cristovici A. s.a., *Supratensiuni interne in sistemele electroenergetice*, Editura Tehnica Bucuresti, 1975.
- [C16] Dungan Roger C., McGranaghan Mark F., Beaty Wayne H., *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, New York., 1996.
- [C17] Eremia M., *Tehnici noi în transportul energie electrice. Aplicații ale electronicii de putere.*, Editura Tehnică, București, 2000.
- [C18] Eremia M. Trecat J., Germond A., *Reseaux electriques. Aspects actuels.*, Editura Tehnică, București, 1997.

- [C19] Gavrilaş N., Gușă M., Istrate M., Asaftei C., *Tehnica tensiunilor înalte. Supratensiuni în sistemele electroenergetice*, Universitatea Tehnică "Gh. Asachi", Iași, 1996.
- [C20] Georgescu Gh., Rădășanu Daniela *Transportul și distribuția energiei electrice*, vol.1, Editura "Gh. Asachi", Iași, 2002.
- [C21] Georgescu Gh., *Transportul și distribuția energiei electrice*, vol.3, Editura Venus, Iași, 2002.
- [C22] Goia L.M., Ișțfanu T., Bălan G., Tănăsescu A., *Tratarea neutrului rețelelor de medie tensiune*, Editura Tehnică, București, 1985.
- [C23] Golovanov Carmen, Albu Mihaela și alți, *Probleme moderne de măsurare în electroenergetică*, Editura tehnică, București, 2001.
- [C24] Greenwood Allan, *Electrical transients in power systems*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc.
- [C25] Grzybowski S., Kordus A., Krolikowski C. Seidel Șt., Zeydler-Zborowski J., *Condensatoare în electroenergetică* – traducere din limba polonă, adaptată și completată, Editura Tehnică, București, 1966.
- [C26] Ionescu F, Six Jean-Paul, Bui Ai, Bausiere R., Floricău D., Mihalache C., Radomirescu B., *Composants semi-conducteurs de puissance*, Editura Tehnică, București, 1994.
- [C27] Ionescu G. Traian, Pop Olga, *Ingineria sistemelor de distribuție a energiei electrice*, Editura Tehnică, București, 1998.
- [C28] Grigsby, L.L., *Distribution system modelling and analysis*, Power Engineering Handbook, CRC Press, 2002
- [C29] Kilyeni Șt., *Metode numerice. Algoritme, programe Turbo Pascal, Aplicații în energetică*, Ediția a 2-a, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2001.
- [C30] Marinescu A., *Comportarea transformatoarelor la supratensiuni de comutație*, Editura Tehnică, București, 1988.
- [C31] Negru V., *Tehnica tensiunilor înalte. Supratensiuni interne*, Centrul de multiplicare Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1995.
- [C32] Nemeș M., *Sisteme electrice de putere. Probleme actuale*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2003
- [C33] Peterson Harold A., *Transients in Power Systems*, Dover Publications, New York., 1951.
- [C34] Poată, A. Arie A., Crișan O., Eremia M., Alexandrescu V., Buta A., *Transportul și distribuția energiei electrice*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1981.
- [C35] Rucăreanu C., Militaru P., Hotoboc V., Chiricescu V., Prioteasa V., *Transportul și distribuția energiei electrice*, Editura Tehnică, București, 1989.
- [C36] Șora C., *Bazele electrotehnicii*. Editura Didactică și pedagogică, București, 1982.
- [C37] Șurianu F. D., *Rețele electrice industriale*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999.
- [C38] Tușaliu P., *Tehnica tensiunilor înalte*, Universitatea Craiova, 1991.

ARTICOLE ȘTIINȚIFICE

- [A96] Arini El Mahdi, *Effects of voltage sensitive loads on optimum capacitor allocation for power system*, Melecon' 96, 8th Mediterranean Electronical Conference, May 13/16, 1996, Bari, Italy, pp. 1598-1602.
- [AE89] Adolfsson M., Einvall C-H, Lindberg P., ș.a, *EHV series capacitor banks. A new approach to platform to ground signaling relay protection and supervision*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.4, no.2, April 1989, pp. 1369-1472.

- [AG96] Angquist L. Ingestrom G., Jonsson H-A., *Dynamical performance of TCSC Schemes*, CIGRE 1996, 14-302.
- [AG00] Albert Hermina, Golovanov N., Pascu A., Elefterescu Luminița, Golovanov Carmen, *Analiza experimentală a calității energiei electrice*, Conferința Națională de energetică CNE-M-2000, Chișinău, 2000, pp.373-378.
- [BB96] Black, J., Baghzouz, Y., *Frequency response of series and shunt compensated transmission lines*, Proceedings of the 7th ICHOP, octombrie 16-18, 1996, Las Vegas, pp. 487÷493.
- [BB97] Bucatariu Iona, Buta A., *The use of voltage quality integral indexes in the matter of serial capacitive compensation of the distribution lines*, Proceedings of the Second International Power Systems Conference, Timișoara, nov.,1997, pp.142-147.
- [B98] Bucatariu Iona, *Aspecte referitoare la influența compensării longitudinale din rețelele de medie tensiune asupra funcționării protecției de distanță*, Analele Universității din Oradea, vol.1, Fascicola de energetică, Secțiunea Electroenergetică, 1998, pp. 165-172.
- [B98] Bucatariu Iona, *Algoritm și program de calcul pentru studiul comutației în rețele cu compensare serie*, Referat doctorat, Universitatea politehnica Timișoara, 1998.
- [B99] Bucatariu Iona, Buta A., *The influence of the serial and parallel capacitive compensation on the medium voltage networks harmonic impedance's. First part: The networks modelling, the compensation level*, Proceedings of the Third International Power Systems Conference, vol. II, Timișoara, nov.18-20,1999, pp.37-42.
- [BB99] Bucatariu Iona, Buta A., *The influence of the serial and parallel capacitive compensation on the medium voltage networks harmonic impedance's. Part two: linear load harmonic model and the capacitor bank in the transformer station*, Proceedings of the Third International Power Systems Conference, vol. II, Timișoara, nov.18-20,1999, pp.43-48.
- [BB00] Buta A, Bucatariu Iona, Pană A., *Propagarea poluării armonice pe liniile de interconexiune*, Energetica, nr. 5, Mai 2000, pp. 232÷237.
- [BB01] Buta A., Bucatariu Iona, Pană A., Chiosa N., Ardeleanu I., *Harmonic pollution propagation on the shunt compensated transmission lines*, Proceedings of the 4th International Power Systems Conference, Timișoara, nov. 8-9, 2001, pp.47-50.
- [BP01] Buta A, Pană A., Bucatariu Iona, Szatmari Eva, Buran A., *Propagarea poluării armonice pe liniile de transport compensate*, A treia Conferință internațională de sisteme electromecanice și energetice, Chișinău, 4-6 octombrie, 2001, vol. 3, pp.59-62.
- [BB02] Buta A., Bucatariu Iona, Pană A., *Utilizarea indicatorilor integrali de calitate ai tensiunii la stabilirea valorilor reactanțelor compensatoarelor serie și paralel în rețelele electrice de distribuție*, Revista "Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice", București, 2002, pp.17-22.
- [BP96] Barr, Robert A., Platt Don, *Modelling and mapping ferroresonant states in series compensated distribution and subtransmission lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, no.2, April 1996, pp. 931-936.
- [CC01] Coman V., Cundeva C., Buta A., Bucatariu Iona, *Transformer representation in the electrical network, modeling by PSPICE software*, Proceedings of the 4th International Power Systems Conference, Timișoara, nov. 8-9, 2001, pp.97-100.

- [CB89] Conecini I., Banu G., Chiuță I., *Supratensiuni de rezonanță care pot apărea la liniile de înaltă tensiune*, Energetica, nr. 4-5, 1989, pp. 207-212.
- [CF99] Canizare A. C., Faur T.Z. *Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.14, no.1, February 1999, pp. 158-165.
- [CL00] Chung T., Li Y. Z., *A hybrid GA approach for OPF with consideration of FACTS devices*, IEEE Power Engineering. REVIEW, vol.20, no.8, August 2000, pp. 54-57.
- [CS96] Choi S.S., Shrestha G., Jiang F., *Transmission system stability enhancement via variable series compensation*, *Electrical Machines and Power Systems*, vol.24, no.5 July-August, 1996, pp. 569-582.
- [EA97] Esquivel-Fuerte CR, Acha E., *A Newton type algorithm for the control of power flow in electrical power networks*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.12, no.4, November 1997, pp. 1474-1480.
- [EB00] Eremia M., Bulac C., Bulac A.I., Tristiu I., Trecat J., *Voltage stability in power system: assessment and control by artificial intelligence techniques*, Session 2000 CIGRE, 38-114.
- [E02] Eremia M., *Introduction to FACTS and A.I.: A challenge for power systems engineers*, "Advanced technologies in power systems: FACTS and A.I.", Universitatea Politehnica București, pp.124-169, 27 May – 7 June 2002.
- [EC97] Han Hak-Guhn, Park Jong-Keun, Lee Byung-Ha *Analysis of thyristor controlled series compensator dynamics using the state variable approach of a periodic system model*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.12, no.4, October 1997, pp. 1744-1750.
- [ES02] Escobar, G., Stankovic A.M., Mattavelli, P., Ortega R., *On the nonlinear of TCSC* Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences –2002, Hawaii.
- [FA03] Sherif Omar Faried, Saleh Aboreshaid, *Stochastic evaluation of voltage sags in series capacitor compensated radial distribution systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, no.3, July 2003, pp. 744-750.
- [GA96] Griffin J., Atanackovic D., Galiana F.D., *A study of the impact of FACTS on the secure-economic operation of power systems*, 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, august 19-23, 1996, pp.1077-1081.
- [GA00] Gama C., Angquist Al. Ingestrom G., Noroozian M., *Commissioning and operative experience of TCSC for damping power oscillation in the Brazilian North-South Interconnection*, Session 2000 CIGRE, 14-104.
- [GH96] Georgantzis G. J., Hatziargyriou N.D., Leonidaki E.A., *Transient simulation of series compensated EHV transmission lines for short-circuit studies*, MELECON, 1996, pp.1584-1587.
- [GI95] Godart T.F., Imece A.F., McIver J.C., Chebli E.A., *Feasibility of thyristor controlled series capacitor for distribution substation enhancements*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, no.1, January 1995, pp. 203-209.
- [H01] Haque, M.H., *Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM*, Proceedings of IEEE Porto Power Tech Conference - CD, 10-13 September, 2001, Porto, Portugal.
- [HP97] Edris A.A, ș.a, *Proposed Terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS)*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.12, no.4, October 1997, pp. 1848-1853.

- [HZ96] Huang Y.C., Yang H.T., Huang C.L., *Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, no.4, November 1996, pp. 1868-1873.
- [IF99] Ivas D., Munteanu F., Nemeş C., *Mutaţii posibile în dezvoltarea şi exploatarea reţelelor de distribuţie datorate noilor tehnici de conducere*, Energetica, nr. 8-9, august-septembrie, 1999, pp. 344÷350.
- [IR99] Satoru Ihara, Walter J. Ros, *Distribution Series Capacitors for improved power quality*, GE Transmission, Distribution & Industrial Systems, 1999.
- [JA98] Jayasinghe J.A.S.B, Aggarwal R.K., Johns A.T., Bo Z.Q, *A novel non-unit protection for series compensated EHV Transmission lines based on fault generated high frequency voltage signal*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, no.2, April 1998, pp. 405-420.
- [K92] Karady G. George, *Continuous regulation of capacitive reactive power*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.7, no.3, July 1992, pp. 1466-1472.
- [K91] Karady G. George, *Concept of a combined short circuit limiter and series compensator*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.6, no.3, July 1991, pp. 1031-1037.
- [KO93] Karady G. George, Ortmezer H. Thomas, Pilvelait R. Bruce, Maratukulam Dominic, *Continuously regulated series capacitor*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, no.3, July 1993, pp. 1348-1355.
- [KP03] Naoto Kakimoto, Anan Phongphanphane, *Subsynchronous resonance damping control of thyristor-controlled series capacitors*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, no.3, July 2003, pp. 1051-1059.
- [LG96] Gerald E. Lee, Daniel L. Golgsworthy, *BPA'S Pacific AC inertia series capacitors: Experience, equipment & protection*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, no.1, January 1996, pp. 253-259.
- [LK90] Lat M.V., Kundu D., Bonadie G., *Overvoltage protection scheme for series capacitors banks on high voltage distribution systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.5, no. 3, July 1990, pp. 1495-1464.
- [MC91] Manohar Premila, Chandrasekharaiah H.S., *Application of ZnO varistor protection to capacitors of artificially commutated inverter in MTDC system*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.6, no. 1, February 1991 pp. 356-363.
- [ML95] Mahseredjian J., Lagace P.J., Lefebvre S., Chartrand A., *Superposition technique for MOV-protected series capacitors in short-circuit calculations*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, no. 3, July 1995 pp. 1394-1400.
- [MS99] Mattavelli P., Stankovic M.A, Verghese C.G., *SSR analysis with dynamic phasor model of thyristor-controlled series capacitor*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.14, no.1, February 1999, pp. 200-208.
- [NS97] Nadu S.R., Souya B.A., *Analysis of ferroresonant circuits using a Newton-Raphson scheme*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.12, no.4, October 1997, pp. 1793-1798.
- [OA96] Othman A. Hisham, Angquist Lennart, *Analytical modeling of thyristor-controlled series capacitors for SSR studies*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.11, no.1, February 1996, pp. 119-127.
- [PA95] Paap Chr. G., Alkema A.A., Lou van der Sluis, *Overvoltage in power transformers caused by no-load switching*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, no.1, January 1995, pp. 301-306.

- [PH94] Papadias B.C., Hatziargyriou N.D., Bakopoulos J.A., Prousalidis J.M., *Three Phase transformer modeling for fast electromagnetic transient studies*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9, no.2, April 1994, pp. 1151-1156.
- [PL93] Paserba J. John, Leonard J. Daniel, Naumann T. Steven, Lauby G. Mark, Sener P. Fred, *Coordination of a distribution continuously controlled compensation device with existing substation equipment for long term var management*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9, no.2, April 1994, pp. 1034-1040.
- [PM95] Paserba J. John, Miller W.N., Larsen V.E., Piwko J.R., *A thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, no.3, July 1995, pp. 1471-1478.
- [PO04] Pliuță C., Oprea Gh., *Funcționarea eficientă, din punct de vedere tehnic și economic a rețelelor de distribuție*, Energetica, nr. 4, Aprilie 2004, pp. 171÷176.
- [PW96] Piwko R.J., Wegner C.A., Kinney S.J., Eden J.D., *Subsynchronous resonance performance testes of the slatt thyristor-controlled series capacitor*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, no.2, April 1996, pp. 1112-1118.
- [RC00] Rosso A., Canizares A.C., Quintana V., Dona V., *Stabilitz improvement using TCSC in radial power szstems*, NAPS-2000, Waterloo, ON, October 2000.
- [RD96] Robert, A., Deflandre, T., *Guide for assessing the network harmonic impedance*, ELECTRA, no 167, august 1996, pp. 96÷121.
- [SH96] Saha M. M., Hillstrom B., Izkowski j., Kasztenny B., Rosolowski E., *Analysis of the phenomena for series compensated line protection*, International Symposium on MEPS'96, September 26-27, 1996, Wroclaw, Poland, pp. 271-279.
- [SK96] Sugimoto S., Kida J., Arita H., Fukui C., Yamagiwa T. , *Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, no.2, April 1996, pp. 1031-1037.

STANDARDE ȘI NORMATIVE

- [S1] ***SR EN 60143-1, CEI 60143-1, *Condensatoare serie pentru rețele electrice. Partea 1: Generalități – caracteristici funcționale, încercări și valori nominale – Reguli de securitate. Ghid pentru instalare și utilizare*, 2001.
- [S2] ***SR EN 60143-2, CEI 60143-2, *Serie de condensatoare pentru rețele electrice. Partea 2: Echipament de protecție pentru bateria de condensatoare serie*, 2001.
- [S3] ***SR EN 50160, *Caracteristicile tensiunii furnizate de rețelele publice de distribuție*, noiembrie1998.
- [S4] ***SR CEI 38 + A1, *Tensiuni standardizate de CEI*, aprilie 1997.
- [N1] ***PE 142/80, *Normativ privind combaterea efectului de flicker în rețelele de distribuție*, reeditat 1993.
- [N2] ***PE 132/95, *Normativ pentru proiectarea rețelelor electrice de distribuție publică*, 1995.
- [N3] ***PE 143/94, *Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice*, 1994.

Anexa 1

Fișier Mathcad de calcul a supratensiunilor pe bateria de condensatoare la scurtcircuit 3F. (Bateria amplasată la sfârșitul liniei.)

Date de catalog trafo:

$$S_n := 10 \text{ MVA} \quad U_{ni} := 110 \text{ kV} \quad U_{nj} := 22 \text{ kV} \quad P_{scn} := 69 \text{ kW} \quad P_{gn} := 19 \text{ kW}$$

$$usc := 11 \% \quad ign := 1.1 \%$$

Linia electrica

$$L := 20 \text{ km} \quad S := 70 \text{ mm}^2 \quad S_{Al} := 66.2 \text{ mm}^2 \quad rr := 5.8 \text{ mm} \quad hiz := 3.65 \text{ m}$$

$$\rho_{Al} := 0.0282 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad R_{cc} := 1.03 \rho_{Al} \frac{1000}{S_{Al}} \quad Hst := 12.1 \text{ m}$$

$$Drs := \sqrt{1.3^2 + 1.25^2} \quad Dst := Drs \quad Drt := 1.25 \text{ m} \quad R_{cc} = 0.43876 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad t := 100$$

$$D_m := (Drs \cdot Drt \cdot Dst)^{\frac{1}{3}} \quad f_{max} := 5.47 \text{ m} \quad h_1 := Hst - 2 \cdot \frac{f_{max}}{3} \quad h_2 := 10.8 - 2 \cdot \frac{f_{max}}{3}$$

$$D_m = 1.59604 \quad r_m := 0.8116rr$$

$$X_{01} := 0.1454 \log\left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3}}\right) \quad h_m := \sqrt{h_1 \cdot h_2} \quad D_{cp} := 1000 \text{ m} \quad rech := (r_m \cdot 10^{-3} \cdot D_m^2)$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot 50 \quad h_m = 20.79804 \text{ m} \quad R_{p0} := 0.05 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$X_{01} = 0.3679$$

$$C_{01} := \frac{0.0241310^{-6}}{\log\left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3}}\right)} \quad C_{010} := \frac{0.0241310^{-6}}{\log\left(\frac{8 \cdot h_m^3}{r_m \cdot 10^{-3} \cdot D_m^2}\right)} \quad X_{010} := 3 \cdot 0.1445 \log\left(\frac{D_{cp}}{rech}\right)$$

$$C_{010} = 3.60815 \times 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{km}} \quad C_{01} = 9.89091 \times 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{km}}$$

Parametrii transformatorului:

$$R_t := \frac{P_{scn}}{1000} \frac{U_{nj}^2}{S_n^2} \quad X_t := \frac{usc}{100} \frac{U_{nj}^2}{S_n} \quad G_t := \frac{P_{gn}}{1000} \frac{1}{U_{nj}^2} \quad B_t := \frac{ign}{100} \frac{S_n}{U_{nj}^2}$$

$$R_t = 0.33396 \Omega \quad X_t = 5.324 \Omega \quad G_t = 3.92562 \times 10^{-5} \text{ S} \quad B_t = 2.27273 \times 10^{-4} \text{ S}$$

$$L_t := \frac{X_t}{2 \cdot \pi \cdot 50} \quad L_t = 0.01695 \text{ H} \quad L_{\mu} := \frac{1}{B_t \cdot \omega} \quad L_{\mu} = 14.00563 \text{ H}$$

Linia electrica

$$R_l := R_{cc} \cdot L \quad X_l := X_{01} L \quad C_l := C_{01} L \quad R_{l0} := (R_{cc} + R_{p0}) \cdot L$$

$$L_l := \frac{X_l}{2 \cdot \pi \cdot 50} \quad C_{l0} := C_{010} L \quad L_{l0} := X_{010} \frac{L}{\omega} \quad L_l = 0.02342 \text{ H}$$

$$C_l = 1.97818 \times 10^{-7} \text{ F} \quad C_{l0} = 7.21629 \times 10^{-8} \text{ F}$$

$$K_{comp} := 1.812$$

$$U := \frac{20150 \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ V} \quad U_n := 20 \text{ kV} \quad S_{sc3F} := 800 \text{ MVA}$$

$$X_{cc} := K_{comp} \cdot X_l \quad X_s := \frac{U_n^2}{S_{sc3F}} \quad X_s = 0.5 \quad \Omega \quad L_s := \frac{X_s}{\omega}$$

$$C_c := \frac{1}{\omega \cdot X_{cc}} \quad C_c = 2.38743 \times 10^{-4} \text{ F}$$

Stabilirea conditiilor initiale

$$R_c := 120 \quad \Omega \quad L_c := 0.184997 \text{ H}$$

$$Z_s := i \cdot X_s \quad X_c := \omega \cdot L_c$$

$$Z_l := R_l + i \cdot X_l \quad Z_t := R_t + i \cdot X_t \quad Y_t := G_t - i \cdot B_t \quad Y_l := i\omega \cdot C_l$$

$$Z_c := R_c + i \cdot X_c \quad Z_c = 120 + 58.11852i$$

$$M := (-Y_t \cdot Z_c + i \cdot Y_t \cdot X_{cc} - Y_l \cdot Z_l \cdot Y_t \cdot Z_c + i \cdot Y_l \cdot Z_l \cdot Y_t \cdot X_{cc} - Z_l \cdot Y_t - Y_l \cdot Z_c + i \cdot Y_l \cdot X_{cc} - 1)$$

$$N := [-Z_t \cdot Z_c + i \cdot Z_t \cdot X_{cc} - Z_s \cdot Z_c + i \cdot Z_s \cdot X_{cc} + (i \cdot Z_s \cdot Y_l \cdot X_{cc} - Z_s - Z_t + i \cdot Z_t \cdot Y_l \cdot X_{cc} - Z_t \cdot Y_l \cdot Z_c - Z_s \cdot Y_l \cdot Z_c) \cdot Z_l] \cdot Y_t$$

$$V := (i \cdot Y_l \cdot X_{cc} - Y_l \cdot Z_c - 1) \cdot Z_l - Z_t \cdot Y_l \cdot Z_c + i \cdot X_{cc} - Z_c - Z_s \cdot Y_l \cdot Z_c - Z_s + i \cdot Z_t \cdot Y_l \cdot X_{cc} - Z_t + i \cdot Z_s \cdot Y_l \cdot X_{cc}$$

$$I_1 := U \cdot \frac{M}{N + V}$$

$$I_2 := -(U + I_1 \cdot Z_s + I_1 \cdot Z_t) \cdot Y_t$$

$$I_3 := I_1 - I_2$$

$$I_4 := \frac{-(-I_2 + Z_l \cdot I_3 \cdot Y_t)}{Y_t} \cdot Y_l$$

$$I_5 := I_3 - I_4$$

$$I_1 = 106.51187 - 50.42159i \text{ A} \quad I_2 = 0.49578 - 3.68805i \text{ A} \quad I_3 = 106.0161 - 46.73354i \text{ A}$$

$$I_4 = 0.0605 + 0.92281i \text{ A} \quad I_5 = 105.9556 - 47.65635i \text{ A} \quad |I_3| = 115.85955 \text{ A}$$

$$|I_5| = 116.17967 \text{ A} \quad |I_4| = 0.92479 \text{ A}$$

$$U_{c0} := -i \cdot X_{cc} \cdot I_5 \quad U_{cl0} := \frac{I_4}{Y_l}$$

$$U_{c0} = -635.39037 - 1.41268i \times 10^3 \text{ V} \quad |U_{c0}| = 1.549 \times 10^3 \text{ V}$$

$$U_{cl0} = 1.4849 \times 10^4 - 973.45885i \text{ V} \quad |U_{cl0}| = 1.48809 \times 10^4 \text{ V}$$

$$U_{cons} := U_{cl0} - (-i \cdot X_{cc}) \cdot I_5$$

$$U_{cons} = 1.54844 \times 10^4 + 439.22112i \text{ V}$$

$$\phi_{cons} := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(U_{cons})}{\text{Re}(U_{cons})}\right) \quad I_1 := |I_1| \cdot e^{i\left(\omega \cdot t + 2\pi + \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(I_1)}{\text{Re}(I_1)}\right)\right)} \quad I_{10} := |I_1| \cdot e^{i\left(\omega \cdot 0 + \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(I_1)}{\text{Re}(I_1)}\right)\right)}$$

$$U_{c0complex} := |U_{c0}| \cdot e^{i\left(\omega \cdot t + \pi + \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(U_{c0})}{\text{Re}(U_{c0})}\right)\right)} \quad U_{cl0complex} := |U_{cl0}| \cdot e^{i\left((\omega \cdot t + 2\pi) + \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(U_{cl0})}{\text{Re}(U_{cl0})}\right)\right)}$$

$$U_{c0complex} = -635.39037 - 1.41268i \times 10^3 \text{ V} \quad U_{cl0complex} = 1.4849 \times 10^4 - 973.45885i \text{ V}$$

$$I_{10} = 106.51187 - 50.42159i \quad U_y := |U_{cons}| \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$\phi_{U_{c0}} := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(U_{c0})}{\text{Re}(U_{c0})}\right) \quad \phi_{U_{cl}} := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(U_{cl0})}{\text{Re}(U_{cl0})}\right) \quad \phi_{U_{cl}} = -3.75078 \text{ deg} \quad U_y = 1.89721 \times 10^4 \text{ V}$$

$$n := 10000 \quad U_f := 20150 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{V} \quad C_2 := 2.3815410^{-9} \quad \text{F}$$

$$t := 0..n$$

$$x_1 := \pi \cdot \frac{40t}{\omega \cdot n}$$

$$U_{1t} := U \cdot \sin(\omega \cdot x_1)$$

$$U_{c01t} := |U_{c0}| \cdot \sin\left[\omega \cdot x_1 + (\pi + \phi_{Uc0})\right]$$

$$U_{c0p_t} := -|U_{c0}| \cdot \cos(\omega \cdot x_1 + \phi_{Uc0}) \cdot \omega$$

$$U_{cl0_t} := |U_{cl0}| \cdot \sin\left[\omega \cdot x_1 + (2\pi + \phi_{Ucl})\right]$$

$$I_{10_t} := |I_1| \cdot \sin\left(\omega \cdot x_1 + 2\pi + \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(I_1)}{\operatorname{Re}(I_1)}\right)\right)$$

$$U_{clp_t} := |U_{cl0}| \cdot \cos(\omega \cdot x_1 + \phi_{Ucl}) \cdot \omega$$

$$I_{30_t} := |I_3| \cdot \sin\left(\omega \cdot x_1 + 2\pi + \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(I_3)}{\operatorname{Re}(I_3)}\right)\right)$$

$$U_{c01S_t} := |U_{c0}| \cdot \sin\left[\omega \cdot x_1 - 2 \cdot \frac{\pi}{3} + (\pi + \phi_{Uc0})\right]$$

$$I_{10S_t} := |I_1| \cdot \sin\left(\omega \cdot x_1 + 2\pi - 2 \cdot \frac{\pi}{3} + \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(I_1)}{\operatorname{Re}(I_1)}\right)\right)$$

$$I_{10T_t} := |I_1| \cdot \sin\left(\omega \cdot x_1 + 2\pi - 4 \cdot \frac{\pi}{3} + \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(I_1)}{\operatorname{Re}(I_1)}\right)\right)$$

$$U_{cl0S_t} := |U_{cl0}| \cdot \sin\left[\omega \cdot x_1 - 2 \cdot \frac{\pi}{3} + (2\pi + \phi_{Ucl})\right]$$

$$U_{cl0T_t} := |U_{cl0}| \cdot \sin\left[\omega \cdot x_1 - 4 \cdot \frac{\pi}{3} + (2\pi + \phi_{Ucl})\right]$$

$$U_{c01T_t} := |U_{c0}| \cdot \sin\left[\omega \cdot x_1 - 4 \cdot \frac{\pi}{3} + (\pi + \phi_{Uc0})\right]$$

$$L_s := 0$$

$$\delta l := \frac{R_t + R_l}{L_l + L_t + L_s} \quad \omega l := \frac{1}{\sqrt{(L_l + L_t + L_s) \cdot (C_l + C_c)}}$$

$$\delta l = 225.65274 \quad \omega l = 321.98492$$

$$z_2 := \begin{pmatrix} \omega l^2 \\ \delta l \\ 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_1 := \sqrt{\omega l^2 - \left(\frac{\delta l}{2}\right)^2}$$

$$r_2 := \text{polyroots}(z_2) \quad \sigma_1 = 301.57006$$

$$r_2 = \begin{pmatrix} -112.82637 - 301.57006i \\ -112.82637 + 301.57006i \end{pmatrix}$$

$$Y(j) := j^2 + \delta l \cdot j + \omega l^2 \quad Yd(j) := 2 \cdot j + \delta l \quad w := \cos\left(-4 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

Primul termen

$$S_1 := \frac{\omega l^2 \cdot \omega}{2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot Y(i \cdot \omega)} \quad S_2 := \frac{\omega l^2 \cdot \omega}{2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot Y(-i \cdot \omega)} \quad S_3 := \frac{\omega l^2 \cdot \omega}{\left[\omega^2 + (r_{20})^2\right] \cdot Yd(r_{20})} \quad S_4 := \frac{\omega l^2 \cdot \omega}{\left[\omega^2 + (r_{21})^2\right] \cdot Yd(r_{21})}$$

$$S_1 = -0.72764 - 0.0511i \quad S_2 = -0.72764 + 0.0511i \quad S_3 = 0.72764 + 0.219i \quad S_4 = 0.72764 - 0.219i$$

$$U_{cl}(t) := 2U_f \cdot \left[\operatorname{Re}(S_1) \cdot \cos(x_1 \cdot \omega) - \operatorname{Im}(S_1) \cdot \sin(x_1 \cdot \omega) + e^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_1} \cdot \left(\operatorname{Re}(S_3) \cdot \cos(x_1 \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S_3) \cdot \sin(x_1 \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right) \right]$$

$$S_5 := \frac{1}{C_c + C_l} \cdot \frac{(U_{c010} \cdot C_c + C_l \cdot U_{cl00}) \cdot (r_{20} + \delta l) + I_{100}}{Yd(r_{20})} \quad S_6 := \frac{1}{C_c + C_l} \cdot \frac{(U_{c010} \cdot C_c + C_l \cdot U_{cl00}) \cdot (r_{21} + \delta l) + I_{100}}{Yd(r_{21})}$$

$$S5 = -706.15817 - 614.06618i \quad S6 = -706.15817 + 614.06618i$$

$$Uc2(t) := (e)^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot 2 \left(\operatorname{Re}(S5) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S5) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right)$$

$$UcR(t) := Uc1(t) + Uc2(t)$$

Faza S

$$w := \sin\left(-2 \frac{\pi}{3}\right) \quad w1 := \cos\left(-2 \frac{\pi}{3}\right)$$

$$S1a := \frac{\omega l^2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot w}{2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot Y(i \cdot \omega)} \quad S2a := \frac{\omega l^2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot w}{2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot Y(-i \cdot \omega)} \quad S3a := \frac{\omega l^2 \cdot r_{20} \cdot w}{\left[\omega^2 + (r_{20})^2\right] \cdot Yd(r_{20})} \quad S4a := \frac{\omega l^2 \cdot r_{21} \cdot w}{\left[\omega^2 + (r_{21})^2\right] \cdot Yd(r_{21})}$$

$$S1a = -0.04425 + 0.63015i \quad S3a = 0.04425 + 0.67301i \quad S4a = 0.04425 - 0.67301i$$

$$S1b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot Y(i \cdot \omega)} \quad S2b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot Y(-i \cdot \omega)} \quad S3b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{\left[\omega^2 + (r_{20})^2\right] \cdot Yd(r_{20})} \quad S4b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{\left[\omega^2 + (r_{21})^2\right] \cdot Yd(r_{21})}$$

$$S1b = 0.36382 + 0.02555i \quad S3b = -0.36382 - 0.1095i \quad S4b = -0.36382 + 0.1095i$$

$$UcSa(t) := \left[\operatorname{Re}(S1b) \cdot \cos(x_t \cdot \omega) - \operatorname{Im}(S1b) \cdot \sin(x_t \cdot \omega) + e^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot \left(\operatorname{Re}(S3b) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S3b) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right) \right]$$

$$UcS1(t) := 2Uf \cdot \left[\operatorname{Re}(S1a) \cdot \cos(x_t \cdot \omega) - \operatorname{Im}(S1a) \cdot \sin(x_t \cdot \omega) + e^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot \left(\operatorname{Re}(S3a) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S3a) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right) \right] + UcSa(t)$$

$$S5s := \frac{1}{Cc + Cl} \cdot \frac{(Uc01S_0 \cdot Cc + ClUc10S_0) \cdot (r_{20} + \delta l) + I10S_0}{Yd(r_{20})} \quad S6s := \frac{1}{Cc + Cl} \cdot \frac{(Uc01S_0 \cdot Cc + ClUc10S_0) \cdot (r_{21} + \delta l) + I10S_0}{Yd(r_{21})}$$

$$S5s = 265.62052 - 365.74749i \quad S6s = 265.62052 + 365.74749i$$

$$Uc2S(t) := (e)^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot 2 \left(\operatorname{Re}(S5s) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S5s) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right)$$

$$UcS(t) := UcS1(t) + Uc2S(t)$$

$$w := \sin\left(-4 \frac{\pi}{3}\right) \quad w1 := \cos\left(-4 \frac{\pi}{3}\right)$$

$$S1a := \frac{\omega l^2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot w}{2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot Y(i \cdot \omega)} \quad S2a := \frac{\omega l^2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot w}{2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot Y(-i \cdot \omega)} \quad S3a := \frac{\omega l^2 \cdot r_{20} \cdot w}{\left[\omega^2 + (r_{20})^2\right] \cdot Yd(r_{20})} \quad S4a := \frac{\omega l^2 \cdot r_{21} \cdot w}{\left[\omega^2 + (r_{21})^2\right] \cdot Yd(r_{21})}$$

$$S1a = 0.04425 - 0.63015i \quad S3a = -0.04425 - 0.67301i \quad S4a = -0.04425 + 0.67301i$$

$$S1b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{2 \cdot (i \cdot \omega) \cdot Y(i \cdot \omega)} \quad S2b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{2 \cdot (-i \cdot \omega) \cdot Y(-i \cdot \omega)} \quad S3b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{\left[\omega^2 + (r_{20})^2\right] \cdot Yd(r_{20})} \quad S4b := \frac{\omega l^2 \cdot \omega \cdot w1}{\left[\omega^2 + (r_{21})^2\right] \cdot Yd(r_{21})}$$

$$S1b = 0.36382 + 0.02555i \quad S3b = -0.36382 - 0.1095i \quad S4b = -0.36382 + 0.1095i$$

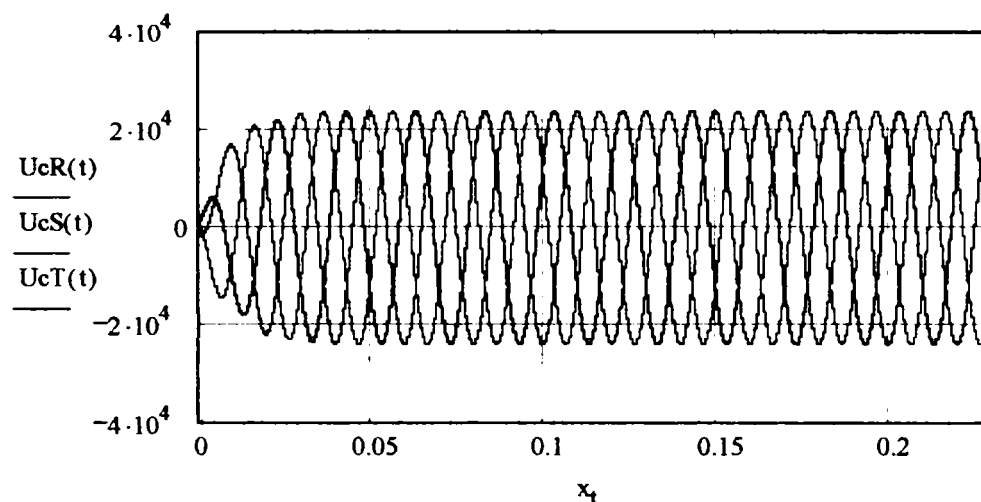
$$Uta(t) := \operatorname{Re}(S1b) \cdot \cos(x_t \cdot \omega) - \operatorname{Im}(S1b) \cdot \sin(x_t \cdot \omega) + e^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot \left(\operatorname{Re}(S3b) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S3b) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right)$$

$$Uc1T(t) := 2Uf \cdot \left[\operatorname{Re}(S1a) \cdot \cos(x_t \cdot \omega) - \operatorname{Im}(S1a) \cdot \sin(x_t \cdot \omega) + e^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot \left(\operatorname{Re}(S3a) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S3a) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right) \right] + Uta(t)$$

$$S5t := \frac{1}{Cc + Cl} \cdot \frac{(Uc01T_0 \cdot Cc + ClUc10T_0) \cdot (r_{20} + \delta l) + I10T_0}{Yd(r_{20})} \quad S6t := \frac{1}{Cc + Cl} \cdot \frac{(Uc01T_0 \cdot Cc + ClUc10T_0) \cdot (r_{21} + \delta l) + I10T_0}{Yd(r_{21})}$$

$$U_{c2T}(t) := (e)^{\operatorname{Re}(r_{20}) \cdot x_t} \cdot 2 \left(\operatorname{Re}(S5t) \cdot \cos(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) - \operatorname{Im}(S5t) \cdot \sin(x_t \cdot \operatorname{Im}(r_{20})) \right)$$

$$U_{cT}(t) := U_{c1T}(t) + U_{c2T}(t)$$



Secvență de calcul a supratensiunilor pe fazele sănătoase la punerea la pământ a unei faze într-o rețea cu neutrul tratat prin rezistor de limitare.

a) În regim stabilizat

$$a := \frac{-1}{2} + i \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$K_{\text{comp}} := 1.5 \quad X_{\text{cc}} := K_{\text{comp}} \cdot X_l \quad C_c := \frac{1}{\omega \cdot X_{\text{cc}}} \quad Z_{\text{comp}} := \frac{-i}{\omega \cdot C_c}$$

$$Z_N := 36 \, \Omega \quad Z_{NA} := 10.5 + i \cdot 24.4 \, \Omega$$

$$Z_{da1} := \frac{1}{\frac{1}{Z_t + Z_s} + \frac{Y_l}{2} + \frac{1}{Z_{NA}}} + Z_l + Z_{\text{comp}} \quad Z_{db} := \frac{1}{\frac{1}{Z_{da1}} + \frac{Y_l}{2}} \quad Z_{d1} := \frac{1}{\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_{db}}}$$

$$Z_{h1} := \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{Z_{NA} + 3Z_N} + \frac{Y_{l0}}{2}} \right) + \frac{Y_{l0}}{2}}} + Z_{\text{comp}}$$

$$U_{d1} := -U_f - \frac{-U_f}{2 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}} \quad U_{i1} := \frac{U_f}{2 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}} \quad U_{h1} := \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}} \cdot \frac{U_f}{2 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}}$$

$$U_{d1} = -1.66145 \times 10^4 - 1.23336 \times 10^3 \, \text{V} \quad U_{i1} = 1.12936 \times 10^3 - 1.23336 \times 10^3$$

$$U_{h1} = 1.54851 \times 10^4 + 2.46672 \times 10^3 \, \text{V}$$

$$U_{s1} := U_{h1} + a^2 \cdot U_{d1} + a \cdot U_{i1} \quad U_{t1} := U_{h1} + a^2 \cdot U_{i1} + a \cdot U_{d1}$$

$$U_{Ss1}(t) := \sqrt{\operatorname{Re}(U_{s1})^2 + \operatorname{Im}(U_{s1})^2} \cdot \cos \left[\omega \cdot x_t + \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(U_{s1})}{\operatorname{Re}(U_{s1})} \right) \right) \right]$$

$$U_{Tt1}(t) := \sqrt{\operatorname{Re}(U_{t1})^2 + \operatorname{Im}(U_{t1})^2} \cdot \cos \left[\omega \cdot x_t + \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(U_{t1})}{\operatorname{Re}(U_{t1})} \right) \right) \right]$$

$$\Pi 1a := \frac{-U - Ud1}{\frac{1}{\left(\frac{1}{Zt + Zs} + \frac{1}{ZNA}\right)} + Zl + Zcomp} \quad \Pi 21 := \frac{Ui1}{\frac{1}{\frac{1}{Zt + Zs} + \frac{1}{ZNA}} + Zl + Zcomp}$$

$$UdL1 := Ud1 + \Pi 1a \cdot (Zl + Zcomp) \quad UiL1 := Ui1 + \Pi 21 \cdot (Zl + Zcomp)$$

$$\Pi 1a = -119.57639 - 11.24896i \text{ A} \quad \Pi 21 = 109.90936 + 0.57935i \text{ A} \quad I01 = 86.60474 - 51.7184i \text{ A}$$

$$UhlL1 := Uh1 - I01 \cdot Zl0 \quad UhlL1 = 1.20533 \times 10^4 - 1.08015 \times 10^3 \text{ V}$$

$$UsL1 := UhlL1 + a^2 \cdot UdL1 + a \cdot UiL1 \quad UtL1 := UhlL1 + a^2 \cdot UiL1 + a \cdot UdL1$$

$$UsL1 = 2.2952 \times 10^4 + 1.75808 \times 10^4 \text{ V} \quad UtL1 = 1.6901 \times 10^4 - 1.7323 \times 10^4 \text{ V}$$

$$USsL1(t) := \sqrt{\text{Re}(UsL1)^2 + \text{Im}(UsL1)^2} \cdot \cos \left[\omega \cdot x_1 + \left(\text{atan} \left(\frac{\text{Im}(UsL1)}{\text{Re}(UsL1)} \right) \right) \right]$$

$$UTsL1(t) := \sqrt{\text{Re}(UtL1)^2 + \text{Im}(UtL1)^2} \cdot \cos \left[\omega \cdot x_1 + \left(\text{atan} \left(\frac{\text{Im}(UtL1)}{\text{Re}(UtL1)} \right) \right) \right]$$

b) În regim tranzitoriu

$$A2 := UL \cdot L1 \cdot (3 \cdot c + C10) \cdot (L1 + 3 \cdot Lb)$$

$$B2 := [UL \cdot R1 \cdot (3 \cdot c + C10) \cdot (L1 + 3 \cdot Lb) + UL \cdot L1 \cdot (3 \cdot c + C10) \cdot (R1 + 3 \cdot Rb)]$$

$$C2 := \left[\left[Uf + \frac{UL}{Cc} \cdot (3 \cdot c + C10) \right] \cdot (L1 + 3 \cdot Lb) + UL \cdot R1 \cdot (3 \cdot c + C10) \cdot (R1 + 3 \cdot Rb) + UL \cdot L1 \cdot \frac{(3 \cdot c + C10)}{Cc} \right]$$

$$D2 := \left[\left[Uf + \frac{UL}{Cc} \cdot (3 \cdot c + C10) \right] \cdot (R1 + 3 \cdot Rb) + UL \cdot R1 \cdot \frac{(3 \cdot c + C10)}{Cc} \right]$$

$$E2 := \left[Uf + \frac{UL}{Cc} \cdot (3 \cdot c + C10) \right]$$

$$Bn(j) := A2 \cdot j^4 + B2 \cdot j^3 + C2 \cdot j^2 + D2 \cdot j + E2$$

$$2 \cdot p \cdot \left[p \cdot \left(R1 + p \cdot L1 + \frac{1}{p \cdot Cc} \right) \cdot \left[R1 + p \cdot L1 + \frac{1}{p \cdot Cc} + 3 \cdot (Rb + p \cdot Lb) \right] \cdot (C1 + C10) + \left[R1 + p \cdot L1 + \frac{1}{p \cdot Cc} \right] \right]$$

$$A3 := 2 \cdot L1 \cdot (L1 + 3 \cdot Lb) \cdot (c + C10)$$

$$B3 := 2 \cdot [R1 \cdot (L1 + 3 \cdot Lb) + L1 \cdot (R1 + 3 \cdot Rb)] \cdot (c + C10)$$

$$C3 := 2 \cdot \left[\frac{1}{Cc} \cdot (L1 + 3 \cdot Lb) + R1 \cdot (R1 + 3 \cdot Rb) + \frac{L1}{Cc} \right] \cdot (c + C10) + 2 \cdot L1 + 2 \cdot Lb$$

$$D3 := 2 \cdot \left[\frac{1}{Cc} \cdot (R1 + 3 \cdot Rb) + \frac{R1}{Cc} \right] \cdot (c + C10) + 2 \cdot Rb + 2 \cdot R1 \quad E3 := \frac{2}{Cc^2} \cdot (c + C10) + \frac{2}{Cc}$$

$$Bm(j) := A3 \cdot j^4 + B3 \cdot j^3 + C3 \cdot j^2 + D3 \cdot j + E3$$

$$Bmd(j) := 4A3 \cdot j^3 + 3B3 \cdot j^2 + 2C3 \cdot j + D3$$

$$y2a := \begin{pmatrix} E3 \\ D3 \\ C3 \\ B3 \\ A3 \end{pmatrix} \quad y22 := \text{polyroots}(y2a)$$

$$y22 = \begin{pmatrix} -180.86236 + 178.598i \\ -180.86236 - 178.598i \\ -128.43871 - 7.30163 \times 10^3 \\ -128.43871 + 7.30163 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$S1 := \frac{Bn(0)}{Bm(0)} \quad S2 := \frac{Bn(y22_0)}{y22_0 \cdot Bmd(y22_0)} \quad S3 := \frac{Bn(y22_1)}{y22_1 \cdot Bmd(y22_1)} \quad S4 := \frac{Bn(y22_2)}{y22_2 \cdot Bmd(y22_2)}$$

$$S5 := \frac{Bn(y22_3)}{y22_3 \cdot Bmd(y22_3)}$$

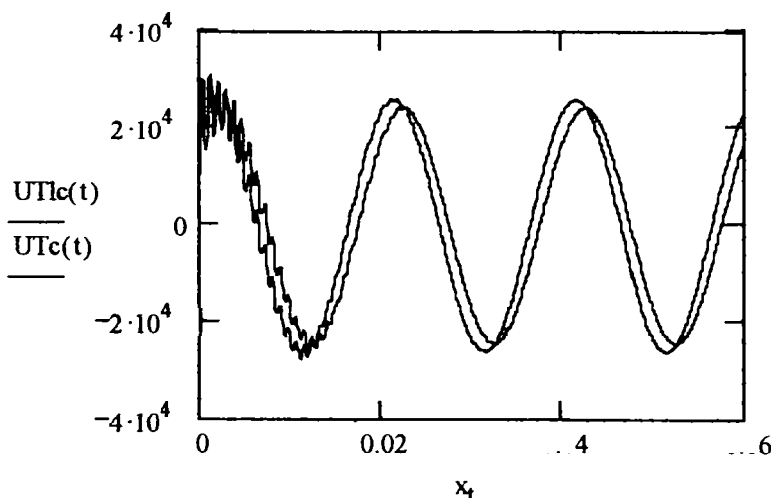
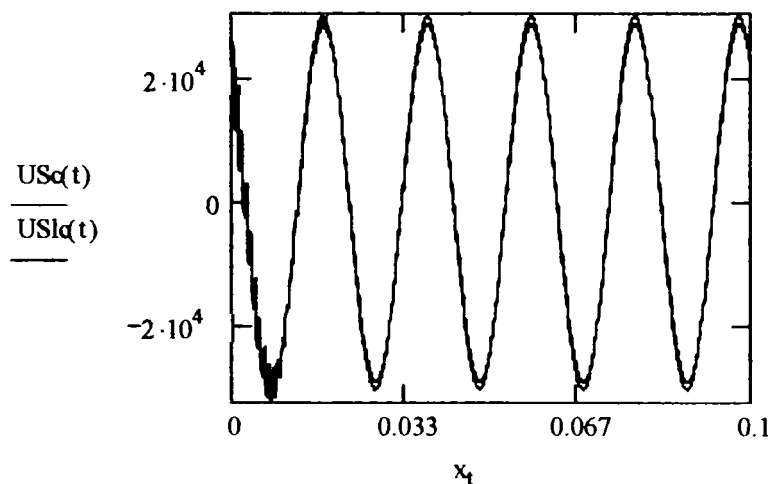
$$S1 = 1.0785 \quad S2 = 9.80765 \times 10^3 - 1.31022i \times 10^4 \quad S3 = 9.80765 \times 10^3 + 1.31022i \times 10^4$$

$$S4 = -2.99963 \times 10^3 - 130.30733i \quad S5 = -2.99963 \times 10^3 + 130.30733i$$

$$Uz(t) := 2 \left[e^{Rd(y22_1) \cdot x_t} \left[R\alpha(S3) \cos[x_t \cdot \text{Im}(y22_1)] + \text{Im}(S3) \sin[x_t \cdot \text{Im}(y22_1)] \right] + e^{Rd(y22_2) \cdot x_t} \left[R\alpha(S4) \cos[x_t \cdot \text{Im}(y22_2)] + \text{Im}(S4) \sin[x_t \cdot \text{Im}(y22_2)] \right] \right] + S1 \cdot \text{Dirac}(t)$$

$$USc(t) := USs1(t) + Uz1(t) \quad UTc(t) := UTs1(t) + Uz1(t)$$

$$USl(t) := USs1(t) + Uz1(t) \quad UTl(t) := UTs1(t) + Uz1(t)$$



Secvența de calcul a supratensiunilor pe fazele sănătoase la punerea la pământ a fazei R, într-o rețea cu neutru izolat, linia este prevăzută cu compensare capacitivă serie:

a) regim staționar

$$Zda1 := \frac{1}{\frac{1}{Zt + Zs} + \frac{Yl}{2}} + Zl + Zcomp \quad Zdb1 := \frac{1}{\frac{1}{Zda1} + \frac{Yl}{2}} \quad Zd1 := \frac{1}{\frac{1}{Zc} + \frac{1}{Zdb1}}$$

$$Zh1 := \frac{1}{\left(\frac{1}{Zl0 + \frac{2}{Yl0}} \right) + \frac{Yl0}{2}} + Zcomp$$

$$U_{d1} := -U_f \cdot \left(\frac{1 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}}{2 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}} \right) \quad U_{i1} := \frac{U_f}{2 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}} \quad U_{h1} := \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}} \cdot \frac{U_f}{2 + \frac{Z_{h1}}{Z_{d1}}}$$

$$U_{s1} := U_{h1} + a^2 \cdot U_{d1} + a \cdot U_{i1} \quad U_{t1} := U_{h1} + a^2 \cdot U_{i1} + a \cdot U_{d1}$$

$$U_{Ss1}(t) := \sqrt{\operatorname{Re}(U_{s1})^2 + \operatorname{Im}(U_{s1})^2} \cdot \cos \left[\omega \cdot x_1 + \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(U_{s1})}{\operatorname{Re}(U_{s1})} \right) \right) \right]$$

$$U_{Ts1}(t) := \sqrt{\operatorname{Re}(U_{t1})^2 + \operatorname{Im}(U_{t1})^2} \cdot \cos \left[\omega \cdot x_1 + \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(U_{t1})}{\operatorname{Re}(U_{t1})} \right) \right) \right]$$

b) regim tranzitoriu

$$U = \frac{3}{2} \frac{\left[U_L \cdot (3 \cdot C1 + C10) \cdot L1 \cdot p^2 + U_L \cdot (3 \cdot C1 + C10) \cdot R1 \cdot p + U_L \cdot \frac{(3 \cdot C1 + C10)}{C_c} + U_f \right]}{p \cdot \left[3 \cdot L \cdot (C1 + C10) \cdot p^2 + 3 \cdot R \cdot (C1 + C10) \cdot p + 1 + \frac{3}{C_c} \cdot (C1 + C10) \right]}$$

$$y := \begin{bmatrix} 1 + \frac{3}{C_c} \cdot (c + C10) \\ 3 \cdot R1 \cdot (c + C10) \\ 3 \cdot L1 \cdot (c + C10) \end{bmatrix} \quad y11 := \operatorname{polyroots}(y) \quad y11 = \begin{pmatrix} -99.54042 - 6.26745 \times 10^3 \\ -99.54042 + 6.26745 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$A := U_L \cdot (3 \cdot c + C10) \cdot L1 \quad B := U_L \cdot (3 \cdot c + C10) \cdot R1 \quad D := U_L \cdot \frac{(3 \cdot c + C10)}{C_c} + U_f$$

$$A1 := 3 \cdot L1 \cdot (c + C10) \quad B1 := 3 \cdot R1 \cdot (c + C10)$$

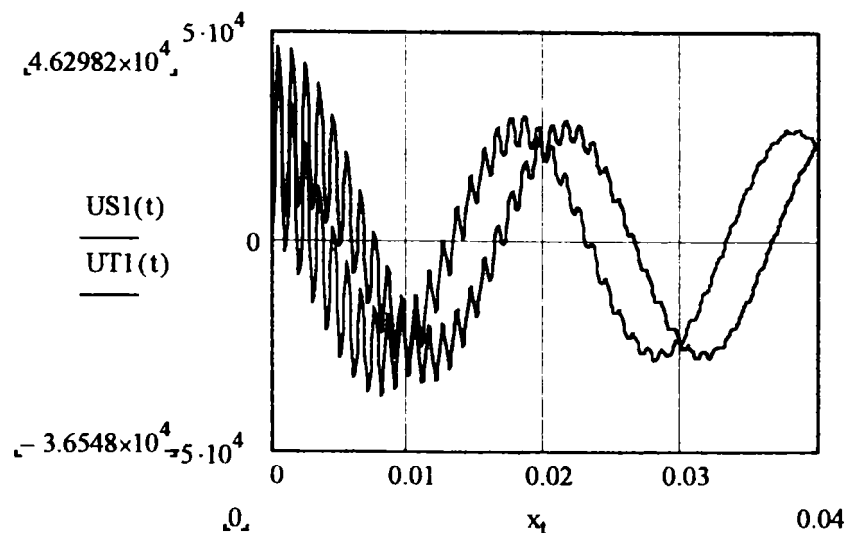
$$Y(j) := A \cdot j^2 + B \cdot j + D \quad Y1(j) := A1 \cdot j^2 + B1 \cdot j + \left[1 + \frac{3}{C_c} \cdot (c + C10) \right] \quad Y11(j) := 2 \cdot A1 \cdot j + B1$$

$$Q11 := \frac{3}{2} \frac{Y(0)}{Y'(0)} \quad Q21 := 3 \cdot \frac{Y(y11_0)}{Y11'(y11_0) \cdot y11_0} \quad Q31 := 3 \cdot \frac{Y(y11_1)}{Y11'(y11_1) \cdot y11_1}$$

$$Q11 = 2.47121 \times 10^4 \quad Q21 = 1.10736 \times 10^4 - 176.09249i \quad Q31 = -1.10598 \times 10^4 + 175.65248i$$

$$U_{a1}(t) := 2 \left[e^{\operatorname{Re}(y11_1) \cdot x_1} \cdot \left(\operatorname{Re}(Q31) \cdot \cos(x_1 \cdot \operatorname{Im}(y11_1)) - \operatorname{Im}(Q31) \cdot \sin(x_1 \cdot \operatorname{Im}(y11_1)) \right) \right] + Q11 \cdot \operatorname{Dirac}(t)$$

$$U_{S1}(t) := U_{Ss1}(t) + U_{a1}(t) \quad U_{T1}(t) := U_{Ts1}(t) + U_{a1}(t)$$



Program de calcul al supratensiunilor la bornele bateriei de condensatoare și pe linia compensată serie, la conectarea bateriei de condensatoare și la scurtcircuit simetric, când bateria este amplasată în stație, respectiv într-un post de transformare în lungul liniei. Metoda de calcul folosită este metoda Runge Kutta IV.

```

program Supratensiuni;
uses crt;
type
Vector=array[1..4] of real;
var
om,U2,U3,beta,xv,xz,Uam:real;
x,np,s,n,i,k,j:integer;
m,cl:char;
t:array[0..1000] of real;
y:array[1..4,0..1000] of real;
Z1,z2,z3,z4:vector;
Rt,Lt,Ls,Rl,C1,C,K1,l,Uf,b1,d1,d,A,B,g,o,h,Lu,Ll,R2,tp,tf:real;
d2,U4,U5,C11,C2: real;
procedure Datein;
begin
clrscr;writeln;
write('          CITESTE DATELE INITIALE');writeln;
Rt:=0.3396;
beta:=9.33;
om:=314;
Ls:=0.0015915;
Lt:=0.017;
Ll:=0.021;
Lu:=14.013;
C1:=2.096e-7;
C:=7.37e-4;
Rl:=6.42;
R2:=64;
C11:={C}2.654e-4;
C2:={13.5e-4}4.716e-4;
K1:=1.9618e-29;
a:=Lt+Ll;
Uf:=20000/sqrt(3);
readln;
writeln('1. Rt= ',Rt:6:4,' ohmi');
writeln('2. Ls= ',Ls:6:4,' H');
writeln('3. Lu= ',Lu:6:4,' H');
writeln('4. Lt= ',Lt:6:4,' H');
writeln('5. C= ',C:6:4,' F');
writeln('6. C1= ',C1:6:4,' F');
writeln('7. Rl= ',Rl:6:4,' ohmi');
writeln('8. Ll= ',Ll:6:4,' H');
writeln('9. R2= ',R2:6:4,' ohmi');
writeln('10. Uf= ',Uf:6:4,' V');
readln;
repeat
writeln('Doriti sa modificati parametrii? (d/n)');
readln(cl);
if cl='d' then
begin
writeln('Tastati un nr intre 1-10 in funct. parametrul pe care il modif.');
```

```

if x=3 then
begin
write('Lu=');readln(Lu);
end;
if x=4 then
begin
write('Lt=');readln(Lt);
end;
if x=5 then
begin
write('C=');readln(C);
end;
if x=6 then
begin
write('Cl=');readln(Cl);
end;
if x=7 then
begin
write('Rl=');readln(Rl);
end;
if x=8 then
begin
write('Ll=');readln(Ll);
end;
if x=9 then
begin
write('R2=');readln(R2);
end;
if x=10 then
begin
write('Uf=');readln(Uf);
end;
end;
until cl='n';
writeln;
end;
{=====datein=====}
procedure CALDERIV(t:real; Yvechi: vector; var Ynou: vector);
begin
Ynou[1]:=Yvechi[3];
Ynou[2]:=Yvechi[4];
o:=(1/(Lt*Cl)+1/(Ll*Cl));
g:=(Rt/Lt-(R2+Rl)/Ll)*(C/Cl);
Ynou[3]:=(Uf/(Lt*C))*cos(om*t)-(Rt/Lt)*Yvechi[3]-(1/(Lt*C))*Yvechi[1]-
(1/(Lt*C))*Yvechi[2];
Ynou[4]:=(Uf/(Lt*Cl))*cos(om*t)-g*Yvechi[3]-((Rl+R2)/Ll)*Yvechi[4]-
(1/(Lt*Cl))*Yvechi[1]-o*Yvechi[2];
end; {=====CALDERIV CON=====}
FUNCTION U1(d:real):real;
begin
b1:=abs(Y[1,i-1]);
U1:=exp(d*ln(b1));
end;
procedure CALDERIV1(t:real; Ylvechi: vector; var Ylnou: vector);
begin
Ylnou[1]:=Ylvechi[3];
Ylnou[2]:=Ylvechi[4];
d1:=beta-1;
d:=d1;
U2:=U1(d);
d:=beta;
U3:=U1(d);
o:=(1/(Lt*C)+1/(Ll*Cl));
xv:=(1/(Lt*C));
l:=(Rt/(Lt*C)*K1);

```

```

Y1nou[3]:=(Uf/(Lt*C))*cos(om*t)-((K1*beta)/C)*U2*Y1vechi[3]-
(Rt/Lt)*Y1vechi[3]-xv*Y1vechi[1]-xv*Y1vechi[2]-l*U3);
xz:=(Rt/Lt-((R2+R1)/L1));
Y1nou[4]:=(Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)-xz*(C/C1)*Y1vechi[3]-xz*(K1/C1)*U3-
((R1+R2)/L1)*Y1vechi[4]-xv*Y1vechi[1]-o*Y1vechi[2]);
end; {=====CALDERIV1 CONDRV=====}
procedure CALDERIV2(t:real; Y2vechi:vector; var Y2nou:vector);
begin
Y2nou[1]:=(1/L1)*(Y2vechi[2]-(R1+R2)*Y2vechi[1]);
Y2nou[2]:=Y2vechi[3];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
Y2nou[3]:=(Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)-(Rt/Lt)*Y2vechi[3]-
(1/C1)*(1/L1)*(Y2vechi[2]-(R1+R2)*Y2vechi[1])-(1/(Lt*C1))*Y2vechi[2];
end; {=====CALDERIV2 DEC=====}
procedure CALDERIV3(t:real; Y3vechi:vector; var Y3nou:vector);
begin
Y3nou[1]:=Y3vechi[2];
Y3nou[2]:=(Uf/(Lt*C))*cos(om*t)-(Rt/Lt)*Y3vechi[2]-(1/(C*Lt))*Y3vechi[1];
end; {=====CALDERIV3 SCC=====}
procedure CALDERIV4(t:real; Y4vechi:vector; var Y4nou:vector);
begin
d2:=beta-1;
d:=d2;
U4:=U1(d);
d:=beta;
U5:=U1(d);
Y4nou[1]:=Y4vechi[2];
Y4nou[2]:=(Uf/(Lt*C))*cos(om*t)-((Rt/Lt)+(K1*beta*U4)/C)*Y4vechi[2]-
(1/(C*Lt))*(1+k1*Rt*U4)*Y4vechi[1];
end; {=====CALDERIV4 sccDRV=====}
procedure CALDERIV5(t:real; Y5vechi: vector; var Y5nou: vector);
begin
Y5nou[1]:=Y5vechi[3];
Y5nou[2]:=Y5vechi[4];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
g:=(Rt/Lt-(R2+R1)/L1)*((C11+C2)/C1);
Y5nou[3]:={ (Uf/(Lt*(C11+C2)))*cos(om*t)}-(Rt/Lt)*Y5vechi[3]-
(1/(Lt*(C11+C2)))*Y5vechi[1]-(1/(Lt*(C11+c2)))*Y5vechi[2];
Y5nou[4]:={ (Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)}-g*Y5vechi[3]-((R1+R2)/L1)*Y5vechi[4]-
(1/(Lt*C1))*Y5vechi[1]-o*Y5vechi[2];
end; {====CALDERIV CON capacit.in paralel cu una existenta====}
procedure CALDERIV6(t:real; Y6vechi: vector; var Y6nou: vector);
begin
Y6nou[1]:=Y6vechi[3];
Y6nou[2]:=Y6vechi[4];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
g:=(Rt/Lt-(R2+R1)/L1)*((C11*C2)/((C11+C2)*C1));
Y6nou[3]:=(Uf*(C11+C2)/(Lt*C11*C2))*cos(om*t)-(Rt/Lt)*Y6vechi[3]-
((C11+C2)/(Lt*C11*C2))*(Y6vechi[1]+Y6vechi[2]);
Y6nou[4]:={ (Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)}-g*Y6vechi[3]-((R1+R2)/L1)*Y6vechi[4]-
(1/(Lt*C1))*Y6vechi[1]-o*Y6vechi[2];
end; {===CALDERIV CON capacit.in serie cu o baterie existenta===}
procedure CALDERIVp(t:real; Ypvechi: vector; var Ypnou: vector);
begin
Ypnou[1]:=Ypvechi[3];
Ypnou[2]:=Ypvechi[4];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
g:=(Rt/Lt-(R2+R1)/L1)*(C/C1);
Ypnou[3]:=-((R1+R2)/L1)*Ypvechi[3]-
(1/(L1*C))*Ypvechi[1]+(1/(L1*C))*Ypvechi[2];
Ypnou[4]:={ (Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)}-g*Ypvechi[3]-
(Rt/Lt)*Ypvechi[4]+(1/(Lt*C1))*Ypvechi[1]-o*Ypvechi[2];
end; {=====CALDERIV CONp=====}
procedure CALDERIVs(t:real; Ysvechi: vector; var Ysnou: vector);
begin
Ysnou[1]:=Ysvechi[3];

```

```

Ysnou[2]:=Ysvechi[4];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
g:=(Rt/Lt-R1/L1)*(C/C1);
Ysnou[3]:=- (R1/L1)*Ysvechi[3]- (1/(L1*C))*Ysvechi[1]+(1/(L1*C))*Ysvechi[2];
Ysnou[4]:=(Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)-g*Ysvechi[3]-
(Rt/Lt)*Ysvechi[4]+(1/(L1*C1))*Ysvechi[1]-o*Ysvechi[2];
end; {=====CALDERIV scc la sfarsitul liniei=====}
procedure CALDERIV7(t:real; Y7vechi: vector; var Y7nou: vector);
begin
Y7nou[1]:=Y7vechi[3];
Y7nou[2]:=Y7vechi[4];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
g:=(Rt/Lt-(R2+R1)/L1)*((C11*C2)/((C11+C2)*C1));
Y7nou[3]:=- ((R2+R1)/L1)*Y7vechi[3]-((C11+C2)/(L1*C11*C2))*(Y7vechi[1]-
Y7vechi[2]);
Y7nou[4]:=((Uf/(Lt*C1))*cos(om*t))-g*Y7vechi[3]-
(Rt/Lt)*Y7vechi[4]+(1/(L1*C1))*Y7vechi[1]-o*Y7vechi[2];
end; {==CALDERIV CON capacit.in serie cu o baterie existenta la sf.linie==}
procedure CALDERIV8(t:real; Y8vechi: vector; var Y8nou: vector);
begin
Y8nou[1]:=Y8vechi[3];
Y8nou[2]:=Y8vechi[4];
o:=(1/(Lt*C1)+1/(L1*C1));
g:=(Rt/Lt-(R2+R1)/L1)*((C11+C2)/C1);
Y8nou[3]:=- ((R1+R2)/L1)*Y8vechi[3]-
(1/(L1*(C11+C2)))*Y8vechi[1]+(1/(L1*(C11+c2)))*Y8vechi[2];
Y8nou[4]:=(Uf/(Lt*C1))*cos(om*t)-g*Y8vechi[3]-
(Rt/Lt)*Y8vechi[4]+(1/(L1*C1))*Y8vechi[1]-o*Y8vechi[2];
end; {===CALDERIV CON capacit.in paralel cu una existenta la sf linie===}
procedure con;
var NR_ECUATII: integer;
begin
writeln('Conditiiile initiale sunt:');
write('t init=');readln(t[0]);
write('Nr. ecuatii=');readln(NR_ECUATII);
i:=0;
for j:=1 to NR_ECUATII do
begin
write('y[' ,j ,',0,']');readln(y[j,i]);
{y[1,0]=i30,y[2,0]=i40,y[3,0]=di3/dt=0,y[4,0]=di4/dt=0,y[5,0]=uc0}
end;
writeln;
writeln('nr. de intervale de integrare');
write('n=');readln(n);
writeln;
writeln('valoarea finala tf=');readln(tf);
writeln;
h:=(tf-t[0])/n;
writeln('pasul de integrare h=',h:3:5);
writeln;
readln;
clrscr;
for i:=1 to n do begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV8(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV8(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV8(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);

```

```

for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV8(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
gotoxy(1+20*(j-1),i);write(Y[j,i]:4:5);
readln;
end;
clrscr;
end;{=====RK4=====}
end; {=====con=====}
procedure condrv;
var NR_ECUATII: integer;
begin
writeln('Condițiile initiale sunt:');
write('t init=');readln(t[0]);
write('Nr. ecuatii=');readln(NR_ECUATII);
i:=0;
for j:=1 to NR_ECUATII do
begin
write('y[' ,j, ', ',0, ' ]');readln(y[j,i]);
{y[1,0]=i30,y[2,0]=i40,y[3,0]=di3/dt=0,y[4,0]=di4/dt=0,y[5,0]=uc0}
end;
writeln;
writeln('nr. de intervale de integrare');
write('n=');readln(n);
writeln;
writeln('valoarea finala tf=');readln(tf);
writeln;
h:=(tf-t[0])/n;
writeln('pasul de integrare h=',h:3:5);
writeln;
Uam:=2000;
readln;
clrscr;
for i:=1 to n do
begin
if abs(Y[1,i-1])>=Uam then k:=1;
if k=1 then
begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV1(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV1(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV1(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV1(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
end
end

```

```

else
if k<>1 then
begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
end;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
gotoxy(1+20*(j-1),i);write(Y[j,i]:4:5);
readln;
end;
clrscr;
end;{===== RK4 ====}
end; {===== condrv ====}
procedure dec;
var      NR_ECUATII:integer;
begin
writeln('Conditiiile initiale sunt:');
write('t init=');readln(t[0]);
write('Nr. ecuatii=');readln(NR_ECUATII);
i:=0;
for j:=1 to NR_ECUATII do
begin
write('y['',j,'',0,']');readln(y[j,i]);
{y[1,0]=i30,y[2,0]=i40,y[3,0]=di3/dt=0,y[4,0]=di4/dt=0,y[5,0]=uc0}
end;
writeln;
writeln('nr. de intervale de integrare');
write('n=');readln(n);
writeln;
writeln('valoarea finala tf=');readln(tf);
writeln;
h:=(tf-t[0])/n;
writeln('pasul de integrare h=',h:3:5);
writeln;
readln;
clrscr;
for i:=1 to n do begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV2(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV2(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin

```



```

Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV2(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV2(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
gotoxy(1+20*(j-1),i);write(Y[j,i]:4:5);
readln;
end;
clrscr;
end;{=====RK4=====}
end; {=====decon=====}
procedure scct;
var NR_ECUATII: integer;
begin
writeln('Condițiile initiale sunt:');
write('t init=');readln(t[0]);
write('Nr. ecuatii=');readln(NR_ECUATII);
i:=0;
for j:=1 to NR_ECUATII do
begin
write('y[' ,j, ', ',0, ' ]');readln(y[j,i]);
{y[1,0]=i30,y[2,0]=i40,y[3,0]=di3/dt=0,y[4,0]=di4/dt=0,y[5,0]=uc0}
end;
writeln;
writeln('nr. de intervale de integrare');
write('n=');readln(n);
writeln;
writeln('valoarea finala tf=');readln(tf);
writeln;
h:=(tf-t[0])/n;
writeln('pasul de integrare h=',h:3:5);
writeln;
readln;
clrscr;
for i:=1 to n do begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV3(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV3(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV3(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV3(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
gotoxy(1+20*(j-1),i);write(Y[j,i]:4:5);
readln;

```

```

end;
clrscr;
end;{=====RK4=====}
end; {=====Scurtcircuit imediat dupa baterie=====}
procedure sccDRV;
var NR_ECUATII: integer;
begin
writeln('Conditiiile initiale sunt:');
write('t init=');readln(t[0]);
write('Nr. ecuatii=');readln(NR_ECUATII);
i:=0;
for j:=1 to NR_ECUATII do
begin
write('y[' , j , ', ' , 0 , ' ]');readln(y[j,i]);
{y[1,0]=i30,y[2,0]=i40,y[3,0]=di3/dt=0,y[4,0]=di4/dt=0,y[5,0]=uc0}
end;
writeln;
writeln('nr. de intervale de integrare');
write('n=');readln(n);
writeln;
writeln('valoarea finala tf=');readln(tf);
writeln;
h:=(tf-t[0])/n;
writeln('pasul de integrare h=',h:3:5);
writeln;
Uam:=800;
readln;
clrscr;
for i:=1 to n do
begin
if abs(Y[1,i-1])>=Uam then k:=1;
if k=1 then
begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV4(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV4(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV4(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV4(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
end
else
if k<>1 then
begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV3(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;

```

```

CALDERIV3(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV3(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV3(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;
end;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
gotoxy(1+20*(j-1),i);write(Y[j,i]:4:5);
readln;
end;
clrscr;
end;{===== RK4 ====}
end; {===== condrv ====}
procedure combat;
var NR_ECUATII: integer;
begin
writeln('Condițiile initiale sunt:');
write('t init=');readln(t[0]);
write('Nr. ecuatii=');readln(NR_ECUATII);
i:=0;
for j:=1 to NR_ECUATII do
begin
write('y[' ,j, ', ',0, ' ]');readln(y[j,i]);
{y[1,0]=i30,y[2,0]=i40,y[3,0]=di3/dt=0,y[4,0]=di4/dt=0,y[5,0]=uc0}
end;
writeln;
writeln('nr. de intervale de integrare');
write('n=');readln(n);
writeln;
writeln('valoarea finala tf=');readln(tf);
writeln;
h:=(tf-t[0])/n;
writeln('pasul de integrare h=',h:3:5);
writeln;
readln;
clrscr;
for i:=1 to n do begin
t[i]:=t[i-1]+h;
for j:=1 to NR_ECUATII do begin
Z1[j]:=Y[j, i-1];
end;
CALDERIV5(t[i-1], Z1, Z1);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z2[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z1[j];
end;
CALDERIV5(t[i-1]+0.5*h, Z2, Z2);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z3[j] := Y[j, i-1]+0.5*h*Z2[j];
end;
CALDERIV5(t[i-1]+0.5*h, Z3, Z3);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Z4[j] := Y[j, i-1]+h*Z3[j];
end;
CALDERIV5(t[i], Z4, Z4);
for j := 1 to NR_ECUATII do begin
Y[j,i]:=Y[j,i-1]+h*(Z1[j]+2*Z2[j]+2*Z3[j]+Z4[j])/6;
end;
writeln;

```

```

for j:=1 to NR_ECUATII do begin
gotoxy(1+20*(j-1),i);write(Y[j,i]:4:5);
readln;
end;
clrscr;
end;{=====RK4=====}
end; {=====combat=====}
procedure fisier;
    var fl:text;
        numefis1:string[10];
begin
clrscr;writeln;writeln;writeln;
write('  Introduceti numele fisierului:');readln(numefis1);
assign(fl,numefis1);
rewrite(fl);
for i:=0 to n do
begin
write(fl, t[i] );
for j:=1 to 4 do
begin
write(fl,  Y[j,i] );
end;
writeln(fl);
end;
close(fl);
end;
BEGIN
clrscr;
repeat
clrscr;
writeln;writeln;writeln;
writeln('MENIU GENERAL');
writeln('*****');writeln;writeln;
writeln('1.DATE INITIALE');writeln;
writeln('2.CALCULUL SUPRATENS LA CONEC BATERIEI FARA DRV');writeln;
writeln('3.CALCULUL SUPRATENS LA CONEC BATERIEI CU DRV');writeln;
writeln('4.CALCULUL SUPRATENS LA DECONEC BATERIEI ');writeln;
writeln('5.CALCULUL SUPRATENS LA SCC IMEDIAT DUPA BATERIEI ');writeln;
writeln('6.CALCULUL SUPRATENS LA SCC IMEDIAT DUPA BATERIEI PROT. DRV.
');writeln;
writeln('7.SUPRATENS. LA CONECTAREA UNEI BATERII IN PARALEL CU UNA
EXISTENTA');writeln;
writeln('8.SALVAREA REZULTATELOR IN FISIER');writeln;
writeln('9.IESIRE DIN PROGRAM');writeln;writeln;
writeln('TASTATI UN NR: INTRE 1-9');
repeat
readln(m);
until (m in['1','2','3','4','5','6','7','8','9']);
case m of
'1':Datein;
'2':con;
'3':condrv;
'4':dec;
'5':SCCt;
'6':SCCDRV;
'7':combat;
'8':fisier;
'9':exit
end
until m='9';
readln;
end.

```

Anexa 2

Fișier Mathcad de calcul a impedanței armonice și a coeficienților de transfer de curent și tensiune în nodurile rețelei. (Aplicația 4.6.1)

Caracteristicile transformatorului din stație

$$\begin{aligned} S_n &:= 25 \text{ MVA} & U_{ni} &:= 110 & U_{nj} &:= 22 \text{ kV} & p_{scn} &:= 130 \text{ kW} & u_{scn} &:= 11 \% \\ p_{gn} &:= 30 \text{ kW} & i_{gn} &:= 1 \% \end{aligned}$$

$$R_{ts} := \frac{p_{scn} \cdot U_{nj}^2}{1000 S_n^2} \quad R_{ts} = 0.101 \ \Omega \quad X_{ts} := \frac{u_{scn} \cdot U_{nj}^2}{100 S_n} \quad X_{ts} = 2.13 \ \Omega$$

Caracteristicile transformatorului T1

$$\begin{aligned} S_{nT1} &:= 1 \text{ MVA} & U_{niT1} &:= 20 & U_{njT1} &:= 0.4 \text{ kV} & p_{scnT1} &:= 10.5 \text{ kW} & u_{scnT1} &:= 6 \% \\ p_{gnT1} &:= 1.7 \text{ kW} & i_{gnT1} &:= 1.4 \% \end{aligned}$$

$$R_{tT1} := \frac{p_{scnT1} \cdot U_{niT1}^2}{1000 S_{nT1}^2} \quad R_{tT1} = 4.2 \ \Omega \quad X_{tT1} := \frac{u_{scnT1} \cdot U_{niT1}^2}{100 S_{nT1}} \quad X_{tT1} = 24 \ \Omega$$

Caracteristicile transformatorului T2

$$\begin{aligned} S_{nT2} &:= 1.6 \text{ MVA} & U_{niT2} &:= 20 & U_{njT2} &:= 0.4 \text{ kV} & p_{scnT2} &:= 14.96 \text{ kW} & u_{scnT2} &:= 6 \% \\ p_{gnT2} &:= 2.2 \text{ kW} & i_{gnT2} &:= 1.3 \% \end{aligned}$$

$$R_{tT2} := \frac{p_{scnT2} \cdot U_{niT2}^2}{1000 S_{nT2}^2} \quad R_{tT2} = 2.337 \ \Omega \quad X_{tT2} := \frac{u_{scnT2} \cdot U_{niT2}^2}{100 S_{nT2}} \quad X_{tT2} = 15 \ \Omega$$

Caracteristicile transformatorului T3

$$\begin{aligned} S_{nT3} &:= 1 \text{ MVA} & U_{niT3} &:= 20 & U_{njT3} &:= 0.4 \text{ kV} & p_{scnT3} &:= 10.5 \text{ kW} & u_{scnT3} &:= 6 \% \\ p_{gnT3} &:= 1.7 \text{ kW} & i_{gnT3} &:= 1.4 \% \end{aligned}$$

$$R_{tT3} := \frac{p_{scnT3} \cdot U_{niT3}^2}{1000 S_{nT3}^2} \quad R_{tT3} = 4.2 \ \Omega \quad X_{tT3} := \frac{u_{scnT3} \cdot U_{niT3}^2}{100 S_{nT3}} \quad X_{tT3} = 24 \ \Omega$$

Caracteristicile transformatorului T4

$$\begin{aligned} S_{nT4} &:= 0.63 \text{ MVA} & U_{niT4} &:= 20 & U_{njT4} &:= 0.4 \text{ kV} & p_{scnT4} &:= 6.5 \text{ kW} & u_{scnT4} &:= 6 \% \\ p_{gnT4} &:= 1.3 \text{ kW} & i_{gnT4} &:= 1.8 \% \end{aligned}$$

$$R_{tT4} := \frac{p_{scnT4} \cdot U_{niT4}^2}{1000 S_{nT4}^2} \quad R_{tT4} = 6.551 \ \Omega \quad X_{tT4} := \frac{u_{scnT4} \cdot U_{niT4}^2}{100 S_{nT4}} \quad X_{tT4} = 38.095 \ \Omega$$

$$\text{stepsize} \neq 1 \quad \omega := 2\pi \cdot 50$$

$$k := 2..30$$

Calculul parametrilor armonici ai elementelor de retea

$$X_{st_k} := k \cdot X_{ts} \quad \tan \psi_1 := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_n) - 0.0421 \ln(S_n)^2)$$

$$R_s := \frac{X_{ts}}{\tan \psi_1} \quad R_p := 10 \cdot X_{ts} \cdot \tan \psi_1 \quad \text{transformator}$$

$$R_{sta_k} := \frac{R_s \cdot R_p^2 + X_{st_k} \cdot (R_p + R_s)}{R_p^2 + (X_{st_k})^2} \quad X_{sta_k} := \frac{X_{st_k} \cdot R_p^2}{R_p^2 + (X_{st_k})^2}$$

$$X_{T1_k} := k \cdot X_{tT1} \quad \tan \psi_{1T1} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_{nT1}) - 0.0421 \ln(S_{nT1})^2) \quad \text{transformatorul T1}$$

$$R_{sT1} := \frac{X_{tT1}}{\tan \psi_{1T1}} \quad R_{pT1} := 10 \cdot X_{tT1} \cdot \tan \psi_{1T1}$$

$$R_{tT1_k} := \frac{R_{sT1} \cdot R_{pT1}^2 + X_{T1_k} \cdot (R_{pT1} + R_{sT1})}{R_{pT1}^2 + (X_{T1_k})^2} \quad X_{tT1_k} := \frac{X_{T1_k} \cdot R_{pT1}^2}{R_{pT1}^2 + (X_{T1_k})^2}$$

$$X_{T2_k} := k \cdot X_{tT2} \quad \tan \psi_{1T2} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(\text{SnT2}) - 0.0421 \ln(\text{SnT2})^2) \quad \text{transformatorul T2}$$

$$R_{sT2} := \frac{X_{tT2}}{\tan \psi_{1T2}} \quad R_{pT2} := 10 \cdot X_{tT2} \cdot \tan \psi_{1T2}$$

$$R_{tT2_k} := \frac{R_{sT2} \cdot R_{pT2}^2 + X_{T2_k} \cdot (R_{pT2} + R_{sT2})}{R_{pT2}^2 + (X_{T2_k})^2} \quad X_{tT2_k} := \frac{X_{T2_k} \cdot R_{pT2}^2}{R_{pT2}^2 + (X_{T2_k})^2}$$

$$X_{T3_k} := k \cdot X_{tT3} \quad \tan \psi_{1T3} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(\text{SnT3}) - 0.0421 \ln(\text{SnT3})^2) \quad \text{transformatorul T3}$$

$$R_{sT3} := \frac{X_{tT3}}{\tan \psi_{1T3}} \quad R_{pT3} := 10 \cdot X_{tT3} \cdot \tan \psi_{1T3}$$

$$R_{tT3_k} := \frac{R_{sT3} \cdot R_{pT3}^2 + X_{T3_k} \cdot (R_{pT3} + R_{sT3})}{R_{pT3}^2 + (X_{T3_k})^2} \quad X_{tT3_k} := \frac{X_{T3_k} \cdot R_{pT3}^2}{R_{pT3}^2 + (X_{T3_k})^2}$$

$$X_{T4_k} := k \cdot X_{tT4} \quad \tan \psi_{1T4} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(\text{SnT4}) - 0.0421 \ln(\text{SnT4})^2) \quad \text{transformatorul T4}$$

$$R_{sT4} := \frac{X_{tT4}}{\tan \psi_{1T4}} \quad R_{pT4} := 10 \cdot X_{tT4} \cdot \tan \psi_{1T4}$$

$$R_{tT4_k} := \frac{R_{sT4} \cdot R_{pT4}^2 + X_{T4_k} \cdot (R_{pT4} + R_{sT4})}{R_{pT4}^2 + (X_{T4_k})^2} \quad X_{tT4_k} := \frac{X_{T4_k} \cdot R_{pT4}^2}{R_{pT4}^2 + (X_{T4_k})^2}$$

Linii electrice

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \rho := 100 \quad \alpha_1 := \sqrt{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \mu_0} \quad \rho_{Al} := 0.0282 \quad \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$S := 70 \text{ mm}^2 \quad S_{Al} := 66.2 \text{ mm}^2 \quad r_r := 5.8 \text{ mm} \quad H_{st} := 12.1 \text{ m} \quad R_{cc} := 1.025 \rho_{Al} \cdot \frac{1000}{S_{Al}}$$

$$\text{LEA L2} \quad L_1 := 12 \text{ km}$$

$$x_{i_k} := 0.3545 \sqrt{\frac{k}{R_{cc}}} \quad r_{l1_k} := \begin{cases} R_{cc} \cdot [0.035(x_{i_k})^2 + 0.938] & \text{if } x_{i_k} \leq 2.4 \\ R_{cc} \cdot [0.35(x_{i_k}) + 0.3] & \text{if } x_{i_k} > 2.4 \end{cases}$$

$$D_{rs} := \sqrt{1.3^2 + 0.625^2} \quad D_{st} := D_{rs} \quad D_{rt} := 1.25 \text{ m} \quad R_{cc} = 0.437 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad \epsilon_0 := \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$$

$$\sigma := 2520 \quad k_b := 0.25 \quad \gamma := 272.4 \frac{1}{\text{km}} \quad a := 100 \text{ m}$$

$$f_{\max} := a^2 \cdot \frac{\gamma}{8 \cdot k_b \cdot \sigma} \quad f_{\max} := 0.54 \text{ m} \quad \lambda_{iz} := 0.485 \text{ m}$$

$$h_1 := H_{st} - \lambda_{iz} + (-2) \cdot \frac{f_{\max}}{3} \quad h_2 := 10.8 - \lambda_{iz} - 2 \cdot \frac{f_{\max}}{3} \quad \alpha_k := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot k \cdot \mu_0}{\rho}}$$

$$D_m := (D_{rs} \cdot D_{rt} \cdot D_{st})^{\frac{1}{3}} \quad D_m = 1.375 \quad r_m := 0.8116 r_r \quad h_m := \sqrt{h_1 \cdot h_2^2}$$

$$X_{dl1_k} := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot k \cdot 1000}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(\frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot h_m \cdot \alpha_k \right)} \right) \quad X_{d1} := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot 1 \cdot 1000}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(\frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot h_m \cdot \alpha_1 \right)} \right)$$

$$xd1_k := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot k \cdot 1000}{2\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{Dm}{r1 \cdot 10^{-3}} \right) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot hm \cdot \frac{\alpha_k}{3} \right) \quad C01 := \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot 1000}{\ln \left(\frac{Dm}{r1 \cdot 10^{-3}} \right)}$$

$$z1_k := r1_k + i \cdot xd1_k \quad b1_k := \omega \cdot k \cdot C01 \quad y1_k := i \cdot b1_k$$

Coeficienti Kennely

$$kz1_k := \frac{\sinh \left(\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L1^2} \right)}{\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L1^2}} \quad kyl_k := \frac{\tanh \left(\frac{\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L1^2}}{2} \right)}{\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L1^2}}$$

$$ZL1_k := z1_k \cdot L1 \cdot kz1_k \quad YL1_k := 2 \cdot y1_k \cdot L1 \cdot kyl_k$$

LEA L3 $L2 := 14 \text{ km}$

$$S1 := 95 \text{ mm}^2 \quad SA11 := 90 \text{ mm}^2 \quad r1 := 6.7 \text{ mm} \quad Hst := 12.1 \text{ m}$$

$$Rcc1 := 1.025 \rho Al \cdot \frac{1000}{SA11}$$

$$xi1_k := 0.3545 \sqrt{\frac{k}{Rcc1}}$$

$$r11_k := \begin{cases} Rcc1 \cdot [0.035 (xi1_k)^2 + 0.938] & \text{if } xi1_k \leq 2.4 \\ Rcc1 \cdot [0.35 (xi1_k) + 0.3] & \text{if } xi1_k > 2.4 \end{cases}$$

$$Drs := \sqrt{1.3^2 + 0.625^2} \quad Dst := Drs \quad Drt := 1.25 \text{ m} \quad Rcc1 = 0.321 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\sigma := 3335 \quad kb := 0.25 \quad \gamma := 366 \frac{1}{\text{km}} \quad a := 100 \text{ m}$$

$$fmax := a^2 \cdot \frac{\gamma}{8 \cdot kb \cdot \sigma} \quad \lambda iz := 0.485$$

$$fmax := 0.54873$$

$$h1 := Hst - \lambda iz + (-2) \cdot \frac{fmax}{3} \quad h2 := 10.8 - \lambda iz - 2 \cdot \frac{fmax}{3}$$

$$h2 = 9.949 \quad h1 = 11.249$$

$$Dm := (Drs \cdot Drt \cdot Dst)^{\frac{1}{3}} \quad Dm = 1.375 \text{ m} \quad r11 := 0.8116 r1 \quad hm := \sqrt{h1 \cdot h2} \quad \alpha_k := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot k \cdot \mu_0}{\rho}} \quad hm = 33.369 \text{ m}$$

$$Xd11 := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot 1 \cdot 1000}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{Dm}{r11 \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(\frac{2}{3} \cdot \sqrt{2} \cdot hm \cdot \alpha_1 \right)} \right) \quad xd11_k := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot k \cdot 1000}{2\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{Dm}{r11 \cdot 10^{-3}} \right) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot hm \cdot \frac{\alpha_k}{3} \right)$$

$$z11_k := r11_k + i \cdot xd11_k \quad C011 := \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot 1000}{\ln \left(\frac{Dm}{r11 \cdot 10^{-3}} \right)} \quad b11_k := \omega \cdot k \cdot C011 \quad y11_k := i \cdot b11_k$$

Coeficientii Kennely

$$kz2_k := \frac{\sinh \left(\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2} \right)}{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}} \quad ky2_k := \frac{\tanh \left(\frac{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}}{2} \right)}{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}}$$

$$ZL2_k := z11_k \cdot L2 \cdot kz2_k \quad YL2_k := 2 \cdot y11_k \cdot L2 \cdot ky2_k$$

LEA L4 $L3 := 10 \text{ km}$

$$kz3_k := \frac{\sinh\left(\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L3^2}\right)}{\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L3^2}} \quad ky3_k := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L3^2}}{2}\right)}{\sqrt{z1_k \cdot y1_k \cdot L3^2}}$$

$$Zl3_k := z1_k \cdot L3 \cdot kz3_k \quad Yl3_k := 2 \cdot y1_k \cdot L3 \cdot ky3_k$$

Consumatorii

$$Unc := 20 \text{ kV}$$

Consumatorul C1 $Qca := 1.453 \text{ Mvar}$ $Pca := 3 \text{ MW}$

$$\text{Model R/L} \quad Rcla := \frac{Unc^2}{Pca} \quad Xcla := \frac{Unc^2}{Qca}$$

$$Rca_k := \frac{Rcla \cdot k^2 \cdot Xcla^2}{Rcla^2 + k^2 \cdot Xcla^2} \quad Xca_k := \frac{Rcla^2 \cdot k \cdot Xcla}{Rcla^2 + k^2 \cdot Xcla^2} \quad Zcons1a_k := Rca_k + i \cdot Xca_k$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Zcons11a_k := (1.125 + 0.0879k) \cdot Rcla$$

$$\text{Model CIGRE} \quad Xpa_k := k \cdot \frac{Rcla}{6.7 \cdot \frac{Qca}{Pca} - 0.74}$$

$$Zcons12a_k := \frac{Rcla \cdot (Xpa_k)^2}{Rcla^2 + (Xpa_k + 0.073Rcla \cdot k)^2} + i \cdot \frac{Rcla^2 \cdot Xpa_k + Xpa_k \cdot 0.073Rcla \cdot k \cdot (Xpa_k + 0.073Rcla \cdot k)}{Rcla^2 + (Xpa_k + 0.073Rcla \cdot k)^2}$$

$$\text{Model Pesonen} \quad Zcons13a_k := \frac{1}{0.1 \cdot k + 0.9} \cdot (Rcla + i \cdot Xcla)$$

$$\text{Modelul 5} \quad Raaa_k := 0.1750.175 \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad Xaaa_k := \frac{Rcla}{0.5} \cdot 0.175k \left[2 \cdot (k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$Rssa := \frac{Rcla}{0.5} \quad Xssa_k := \frac{Qca}{Pca} \cdot k \cdot Rssa \quad Zcons14a_k := \frac{(Raaa_k + i \cdot Xaaa_k) \cdot (Rssa + i \cdot Xssa_k)}{(Raaa_k + Rssa) + i \cdot (Xssa_k + Xaaa_k)}$$

Model MOTOR

$$XMa := \frac{Unc^2}{\sqrt{Pca^2 + Qca^2}} \quad RMa := \frac{XMa}{3} \quad Zcons15a_k := RMa \cdot \sqrt{k} + i \cdot XMa \cdot k$$

Consumatorul C2 $Qcb := 0.92 \text{ Mvar}$ $Pcb := 2 \text{ MW}$

Model R/L

$$Rclb := \frac{Unc^2}{Pcb} \quad Xclb := \frac{Unc^2}{Qcb} \quad Rcb_k := \frac{Rclb \cdot k^2 \cdot Xclb^2}{Rclb^2 + k^2 \cdot Xclb^2} \quad Xcb_k := \frac{Rclb^2 \cdot k \cdot Xclb}{Rclb^2 + k^2 \cdot Xclb^2} \quad Zcons1b_k := Rcb_k + i \cdot Xcb_k$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Zcons11b_k := (1.125 + 0.0879k) \cdot Rclb$$

$$\text{Model CIGRE} \quad Xpb_k := k \cdot \frac{Rclb}{6.7 \cdot \frac{Qcb}{Pcb} - 0.74}$$

$$Zcons12b_k := \frac{Rclb \cdot (Xpb_k)^2}{Rclb^2 + (Xpb_k + 0.073Rclb \cdot k)^2} + i \cdot \frac{Rclb^2 \cdot Xpb_k + Xpb_k \cdot 0.073Rclb \cdot k \cdot (Xpb_k + 0.073Rclb \cdot k)}{Rclb^2 + (Xpb_k + 0.073Rclb \cdot k)^2}$$

$$\text{Model Pesonen} \quad Z_{\text{cons13b}_k} := \frac{1}{0.1 \cdot k + 0.9} \cdot (R_{c1b} + i \cdot X_{c1b})$$

$$\text{Modelul 5} \quad R_{aab_k} := 0.1750.175 \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aab_k} := \frac{R_{c1b}}{0.5} \cdot 0.175k \left[2 \cdot (k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ssb} := \frac{R_{c1b}}{0.5} \quad X_{ssb_k} := \frac{Q_{cb}}{P_{cb}} \cdot k \cdot R_{ssb} \quad Z_{\text{cons14b}_k} := \frac{(R_{aab_k} + i \cdot X_{aab_k}) \cdot (R_{ssb} + i \cdot X_{ssb_k})}{(R_{aab_k} + R_{ssb}) + i \cdot (X_{ssb_k} + X_{aab_k})}$$

$$\text{Model MOTOR} \quad X_{Mb} := \frac{Unc^2}{\sqrt{P_{cb}^2 + Q_{cb}^2}} \quad R_{Mb} := \frac{X_{Mb}}{3} \quad Z_{\text{cons15b}_k} := R_{Mb} \cdot \sqrt{k} + i \cdot X_{Mb} \cdot k$$

$$\text{Consumatorul C3} \quad Q_{cc} := 0.7487 \text{ Mvar} \quad P_{cc} := 1.8 \text{ MW}$$

Model R/L

$$R_{c1c} := \frac{Unc^2}{P_{cc}} \quad X_{c1c} := \frac{Unc^2}{Q_{cc}} \quad R_{cc_k} := \frac{R_{c1c} \cdot k^2 \cdot X_{c1c}^2}{R_{c1c}^2 + k^2 \cdot X_{c1c}^2} \quad X_{cc_k} := \frac{R_{c1c}^2 \cdot k \cdot X_{c1c}}{R_{c1c}^2 + k^2 \cdot X_{c1c}^2} \quad Z_{\text{cons1c}_k} := R_{cc_k} + i \cdot X_{cc_k}$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Z_{\text{cons11c}_k} := (1.125 + 0.0879k) \cdot R_{c1c}$$

$$\text{Model CIGRE} \quad X_{pc_k} := k \cdot \frac{R_{c1c}}{6.7 \cdot \frac{Q_{cc}}{P_{cc}} - 0.74}$$

$$Z_{\text{cons12c}_k} := \frac{R_{c1c} \cdot (X_{pc_k})^2}{R_{c1c}^2 + (X_{pc_k} + 0.073R_{c1c} \cdot k)^2} + i \cdot \frac{R_{c1c}^2 \cdot X_{pc_k} + X_{pc_k} \cdot 0.073R_{c1c} \cdot k \cdot (X_{pc_k} + 0.073R_{c1c} \cdot k)}{R_{c1c}^2 + (X_{pc_k} + 0.073R_{c1c} \cdot k)^2}$$

$$\text{Model Pesonen} \quad Z_{\text{cons13c}_k} := \frac{1}{0.1 \cdot k + 0.9} \cdot (R_{c1c} + i \cdot X_{c1c})$$

Modelul 5

$$R_{aac_k} := \frac{R_{c1c}}{10} \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right]$$

$$R_{aac_k} := 0.1750.175 \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aac_k} := \frac{R_{c1c}}{0.5} \cdot 0.175k \left[2 \cdot (k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ssc} := \frac{R_{c1c}}{0.5} \quad X_{ssc_k} := \frac{Q_{cc}}{P_{cc}} \cdot k \cdot R_{ssc} \quad Z_{\text{cons14c}_k} := \frac{(R_{aac_k} + i \cdot X_{aac_k}) \cdot (R_{ssc} + i \cdot X_{ssc_k})}{(R_{aac_k} + R_{ssc}) + i \cdot (X_{ssc_k} + X_{aac_k})}$$

$$\text{Model MOTOR} \quad X_{Mc} := \frac{Unc^2}{\sqrt{P_{cc}^2 + Q_{cc}^2}} \quad R_{Mc} := \frac{X_{Mc}}{3} \quad Z_{\text{cons15c}_k} := R_{Mc} \cdot \sqrt{k} + i \cdot X_{Mc} \cdot k$$

$$\text{Consumatorul C4} \quad Q_{cd} := 0.763 \text{ Mvar} \quad P_{cd} := 1.5 \text{ MW}$$

$$\text{Model R/L} \quad R_{c1d} := \frac{Unc^2}{P_{cd}} \quad X_{c1d} := \frac{Unc^2}{Q_{cd}} \quad R_{cd_k} := \frac{R_{c1d} \cdot k^2 \cdot X_{c1d}^2}{R_{c1d}^2 + k^2 \cdot X_{c1d}^2} \quad X_{cd_k} := \frac{R_{c1d}^2 \cdot k \cdot X_{c1d}}{R_{c1d}^2 + k^2 \cdot X_{c1d}^2}$$

$$Z_{\text{cons1d}_k} := R_{cd_k} + i \cdot X_{cd_k}$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Z_{\text{cons11d}_k} := (1.125 + 0.0879k) \cdot R_{c1d}$$

$$\text{Model CIGRE} \quad X_{pd_k} := k \cdot \frac{R_{c1d}}{6.7 \cdot \frac{Q_{cd}}{P_{cd}} - 0.74}$$

$$Z_{\text{cons12d}_k} := \frac{R_{\text{cld}} \cdot (X_{\text{pd}_k})^2}{R_{\text{cld}}^2 + (X_{\text{pd}_k} + 0.073 R_{\text{cld}} \cdot k)^2} + i \cdot \frac{R_{\text{cld}}^2 \cdot X_{\text{pd}_k} + X_{\text{pd}_k} \cdot 0.073 R_{\text{cld}} \cdot k \cdot (X_{\text{pd}_k} + 0.073 R_{\text{cld}} \cdot k)}{R_{\text{cld}}^2 + (X_{\text{pd}_k} + 0.073 R_{\text{cld}} \cdot k)^2}$$

Model Pesonen $Z_{\text{cons13d}_k} := \frac{1}{0.1 \cdot k + 0.9} \cdot (R_{\text{cld}} + i \cdot X_{\text{cld}})$

Modelul 5 $R_{\text{aad}_k} := 0.1750 \cdot 175 \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right]$ $X_{\text{aad}_k} := \frac{R_{\text{cld}}}{0.5} \cdot 0.175 \cdot k \left[2 \cdot (k \cdot 50)^{-0.15} \right]$

$$R_{\text{ssd}} := \frac{R_{\text{cld}}}{0.5} \quad X_{\text{ssd}_k} := \frac{Q_{\text{cd}}}{P_{\text{cd}}} \cdot k \cdot R_{\text{ssd}} \quad Z_{\text{cons14d}_k} := \frac{(R_{\text{aad}_k} + i \cdot X_{\text{aad}_k}) \cdot (R_{\text{ssd}} + i \cdot X_{\text{ssd}_k})}{(R_{\text{aad}_k} + R_{\text{ssd}}) + i \cdot (X_{\text{ssd}_k} + X_{\text{aad}_k})}$$

Model MOTOR $X_{\text{Md}} := \frac{U_{\text{nc}}^2}{\sqrt{P_{\text{cd}}^2 + Q_{\text{cd}}^2}}$ $R_{\text{Md}} := \frac{X_{\text{Md}}}{3}$ $Z_{\text{cons15d}_k} := R_{\text{Md}} \cdot \sqrt{k} + i \cdot X_{\text{Md}} \cdot k$

bateria de condensatoare long.

$$t := 0..10$$

$$\text{tr} := \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$Z_{\text{t}_k} := R_{\text{sta}_k} + i \cdot X_{\text{sta}_k} \quad Z_{\text{tT1}_k} := R_{\text{tT1}_k} + i \cdot X_{\text{tT1}_k} \quad Z_{\text{tT2}_k} := R_{\text{tT2}_k} + i \cdot X_{\text{tT2}_k}$$

$$Z_{\text{tT3}_k} := R_{\text{tT3}_k} + i \cdot X_{\text{tT3}_k} \quad Z_{\text{tT4}_k} := R_{\text{tT4}_k} + i \cdot X_{\text{tT4}_k}$$

$$Z_{\text{tT3}_k} := 0 \quad Z_{\text{tT1}_k} := 0 \quad Z_{\text{tT2}_k} := 0$$

Admitantele echivalente plecarilor din statie (LEA)

$$Y_{\text{1}_k} := \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[4 + 4 \cdot Y_{\text{L1}_k} \cdot Z_{\text{tT1}_k} + 4 \cdot Y_{\text{L1}_k} \cdot Z_{\text{cons1b}_k} + 2 \cdot Z_{\text{L1}_k} \cdot Y_{\text{L1}_k} + Z_{\text{L1}_k} \cdot (Y_{\text{L1}_k})^2 \cdot Z_{\text{tT1}_k} + Z_{\text{L1}_k} \cdot (Y_{\text{L1}_k})^2 \cdot Z_{\text{cons1b}_k} \right]}{\left(2 \cdot Z_{\text{L1}_k} + Z_{\text{L1}_k} \cdot Y_{\text{L1}_k} \cdot Z_{\text{tT1}_k} + Z_{\text{L1}_k} \cdot Y_{\text{L1}_k} \cdot Z_{\text{cons1b}_k} + 2 \cdot Z_{\text{tT1}_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons1b}_k} \right)}$$

$$Y_{\text{2}_k} := \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[4 + 4 \cdot Y_{\text{L2}_k} \cdot Z_{\text{tT2}_k} + 4 \cdot Y_{\text{L2}_k} \cdot Z_{\text{cons1c}_k} + 2 \cdot Z_{\text{L2}_k} \cdot Y_{\text{L2}_k} + Z_{\text{L2}_k} \cdot (Y_{\text{L2}_k})^2 \cdot Z_{\text{tT2}_k} + Z_{\text{L2}_k} \cdot (Y_{\text{L2}_k})^2 \cdot Z_{\text{cons1c}_k} \right]}{\left(2 \cdot Z_{\text{L2}_k} + Z_{\text{L2}_k} \cdot Y_{\text{L2}_k} \cdot Z_{\text{tT2}_k} + Z_{\text{L2}_k} \cdot Y_{\text{L2}_k} \cdot Z_{\text{cons1c}_k} + 2 \cdot Z_{\text{tT2}_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons1c}_k} \right)}$$

$$Y_{\text{3}_k} := \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[4 + 4 \cdot Y_{\text{L3}_k} \cdot Z_{\text{tT3}_k} + 4 \cdot Y_{\text{L3}_k} \cdot Z_{\text{cons1d}_k} + 2 \cdot Z_{\text{L3}_k} \cdot Y_{\text{L3}_k} + Z_{\text{L3}_k} \cdot (Y_{\text{L3}_k})^2 \cdot Z_{\text{tT3}_k} + Z_{\text{L3}_k} \cdot (Y_{\text{L3}_k})^2 \cdot Z_{\text{cons1d}_k} \right]}{\left(2 \cdot Z_{\text{L3}_k} + Z_{\text{L3}_k} \cdot Y_{\text{L3}_k} \cdot Z_{\text{tT3}_k} + Z_{\text{L3}_k} \cdot Y_{\text{L3}_k} \cdot Z_{\text{cons1d}_k} + 2 \cdot Z_{\text{tT3}_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons1d}_k} \right)}$$

Compensare transversala la consumator

$$B_{\text{ct}_k, t} := \frac{Q_{\text{cu}}}{U_{\text{nc}}^2} \cdot \text{tr}_t \cdot k \quad d := 0..4$$

$$\text{dr} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0.5 \\ 0.75 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$B_{batb1_{k,d}} := \frac{2.4}{20^2} \cdot k \cdot dr_d \quad Y_{batb_{k,d}} := i \cdot B_{batb1_{k,d}}$$

Linia in cablu L5

$$l := 12 \text{ km}$$

$$R_{s1} := \frac{1000}{50.2 \cdot \pi \cdot 14.30.2} \quad R_{cCablu} := 0.377 \quad x_{dCablu} := 0.208 \quad b_{Cablu} := 2.50 \cdot \pi \cdot 0.205 \cdot 10^{-6}$$

$$X_{s1} := 0.1445 \log\left(\frac{126}{11.14}\right) \quad p_k := \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{s1}}{k \cdot X_{s1}}\right)^2}$$

$$b_{Cablu1_k} := b_{Cablu} \cdot k \quad x_{iCab_k} := 0.3545 \sqrt{\frac{k}{R_{cCablu}}} \quad y_{Cablu1_k} := i \cdot b_{Cablu1_k}$$

$$r_{iCablu_k} := \begin{cases} R_{cCablu} \cdot [0.035(x_{iCab_k})^2 + 0.938] & \text{if } x_{iCab_k} \leq 2.4 \\ R_{cCablu} \cdot [0.35(x_{iCab_k}) + 0.3] & \text{if } x_{iCab_k} > 2.4 \end{cases}$$

$$r_{Cablu1_k} := r_{iCablu_k} + p_k \cdot R_{s1} \quad x_{Cablu1_k} := x_{dCablu} \cdot k - p_k \cdot X_{s1} \cdot k \quad z_{Cablu1_k} := r_{Cablu1_k} + i \cdot x_{Cablu1_k}$$

$$k_{zCablu1_k} := \frac{\sinh\left(\sqrt{z_{Cablu1_k} \cdot y_{Cablu1_k} \cdot l^2}\right)}{\sqrt{z_{Cablu1_k} \cdot y_{Cablu1_k} \cdot l^2}} \quad k_{yCablu1_k} := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{z_{Cablu1_k} \cdot y_{Cablu1_k} \cdot l^2}}{2}\right)}{\sqrt{z_{Cablu1_k} \cdot y_{Cablu1_k} \cdot l^2}}$$

$$Z_{Cablu_k} := z_{Cablu1_k} \cdot l \cdot k_{zCablu1_k} \quad Y_{Cablu_k} := 2 \cdot y_{Cablu1_k} \cdot l \cdot k_{yCablu1_k}$$

Consumatorul C5

$$P_{c2} := 3 \text{ MW} \quad Q_{c2} := 1.8 \text{ MVar}$$

$$\text{Model R/L} \quad R_{cons} := \frac{20^2}{P_{c2}} \quad X_{cons} := \frac{20^2}{Q_{c2}}$$

$$R_{cons2_k} := \frac{R_{cons} \cdot k^2 \cdot X_{cons} \cdot X_{cons}}{R_{cons}^2 + k^2 \cdot (X_{cons} \cdot X_{cons})} \quad X_{cons2_k} := \frac{R_{cons} \cdot R_{cons} \cdot k \cdot X_{cons}}{R_{cons} \cdot R_{cons} + k^2 \cdot X_{cons}^2} \quad Z_{cons2_k} := R_{cons2_k} + i \cdot X_{cons2_k}$$

$$\text{Modelul 5} \quad R_{aa2_k} := 0.1750.175 \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aa2_k} := \frac{R_{cons}}{0.5} \cdot 0.175 k \left[2 \cdot (k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ss2} := \frac{R_{cons}}{0.5} \quad X_{ss2_k} := \frac{Q_{c2}}{P_{c2}} \cdot k \cdot R_{ss2} \quad Z_{cons24_k} := \frac{R_{aa2_k} \cdot R_{ss2} - X_{ss2_k} \cdot X_{aa2_k} + i \cdot (X_{aa2_k} \cdot R_{ss2} + R_{aa2_k} \cdot X_{ss2_k})}{(R_{aa2_k} + R_{ss2}) + i \cdot (X_{ss2_k} + X_{aa2_k})}$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Z_{cons21_k} := (1.125 + 0.0879k) \cdot R_{cons}$$

$$\text{Model CIGRE} \quad X_{p2_k} := k \cdot \frac{R_{cons}}{6.7 \cdot \frac{Q_{c2}}{P_{c2}} - 0.74}$$

$$Z_{cons22_k} := \frac{R_{cons} \cdot (X_{p2_k})^2}{R_{cons}^2 + (X_{p2_k} + 0.073 R_{cons} \cdot k)^2} + i \cdot \frac{R_{cons}^2 \cdot X_{p2_k} + X_{p2_k} \cdot 0.073 R_{cons} \cdot k \cdot (X_{p2_k} + 0.073 R_{cons} \cdot k)}{R_{cons}^2 + (X_{p2_k} + 0.073 R_{cons} \cdot k)^2}$$

Admitanta echivalenta a plecarii in cablu L 5

$$Y_{consec h_k} := \frac{1}{2} \frac{\left[Z_{cablu_k} \cdot (Y_{cablu_k})^2 \cdot Z_{cons2_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} + 4 \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons2_k} + 4 \right]}{\left(Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons2_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} + 2 \cdot Z_{cons2_k} \right)}$$

$$Y_{consec h4_k} := \frac{1}{2} \frac{\left[Z_{cablu_k} \cdot (Y_{cablu_k})^2 \cdot Z_{cons24_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} + 4 \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons24_k} + 4 \right]}{\left(Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons24_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} + 2 \cdot Z_{cons24_k} \right)}$$

$$Y_{consec h1_k} := \frac{1}{2} \frac{\left[Z_{cablu_k} \cdot (Y_{cablu_k})^2 \cdot Z_{cons21_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} + 4 \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons21_k} + 4 \right]}{\left(Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons21_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} + 2 \cdot Z_{cons21_k} \right)}$$

$$Y_{consec h2_k} := \frac{1}{2} \frac{\left[Z_{cablu_k} \cdot (Y_{cablu_k})^2 \cdot Z_{cons22_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} + 4 \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons22_k} + 4 \right]}{\left(Z_{cablu_k} \cdot Y_{cablu_k} \cdot Z_{cons22_k} + 2 \cdot Z_{cablu_k} + 2 \cdot Z_{cons22_k} \right)}$$

Linia in cablu L6

$$l1 := 15 \text{ km}$$

Coeficientii Kennely

$$k_{zcablu1_k} := \frac{\sinh\left(\sqrt{z_{cablu1_k} \cdot y_{cablu1_k} \cdot l1^2}\right)}{\sqrt{z_{cablu1_k} \cdot y_{cablu1_k} \cdot l1^2}} \quad k_{ycablu1_k} := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{z_{cablu1_k} \cdot y_{cablu1_k} \cdot l1^2}}{2}\right)}{\sqrt{z_{cablu1_k} \cdot y_{cablu1_k} \cdot l1^2}}$$

$$Z_{cablu1_k} := z_{cablu1_k} \cdot l1 \cdot k_{zcablu1_k} \quad Y_{cablu1_k} := 2 \cdot y_{cablu1_k} \cdot l1 \cdot k_{ycablu1_k}$$

Consumatorul C6

$$P_{c1} := 2.5 \text{ MW} \quad Q_{c1} := 1.2 \text{ MVar}$$

$$\text{Model R/L} \quad R_{cons1} := \frac{20^2}{P_{c1}} \quad X_{cons1} := \frac{20^2}{Q_{c1}}$$

$$R_{cons2q_k} := \frac{R_{cons1} \cdot k^2 \cdot X_{cons1} \cdot X_{cons1}}{R_{cons1}^2 + k^2 \cdot (X_{cons1} \cdot X_{cons1})} \quad X_{cons2q_k} := \frac{R_{cons1} \cdot R_{cons1} \cdot k \cdot X_{cons1}}{R_{cons1} \cdot R_{cons1} + k^2 \cdot X_{cons1}^2}$$

$$Z_{cons2q_k} := R_{cons2q_k} + i \cdot X_{cons2q_k}$$

Modelul 5

$$R_{aa2q_k} := 0.1750.175 \left[1 + 0.2 \cdot (k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aa2q_k} := \frac{R_{cons1}}{0.5} \cdot 0.175k \left[2 \cdot (k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ss2q} := \frac{R_{cons1}}{0.5} \quad X_{ss2q_k} := \frac{Q_{c1}}{P_{c1}} \cdot k \cdot R_{ss2}$$

$$Z_{cons24q_k} := \frac{R_{aa2q_k} \cdot R_{ss2q} - X_{ss2q_k} \cdot X_{aa2q_k} + i \cdot (X_{aa2q_k} \cdot R_{ss2q} + R_{aa2q_k} \cdot X_{ss2q_k})}{\left(R_{aa2q_k} + R_{ss2q} \right) + i \cdot (X_{ss2q_k} + X_{aa2q_k})}$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Z_{cons21q_k} := (1.125 + 0.0879k) \cdot R_{cons1}$$

$$\text{cons CIGRE} \quad X_{p2q_k} := k \cdot \frac{R_{cons1}}{6.7 \cdot \frac{Q_{c1}}{P_{c1}} - 0.74}$$

$$Z_{\text{cons}2q_k} := \frac{R_{\text{cons}1} \cdot (X_{p2q_k})^2}{R_{\text{cons}1}^2 + (X_{p2q_k} + 0.073 R_{\text{cons}1} \cdot k)^2} + i \frac{R_{\text{cons}1}^2 \cdot X_{p2q_k} + X_{p2q_k} \cdot 0.073 R_{\text{cons}1} \cdot k \cdot (X_{p2q_k} + 0.073 R_{\text{cons}1} \cdot k)}{R_{\text{cons}1}^2 + (X_{p2q_k} + 0.073 R_{\text{cons}1} \cdot k)^2}$$

Admitanta echivalenta a plecării in cablu L6

$$Y_{\text{consec}h_{q_k}} := \frac{1}{2} \frac{[Z_{\text{cablu}1_k} \cdot (Y_{\text{cablu}1_k})^2 \cdot Z_{\text{cons}2q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} + 4 \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}2q_k} + 4]}{(Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}2q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons}2q_k})}$$

$$Y_{\text{consec}h_{4q_k}} := \frac{1}{2} \frac{[Z_{\text{cablu}1_k} \cdot (Y_{\text{cablu}1_k})^2 \cdot Z_{\text{cons}24q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} + 4 \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}24q_k} + 4]}{(Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}24q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons}24q_k})}$$

$$Y_{\text{consec}h_{1q_k}} := \frac{1}{2} \frac{[Z_{\text{cablu}1_k} \cdot (Y_{\text{cablu}1_k})^2 \cdot Z_{\text{cons}21q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} + 4 \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}21q_k} + 4]}{(Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}21q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons}21q_k})}$$

$$Y_{\text{consec}h_{2q_k}} := \frac{1}{2} \frac{[Z_{\text{cablu}1_k} \cdot (Y_{\text{cablu}1_k})^2 \cdot Z_{\text{cons}22q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} + 4 \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}22q_k} + 4]}{(Z_{\text{cablu}1_k} \cdot Y_{\text{cablu}1_k} \cdot Z_{\text{cons}22q_k} + 2 \cdot Z_{\text{cablu}1_k} + 2 \cdot Z_{\text{cons}22q_k})}$$

LEA prevazuta cu compensare

$$L := 25 \text{ km}$$

$$\text{Coeficientii Kennely} \quad k_{z_k} := \frac{\sinh\left(\frac{\sqrt{z_{l1_k} \cdot y_{l1_k} \cdot L^2}}{2}\right)}{\sqrt{z_{l1_k} \cdot y_{l1_k} \cdot L^2}} \quad k_{y_k} := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{z_{l1_k} \cdot y_{l1_k} \cdot L^2}}{2}\right)}{\sqrt{z_{l1_k} \cdot y_{l1_k} \cdot L^2}}$$

$$Z_{L_k} := z_{l1_k} \cdot L \cdot k_{z_k} \quad Y_{L_k} := 2 \cdot y_{l1_k} \cdot L \cdot k_{y_k}$$

$$\text{Bateria de condensatoare serie} \quad X_{\text{comp}_{k,t}} := \frac{(X_{d11} \cdot L) \cdot \text{tr}_t}{k} \quad Z_{\text{comp}_{k,t}} := -i \cdot X_{\text{comp}_{k,t}}$$

$$\text{Sistemul} \quad X_{S_k} := \frac{22^2}{800} \cdot k \quad Z_{S_k} := i \cdot X_{S_k}$$

$$\text{Notez} \quad Y_{\text{ecv}} = Y_{\text{bat}} + Y_{\text{consec}h} + \frac{Y_{L_k}}{2}$$

$$Y_{\text{ecv}_{k,d}} := \left[Y_{\text{bat}_{k,d}} + \left[Y_{\text{consec}h_{1k}} + Y_{\text{consec}h_{1q_k}} + (Y_{L_k} + Y_{2k} + Y_{3k}) \right] + \frac{Y_{L_k}}{2} \right]$$

$$Z_{ST_k} := (Z_{L_k} + Z_{S_k})$$

$$Z_{cK_{k,d}} := \frac{Z_{\text{cons}13a_k} \cdot [(Z_{ST_k} \cdot Y_{L_k} + Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2) \cdot Z_{\text{comp}_{k,5}} + 2 \cdot Z_{ST_k} + 2 \cdot Z_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k}]}{[(Z_{ST_k} \cdot Y_{L_k} + Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2) \cdot (Z_{\text{cons}13a_k} + Z_{\text{comp}_{k,5}}) + 2 \cdot Z_{ST_k} + 2 \cdot Z_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k}]}$$

$$\alpha_{Us_{k,t}} := 2 \cdot \frac{Z_{ST_k}}{[(Z_{ST_k} \cdot Y_{L_k} + Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,4}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,4}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2) \cdot Z_{\text{comp}_{k,t}} + 2 \cdot Z_{ST_k} + 2 \cdot Z_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,4}} \cdot Z_{L_k}]}$$

$$\alpha_{Is_{k,d}} := 2 \cdot \frac{Z_{\text{cons}13a_k} \cdot [(Z_{ST_k} \cdot Y_{L_k} + Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2) \cdot (Z_{\text{cons}13a_k} + Z_{\text{comp}_{k,5}}) + 2 \cdot Z_{ST_k} + 2 \cdot Z_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k}]}{2 \cdot Z_{\text{cons}13a_k} \cdot Y_{\text{bat}_{k,d}} \cdot Z_{ST_k}}$$

$$\alpha_{Ic_{k,d}} := \frac{2 \cdot Z_{\text{cons}13a_k} \cdot Y_{\text{bat}_{k,d}} \cdot Z_{ST_k}}{[(Z_{ST_k} \cdot Y_{L_k} + Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k} \cdot Y_{L_k} + 2) \cdot (Z_{\text{comp}_{k,5}} + Z_{\text{cons}13a_k}) + 2 \cdot Z_{ST_k} + 2 \cdot Z_{L_k} + 2 \cdot Z_{ST_k} \cdot Y_{\text{ecv}_{k,d}} \cdot Z_{L_k}]}$$

$$\alpha U_{batk,t} := Z_{compk,t} \cdot \frac{(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} + ZL_k \cdot Y_k + 2)}{(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} + ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot Z_{compk,t} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k}$$

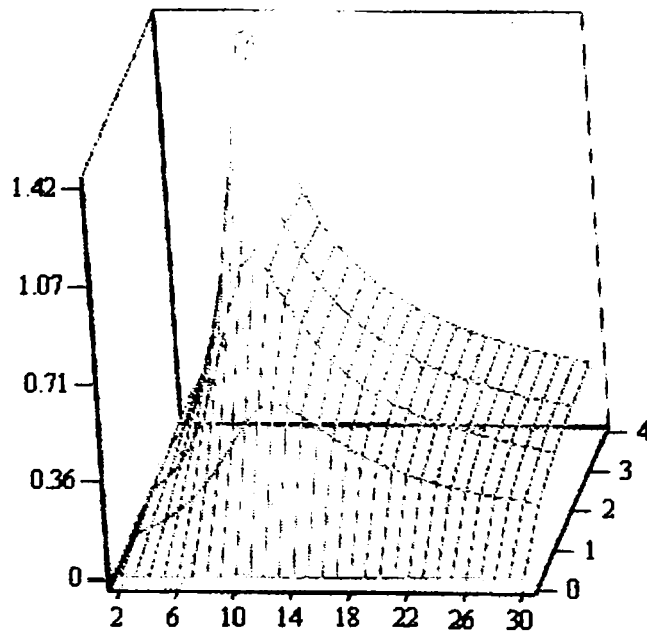
$$\alpha IC_{k,d} := \frac{Z_{cons13a_k} \cdot ((ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} + ZL_k \cdot Y_k + 2))}{[(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} + ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Z_{cons13a_k} + Z_{compk,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} \cdot ZL_k]}$$

$$\alpha Ic_{2k,t} := \frac{(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} + ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot Z_{compk,t} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k}{(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} + ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Z_{compk,t} + Z_{cons13a_k}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,4}} \cdot ZL_k}$$

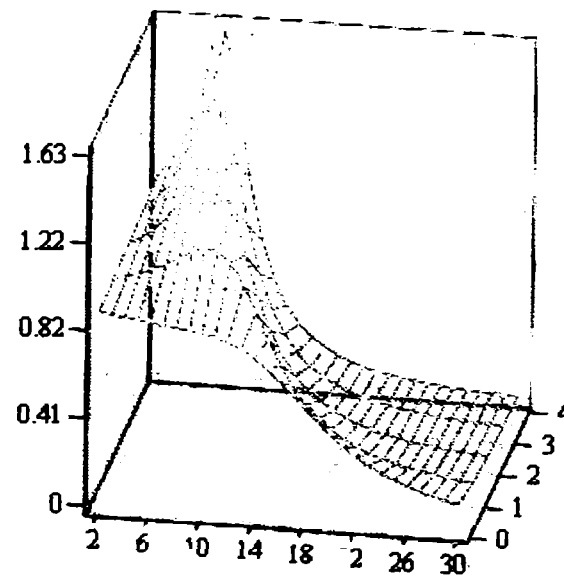
$$\alpha U_{batk,d} := Z_{compk,10} \cdot \frac{(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} + ZL_k \cdot Y_k + 2)}{(ZST_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} + ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot Z_{compk,10} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Y_{ecv_{k,d}} \cdot ZL_k}$$

$$\beta U_{batk,d} := |\alpha U_{batk,d}| \quad m\alpha Ic_{2k,d} := |\alpha Ic_{2k,d}| \quad \beta Us_{k,t} := |\alpha Us_{k,t}| \quad m\alpha Is_{k,d} := |\alpha Is_{k,d}|$$

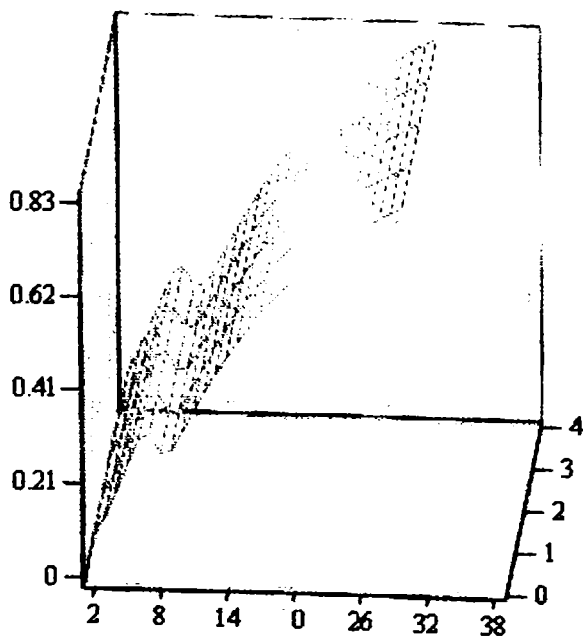
$$m\alpha IC_{k,d} := |\alpha IC_{k,d}| \quad \beta U_{batk,t} := |\alpha U_{batk,t}| \quad mZcK_{k,d} := |ZcK_{k,d}| \quad m\alpha Ic_{k,d} := |\alpha Ic_{k,d}|$$



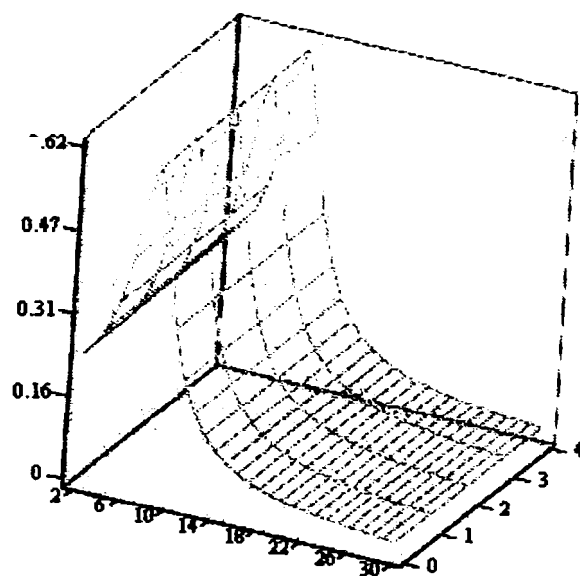
mαIc



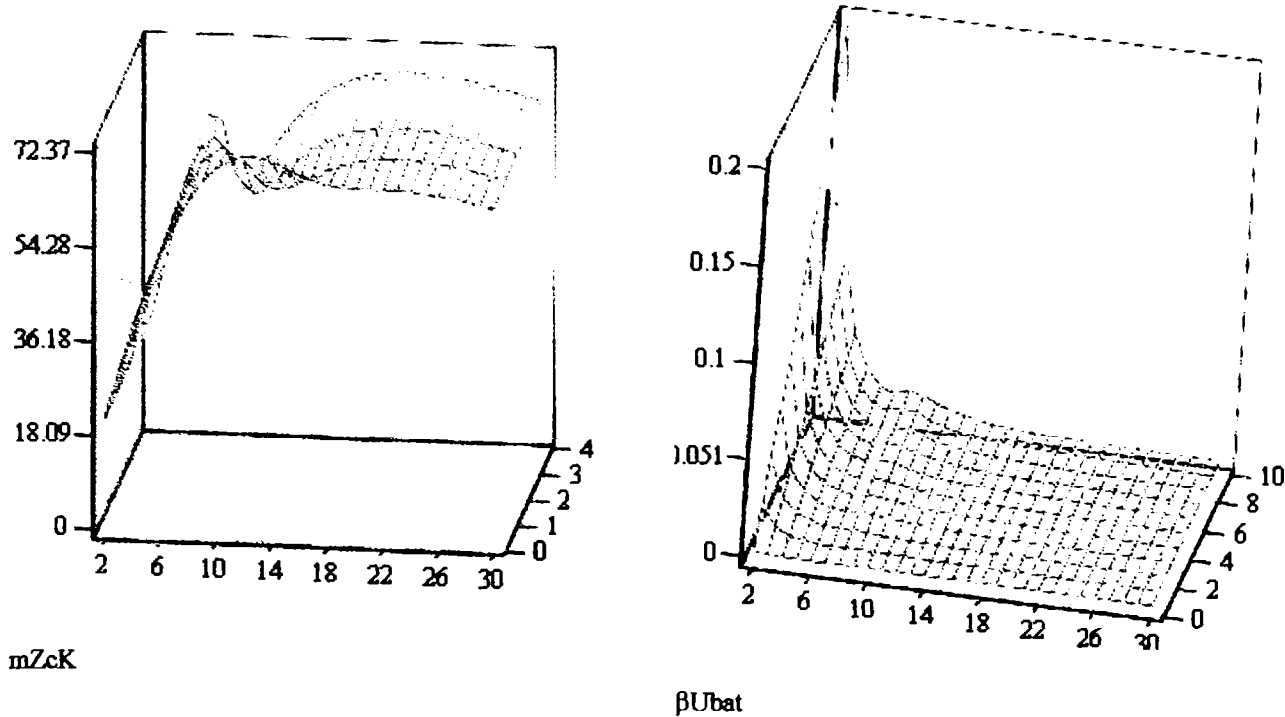
mαIs



mαIc2

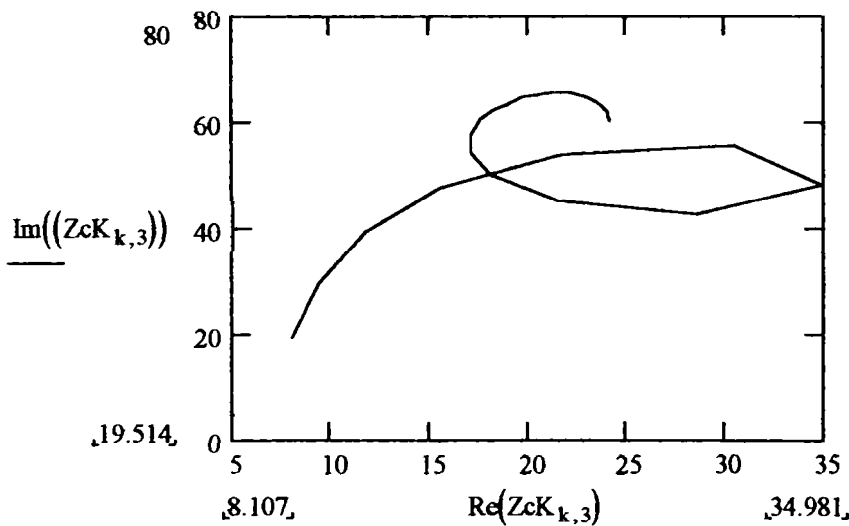


βUs



mZcK

betaUbat



Influenta modelului consumatorului linear asupra impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului deformant

$$ZcK1_{k,d} = \frac{Zcons11a_k \cdot [(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot Zcomp_{k,5} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcons11a_k + Zcomp_{k,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}$$

$$ZcK2_{k,d} = \frac{Zcons13a_k \cdot [(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot Zcomp_{k,5} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcons13a_k + Zcomp_{k,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}$$

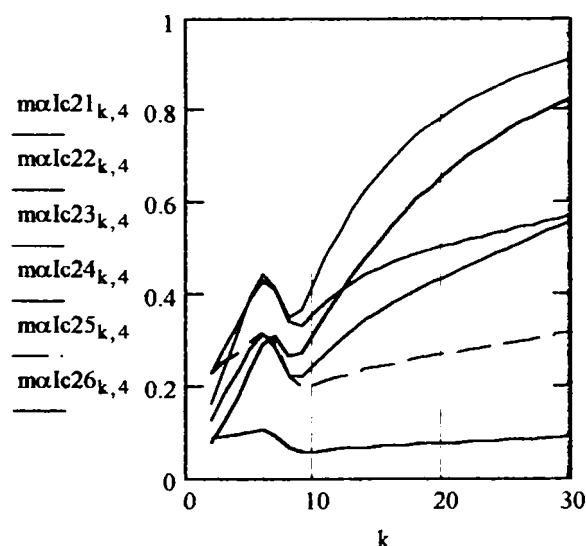
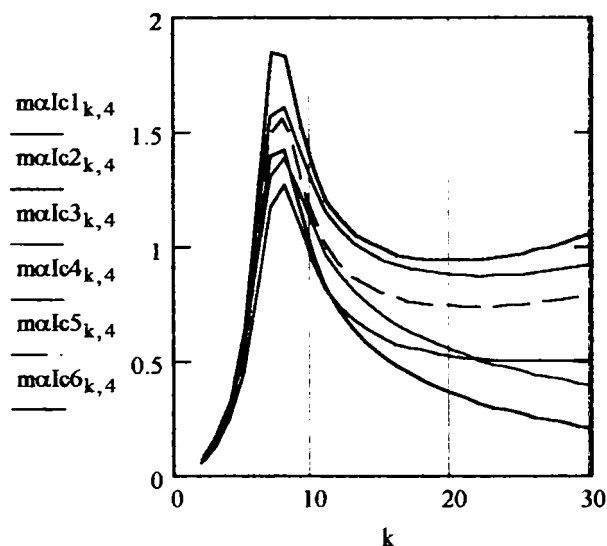
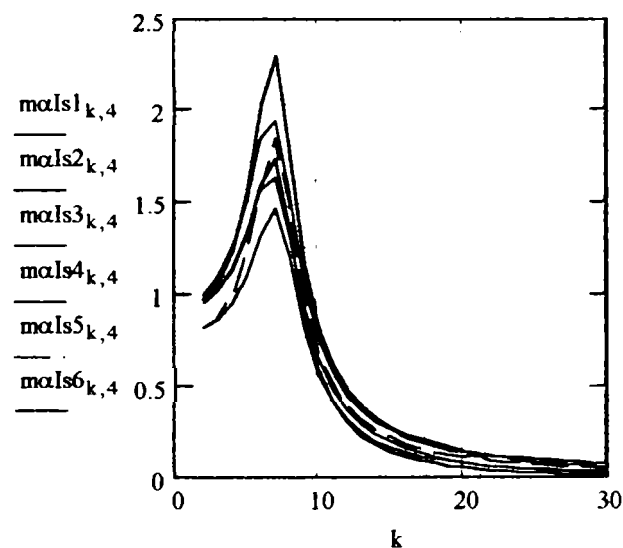
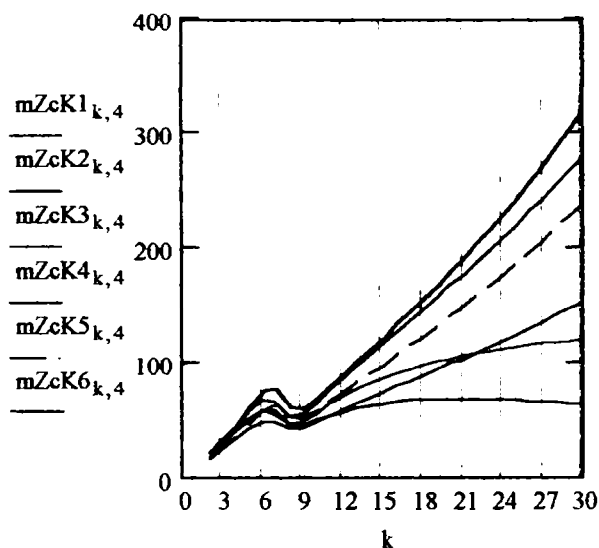
$$ZcK3_{k,d} = \frac{Zcons1a_k \cdot [(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot Zcomp_{k,5} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcons1a_k + Zcomp_{k,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}$$

$$ZcK4_{k,d} = \frac{Zcons12a_k \cdot [(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot Zcomp_{k,5} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcons12a_k + Zcomp_{k,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}$$

$$ZcK5_{k,d} = \frac{Zcons14a_k \cdot [(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot Zcomp_{k,5} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcons14a_k + Zcomp_{k,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}$$

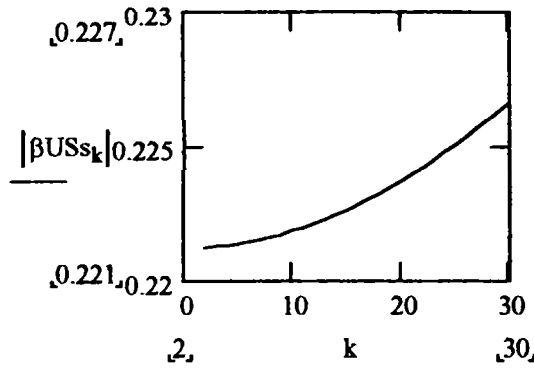
$$ZcK6_{k,d} = \frac{Zcons15a_k \cdot [(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot Zcomp_{k,5} + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcons15a_k + Zcomp_{k,5}) + 2 \cdot ZST_k + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k]}$$

$$\begin{aligned}
 m\alpha U_{bat1k,d} &:= |\alpha U_{bat1k,d}| & m\alpha lc_{2k,d} &:= |\alpha lc_{2k,d}| & m\alpha Us_{k,t} &:= |\alpha Us_{k,t}| & m\alpha ls_{k,d} &:= |\alpha ls_{k,d}| \\
 m\alpha lc_{k,d} &:= |\alpha lc_{k,d}| & mZcK1_{k,d} &:= |ZcK1_{k,d}| & mZcK2_{k,d} &:= |ZcK2_{k,d}| & mZcK3_{k,d} &:= |ZcK3_{k,d}| \\
 mZcK4_{k,d} &:= |ZcK4_{k,d}| & mZcK5_{k,d} &:= |ZcK5_{k,d}| & mZcK6_{k,d} &:= |ZcK6_{k,d}| & & \\
 m\alpha ls_{1k,d} &:= |\alpha ls_{1k,d}| & m\alpha ls_{2k,d} &:= |\alpha ls_{2k,d}| & m\alpha ls_{3k,d} &:= |\alpha ls_{3k,d}| & m\alpha ls_{4k,d} &:= |\alpha ls_{4k,d}| \\
 m\alpha ls_{6k,d} &:= |\alpha ls_{6k,d}| & m\alpha ls_{5k,d} &:= |\alpha ls_{5k,d}| & m\alpha lc_{5k,d} &:= |\alpha lc_{5k,d}| & & \\
 m\alpha lc_{1k,d} &:= |\alpha lc_{1k,d}| & m\alpha lc_{2k,d} &:= |\alpha lc_{2k,d}| & m\alpha lc_{3k,d} &:= |\alpha lc_{3k,d}| & m\alpha lc_{4k,d} &:= |\alpha lc_{4k,d}| \\
 m\alpha lc_{6k,d} &:= |\alpha lc_{6k,d}| & m\alpha lc_{25k,d} &:= |\alpha lc_{25k,d}| & m\alpha lc_{26k,d} &:= |\alpha lc_{26k,d}| & & \\
 m\alpha lc_{21k,d} &:= |\alpha lc_{21k,d}| & m\alpha lc_{22k,d} &:= |\alpha lc_{22k,d}| & m\alpha lc_{23k,d} &:= |\alpha lc_{23k,d}| & m\alpha lc_{24k,d} &:= |\alpha lc_{24k,d}|
 \end{aligned}$$



CONSUMATORUL DEFORMANT CONECTAT LA BARA DE MT A STĂIEI

$$\beta_{USs_k} := 1 - \frac{Z_{t_k}}{ZST_k}$$



$$Z_{k,d} := \frac{[(ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k] \cdot ZST_k}{[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k] \cdot ZST_k}$$

$$\alpha_{cons1k,d} := 2 \cdot \frac{[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k]}{[(ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,t} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k]}$$

$$\alpha_{sis1k,t} := \frac{[(ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,t} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k]}{[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,t} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k]}$$

$$\alpha_{cbk,d} := Y_{bath_{k,d}} \cdot \frac{[(ZL_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k] \cdot ZST_k}{[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y_k + ZST_k \cdot Y_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k]}$$

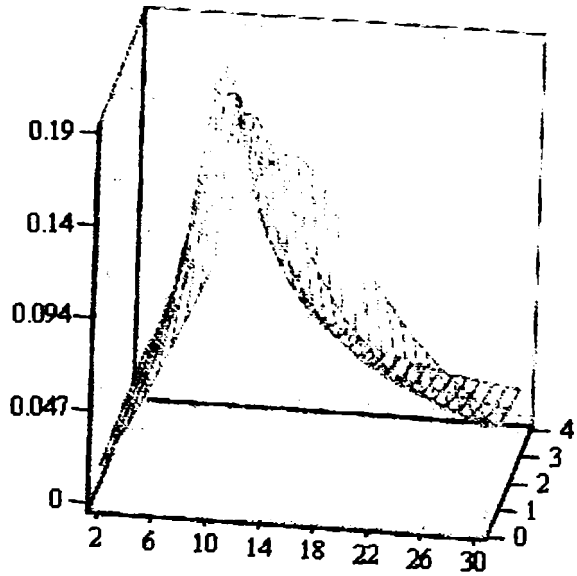
$$\beta_{Ucon1k,t} := 2 \cdot \frac{Zcons13a_k}{[(2 + ZL_k \cdot Y_k) \cdot Zcons13a_k + (2 + ZL_k \cdot Y_k) \cdot Zcomp_{k,t} + 2 \cdot ZL_k]} \quad \alpha_{sis_{k,d}} := \frac{Z_{k,d}}{ZST_k}$$

$$\alpha_{cons1k,d} := \beta_{Ucon1k,t} \cdot \frac{Z_{k,d}}{Zcons13a_k} \quad \beta_{bat_{k,t}} := 2 \cdot \frac{Zcomp_{k,t}}{[(2 + ZL_k \cdot Y_k) \cdot Zcons13a_k + (2 + ZL_k \cdot Y_k) \cdot Zcomp_{k,t} + 2 \cdot ZL_k]}$$

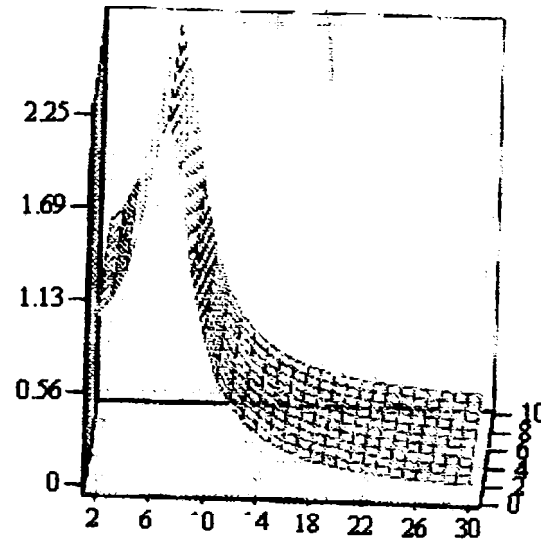
$$\alpha_{cbk,d} := Y_{bath_{k,d}} \cdot Z_{k,d}$$

$$m\alpha_{Us_{k,d}} := |\alpha_{Us_{k,d}}| \quad m\alpha_{sis1k,t} := |\alpha_{sis1k,t}| \quad m\alpha_{cons1k,d} := |\alpha_{cons1k,d}| \quad m\alpha_{cbk,d} := |\alpha_{cbk,d}|$$

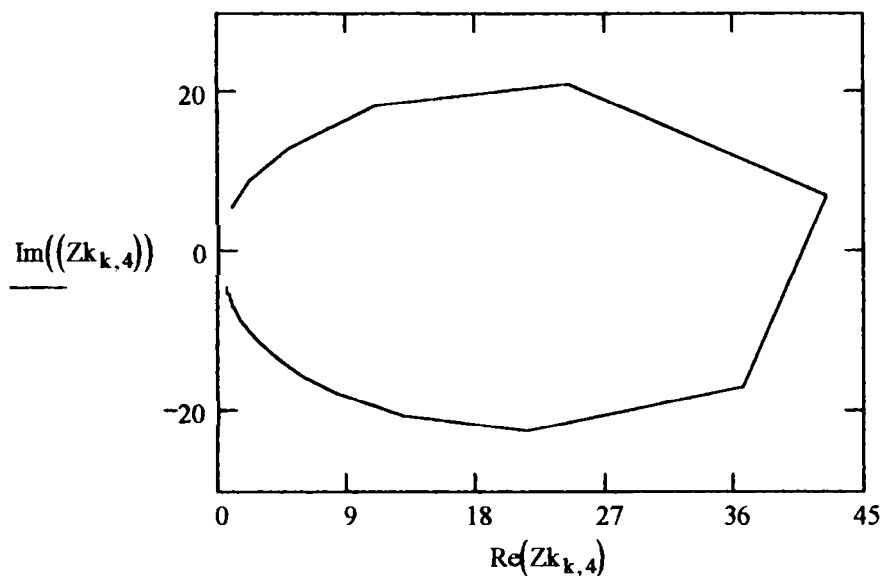
$$mZ_{k,d} := |Z_{k,d}| \quad m\beta_{Ucon1k,t} := |\beta_{Ucon1k,t}| \quad m\beta_{bat_{k,t}} := |\beta_{bat_{k,t}}|$$



m_alpha_cons1



m_alpha_sis1



Influența modelului consumatorului linear asupra impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului deformant și asupra coeficienților de transfer a curenților și tensiunilor armonice în nodurile rețelei.

$$Zk1_{k,d} := \frac{\left[(ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons11a_k) + 2 \cdot ZL_k \right] \cdot ZST_k}{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons11a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}$$

$$Zk2_{k,d} := \frac{\left[(ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k \right] \cdot ZST_k}{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}$$

$$Zk3_{k,d} := \frac{\left[(ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons1a_k) + 2 \cdot ZL_k \right] \cdot ZST_k}{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons1a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}$$

$$Zk4_{k,d} := \frac{\left[(ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons12a_k) + 2 \cdot ZL_k \right] \cdot ZST_k}{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons12a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}$$

$$Zk5_{k,d} := \frac{\left[(ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons14a_k) + 2 \cdot ZL_k \right] \cdot ZST_k}{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons14a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}$$

$$Zk6_{k,d} := \frac{\left[(ZL_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons15a_k) + 2 \cdot ZL_k \right] \cdot ZST_k}{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons15a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}$$

$$\alpha_{cons1_{k,d}} := 2 \cdot \frac{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons11a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}{ZST_k}$$

$$\alpha_{cons2_{k,d}} := 2 \cdot \frac{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons13a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}{ZST_k}$$

$$\alpha_{cons3_{k,d}} := 2 \cdot \frac{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons1a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}{ZST_k}$$

$$\alpha_{cons4_{k,d}} := 2 \cdot \frac{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons12a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}{ZST_k}$$

$$\alpha_{cons5_{k,d}} := 2 \cdot \frac{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons14a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}{ZST_k}$$

$$\alpha_{cons6_{k,d}} := 2 \cdot \frac{\left[(ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k \cdot Y1_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} + ZL_k \cdot Y1_k + ZST_k \cdot Y1_k + 2) \cdot (Zcomp_{k,5} + Zcons15a_k) + 2 \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \cdot Yecv_{k,d} \cdot ZL_k + 2 \cdot ZST_k \right]}{ZST_k}$$

$$m\alpha Us_{k,d} := |\alpha Us_{k,d}|$$

$$m\alpha Is_{1k,t} := |\alpha Is_{1k,t}| \quad m\alpha Is_{2k,t} := |\alpha Is_{2k,t}| \quad m\alpha Is_{3k,t} := |\alpha Is_{3k,t}| \quad m\alpha Is_{4k,t} := |\alpha Is_{4k,t}|$$

$$m\alpha Is_{5k,t} := |\alpha Is_{5k,t}| \quad m\alpha Is_{6k,t} := |\alpha Is_{6k,t}| \quad mZk_{1k,d} := |Zk_{1k,d}| \quad mZk_{2k,d} := |Zk_{2k,d}|$$

$$mZk_{3k,d} := |Zk_{3k,d}| \quad mZk_{4k,d} := |Zk_{4k,d}| \quad mZk_{5k,d} := |Zk_{5k,d}| \quad mZk_{6k,d} := |Zk_{6k,d}|$$

$$m\alpha lcons_{1k,d} := |\alpha lcons_{1k,d}| \quad m\alpha lcons_{2k,d} := |\alpha lcons_{2k,d}| \quad m\alpha lcons_{3k,d} := |\alpha lcons_{3k,d}|$$

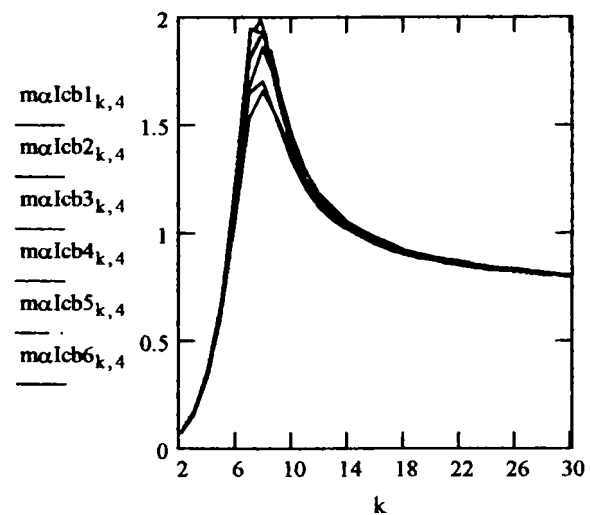
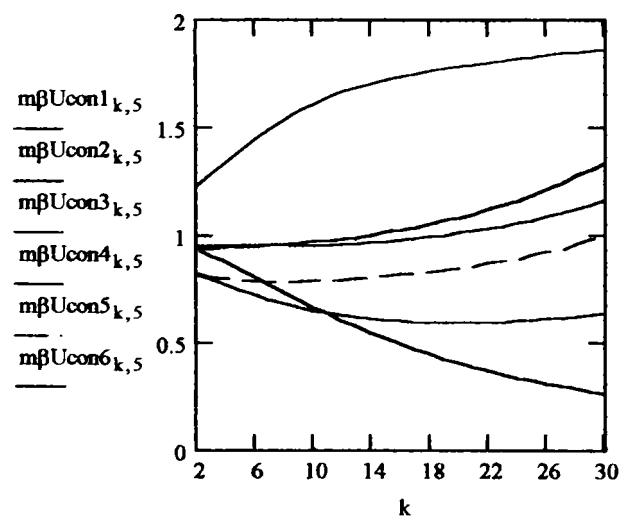
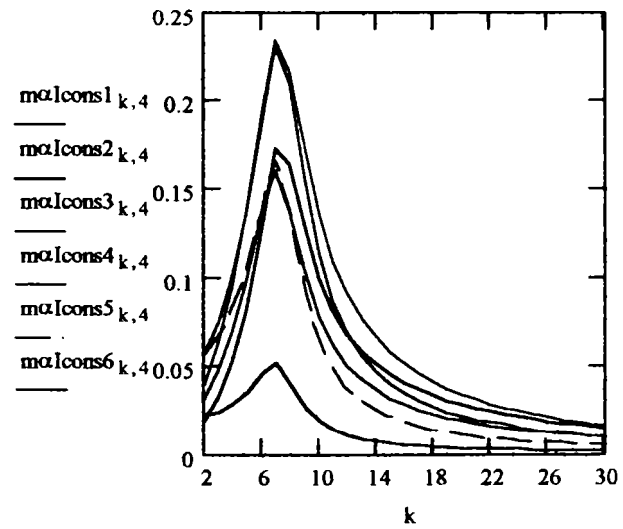
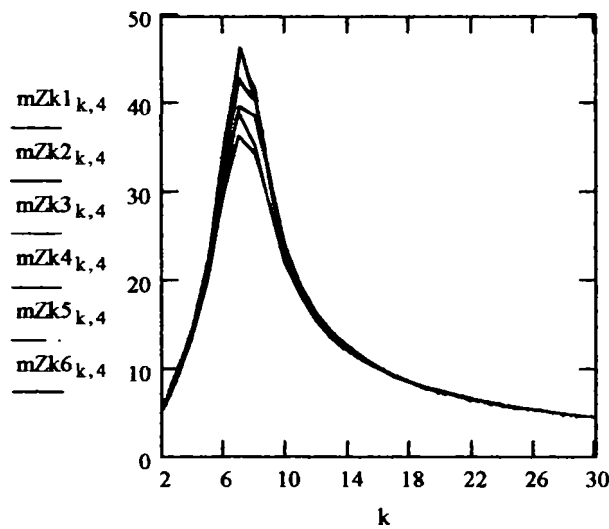
$$m\alpha lcons_{4k,d} := |\alpha lcons_{4k,d}| \quad m\alpha lcons_{5k,d} := |\alpha lcons_{5k,d}| \quad m\alpha lcons_{6k,d} := |\alpha lcons_{6k,d}|$$

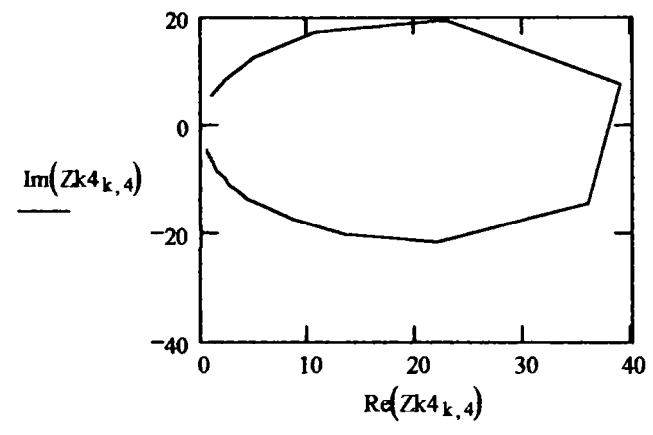
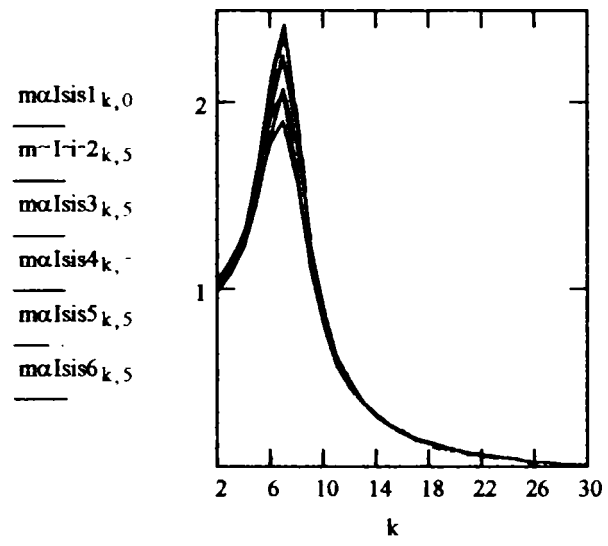
$$m\beta Ucon_{1k,t} := |\beta Ucon_{1k,t}| \quad m\beta Ucon_{2k,t} := |\beta Ucon_{2k,t}| \quad m\beta Ucon_{3k,t} := |\beta Ucon_{3k,t}|$$

$$m\beta Ucon_{4k,t} := |\beta Ucon_{4k,t}| \quad m\beta Ucon_{5k,t} := |\beta Ucon_{5k,t}| \quad m\beta Ucon_{6k,t} := |\beta Ucon_{6k,t}|$$

$$m\alpha lcb_{1k,d} := |\alpha lcb_{1k,d}| \quad m\alpha lcb_{4k,d} := |\alpha lcb_{4k,d}| \quad m\alpha lcb_{2k,d} := |\alpha lcb_{2k,d}| \quad m\alpha lcb_{3k,d} := |\alpha lcb_{3k,d}|$$

$$m\alpha lcb_{6k,d} := |\alpha lcb_{6k,d}| \quad m\alpha lcb_{5k,d} := |\alpha lcb_{5k,d}|$$





Anexa 3

Fișier Mathcad de calcul a parametrilor elementelor de rețea în domeniul subsincron (Aplicația 4.6.2)

$$k := 2..40$$

$$n_k := \frac{2}{k}$$

$$X_{st_k} := n_k \cdot X_{ts} \quad \tan \psi_1 := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_n) - 0.042 \ln(S_n)^2)$$

$$R_s := \frac{X_{ts}}{\tan \psi_1} \quad R_p := 10 \cdot X_{ts} \cdot \tan \psi_1 \quad \text{transformator}$$

$$R_{sta_k} := \frac{R_s \cdot R_p^2 + X_{st_k} \cdot (R_p + R_s)}{R_p^2 + (X_{st_k})^2} \quad X_{sta_k} := \frac{X_{st_k} \cdot R_p^2}{R_p^2 + (X_{st_k})^2}$$

$$X_{T1_k} := n_k \cdot X_{T1} \quad \tan \psi_{1T1} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_{nT1}) - 0.042 \ln(S_{nT1})^2) \quad \text{transformatorul T1}$$

$$R_{sT1} := \frac{X_{T1}}{\tan \psi_{1T1}} \quad R_{pT1} := 10 \cdot X_{T1} \cdot \tan \psi_{1T1}$$

$$R_{tT1_k} := \frac{R_{sT1} \cdot R_{pT1}^2 + X_{T1_k} \cdot (R_{pT1} + R_{sT1})}{R_{pT1}^2 + (X_{T1_k})^2} \quad X_{tT1_k} := \frac{X_{T1_k} \cdot R_{pT1}^2}{R_{pT1}^2 + (X_{T1_k})^2}$$

$$X_{T2_k} := n_k \cdot X_{T2} \quad \tan \psi_{1T2} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_{nT2}) - 0.042 \ln(S_{nT2})^2) \quad \text{transformatorul T2}$$

$$R_{sT2} := \frac{X_{T2}}{\tan \psi_{1T2}} \quad R_{pT2} := 10 \cdot X_{T2} \cdot \tan \psi_{1T2}$$

$$R_{tT2_k} := \frac{R_{sT2} \cdot R_{pT2}^2 + X_{T2_k} \cdot (R_{pT2} + R_{sT2})}{R_{pT2}^2 + (X_{T2_k})^2} \quad X_{tT2_k} := \frac{X_{T2_k} \cdot R_{pT2}^2}{R_{pT2}^2 + (X_{T2_k})^2}$$

$$X_{T3_k} := n_k \cdot X_{T3} \quad \tan \psi_{1T3} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_{nT3}) - 0.042 \ln(S_{nT3})^2) \quad \text{transformatorul T3}$$

$$R_{sT3} := \frac{X_{T3}}{\tan \psi_{1T3}} \quad R_{pT3} := 10 \cdot X_{T3} \cdot \tan \psi_{1T3}$$

$$R_{tT3_k} := \frac{R_{sT3} \cdot R_{pT3}^2 + X_{T3_k} \cdot (R_{pT3} + R_{sT3})}{R_{pT3}^2 + (X_{T3_k})^2} \quad X_{tT3_k} := \frac{X_{T3_k} \cdot R_{pT3}^2}{R_{pT3}^2 + (X_{T3_k})^2}$$

$$X_{T4_k} := n_k \cdot X_{T4} \quad \tan \psi_{1T4} := \exp(0.693 + 0.796 \ln(S_{nT4}) - 0.042 \ln(S_{nT4})^2) \quad \text{transformatorul T4}$$

$$R_{sT4} := \frac{X_{T4}}{\tan \psi_{1T4}} \quad R_{pT4} := 10 \cdot X_{T4} \cdot \tan \psi_{1T4}$$

$$R_{tT4_k} := \frac{R_{sT4} \cdot R_{pT4}^2 + X_{T4_k} \cdot (R_{pT4} + R_{sT4})}{R_{pT4}^2 + (X_{T4_k})^2} \quad X_{tT4_k} := \frac{X_{T4_k} \cdot R_{pT4}^2}{R_{pT4}^2 + (X_{T4_k})^2}$$

Linile electrice

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \rho := 100 \quad \alpha_1 := \sqrt{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \mu_0} \quad \rho_{Al} := 0.0282 \quad \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$S := 70 \text{ mm}^2 \quad S_{Al} := 66.2 \text{ mm}^2 \quad r_r := 5.8 \text{ mm} \quad H_{st} := 12.1 \text{ m} \quad R_{cc} := 1.025 \rho_{Al} \cdot \frac{1000}{S_{Al}}$$

LEA L2 $L_1 := 12 \text{ km}$

$$x_{i_k} := 0.3545 \sqrt{\frac{n_k}{R_{cc}}} \quad r_{l_k} := \begin{cases} R_{cc} \left[0.035 (x_{i_k})^2 + 0.938 \right] & \text{if } x_{i_k} \leq 2.4 \\ R_{cc} \left[0.35 (x_{i_k}) + 0.3 \right] & \text{if } x_{i_k} > 2.4 \end{cases}$$

$$D_{rs} := \sqrt{1.3^2 + 0.625^2} \quad D_{st} := D_{rs} \quad D_{rt} := 1.25 \text{ m} \quad R_{cc} = 0.437 \quad \epsilon_0 := \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$$

$$\sigma := 2520 \quad k_b := 0.25 \quad \gamma := 272.4 \frac{1}{\text{km}} \quad a := 100 \text{ m}$$

$$f_{\max} := a^2 \cdot \frac{\gamma}{8 k_b \cdot \sigma} \quad f_{\max} := 0.54 \text{ m} \quad \lambda_{iz} := 0.485 \text{ m}$$

$$h_1 := H_{st} - \lambda_{iz} + (-2) \cdot \frac{f_{\max}}{3} \quad h_2 := 10.8 - \lambda_{iz} - 2 \cdot \frac{f_{\max}}{3} \quad \alpha_k := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot n_k \cdot \mu_0}{r \cdot \rho}}$$

$$D_m := (D_{rs} \cdot D_{rt} \cdot D_{st})^{\frac{1}{3}} \quad D_m = 1.375 \quad r_m := 0.8116 r_r \quad h_m := \sqrt{h_1 \cdot h_2^2}$$

$$X_{dl_k} := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot n_k \cdot 1000}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(\frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot h_m \cdot \alpha_k \right)} \right) \quad X_{d1} := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot 1 \cdot 1000}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(\frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot h_m \cdot \alpha_1 \right)} \right)$$

$$x_{dl_k} := \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot n_k \cdot 1000}{2\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{D_m}{r_m \cdot 10^{-3}} \right) + 2 \sqrt{2} \cdot h_m \cdot \frac{\alpha_k}{3} \right) \quad C_{01} := \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot 1000}{\ln \left(\frac{D_m}{r_r \cdot 10^{-3}} \right)}$$

$$z_{l_k} := r_{l_k} + i \cdot x_{dl_k} \quad b_{l_k} := \omega \cdot n_k \cdot C_{01} \quad y_{l_k} := i \cdot b_{l_k}$$

Coeficienti Kennely

$$k_{z_l_k} := \frac{\sinh \left(\sqrt{z_{l_k} \cdot y_{l_k} \cdot L_1^2} \right)}{\sqrt{z_{l_k} \cdot y_{l_k} \cdot L_1^2}} \quad k_{y_l_k} := \frac{\tanh \left(\frac{\sqrt{z_{l_k} \cdot y_{l_k} \cdot L_1^2}}{2} \right)}{\sqrt{z_{l_k} \cdot y_{l_k} \cdot L_1^2}}$$

$$Z_{l_k} := z_{l_k} \cdot L_1 \cdot k_{z_l_k} \quad Y_{L_k} := 2 \cdot y_{l_k} \cdot L_1 \cdot k_{y_l_k}$$

LEA L3 $L_2 := 14 \text{ km}$

$$S_1 := 95 \text{ mm}^2 \quad S_{Al1} := 90 \text{ mm}^2 \quad r_{r1} := 6.7 \text{ mm} \quad H_{st} := 12.1 \text{ m}$$

$$R_{cc1} := 1.025 \rho_{Al} \cdot \frac{1000}{S_{Al1}}$$

$$x_{i_k} := 0.3545 \sqrt{\frac{n_k}{R_{cc1}}}$$

$$r11_k := \begin{cases} Rcc1 \cdot [0.035(x11_k)^2 + 0.938] & \text{if } x11_k \leq 2.4 \\ Rcc1 \cdot [0.35(x11_k) + 0.3] & \text{if } x11_k > 2.4 \end{cases}$$

$$Drs := \sqrt{1.3^2 + 0.625^2} \quad Dst := Drs \quad Drt := 1.25 \quad Rcc = 0.437$$

$$\sigma := 3335 \quad kb := 0.25 \quad \gamma := 366 \frac{1}{\text{km}} \quad a := 100 \text{ m}$$

$$fmax := a^2 \cdot \frac{\gamma}{8 \cdot kb \cdot \sigma} \quad \lambda iz := 0.485$$

$$fmax := 0.54873$$

$$h1 := Hst - \lambda iz + (-2) \cdot \frac{fmax}{3} \quad h2 := 10.8 - \lambda iz - 2 \cdot \frac{fmax}{3}$$

$$h2 = 9.949 \quad h1 = 11.249$$

$$Dm := (Drs \cdot Drt \cdot Dst)^{\frac{1}{3}} \quad Dm = 1.375 \quad rml := 0.8116r1 \quad hm := \sqrt{h1 \cdot h2^2} \quad \alpha_k := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 50 n_k \cdot \mu 0}{\rho}} \quad hm = 3$$

$$Xd11 := \frac{\mu 0 \cdot \omega \cdot 1 \cdot 1000}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{Dm}{rml \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(\frac{2}{3} \cdot \sqrt{2} \cdot hm \cdot \alpha 1 \right)} \right) \quad xd11_k := \frac{\mu 0 \cdot \omega \cdot k \cdot 1000}{2\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{Dm}{rml \cdot 10^{-3}} \right) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot hm \cdot \frac{\alpha_k}{3} \right)$$

$$z11_k := r11_k + i \cdot xd11_k \quad C011 := \frac{2\pi \cdot \epsilon 0 \cdot 1000}{\ln \left(\frac{Dm}{r1 \cdot 10^{-3}} \right)} \quad b11_k := \omega \cdot n_k \cdot C011 \quad y11_k := i \cdot b11_k$$

Coeficientii Kennely

$$kz2_k := \frac{\sinh \left(\frac{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}}{2} \right)}{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}} \quad ky2_k := \frac{\tanh \left(\frac{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}}{2} \right)}{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L2^2}}$$

$$Zl2_k := z11_k \cdot L2 \cdot kz2_k \quad YL2_k := 2 \cdot y11_k \cdot L2 \cdot ky2_k$$

LEA L4 L3 := 10 km

$$kz3_k := \frac{\sinh \left(\frac{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L3^2}}{2} \right)}{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L3^2}} \quad ky3_k := \frac{\tanh \left(\frac{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L3^2}}{2} \right)}{\sqrt{z11_k \cdot y11_k \cdot L3^2}}$$

$$Zl3_k := z11_k \cdot L3 \cdot kz3_k \quad YL3_k := 2 \cdot y11_k \cdot L3 \cdot ky3_k$$

Consumatorii

$$Unc := 20 \text{ kV}$$

$$\text{Consumatorul C1} \quad Qca := 1.453 \text{ Mvar} \quad Pca := 3 \text{ MW}$$

$$\text{Model R/L} \quad Rcla := \frac{Unc^2}{Pca} \quad Xcla := \frac{Unc^2}{Qca}$$

$$Rca_k := \frac{Rcla \cdot (n_k)^2 \cdot Xcla^2}{Rcla^2 + (n_k)^2 \cdot Xcla^2} \quad Xca_k := \frac{Rcla^2 \cdot n_k \cdot Xcla}{Rcla^2 + (n_k)^2 \cdot Xcla^2} \quad Zconsla_k := Rca_k + i \cdot Xca_k$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Zconsla_k := (1.125 + 0.0879 n_k) \cdot Rcl \epsilon$$

$$\text{Model CIGRE} \quad X_{pa_k} := n_k \cdot \frac{R_{cl a}}{6.7 \cdot \frac{Q_{ca}}{P_{ca}} - 0.74}$$

$$Z_{cons12a_k} := \frac{R_{cl a} \cdot (X_{pa_k})^2}{R_{cl a}^2 + (X_{pa_k} + 0.073 R_{cl a} \cdot n_k)^2} + i \cdot \frac{R_{cl a}^2 \cdot X_{pa_k} + X_{pa_k} \cdot 0.073 R_{cl a} \cdot n_k \cdot (X_{pa_k} + 0.073 R_{cl a} \cdot n_k)}{R_{cl a}^2 + (X_{pa_k} + 0.073 R_{cl a} \cdot n_k)^2}$$

$$\text{Model Pesonen} \quad Z_{cons13a_k} := \frac{1}{0.1 \cdot n_k + 0.9} \cdot (R_{cl a} + i \cdot X_{cl a})$$

$$\text{Modelul 5} \quad R_{aaa_k} := 0.175 \cdot 0.175 \left[1 + 0.2 \cdot (n_k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aaa_k} := \frac{R_{cl a}}{0.5} \cdot 0.175 n_k \left[2 \cdot (n_k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ssa} := \frac{R_{cl a}}{0.5} \quad X_{ssa_k} := \frac{Q_{ca}}{P_{ca}} \cdot n_k \cdot R_{ssa} \quad Z_{cons14a_k} := \frac{(R_{aaa_k} + i \cdot X_{aaa_k}) \cdot (R_{ssa} + i \cdot X_{ssa_k})}{(R_{aaa_k} + R_{ssa}) + i \cdot (X_{ssa_k} + X_{aaa_k})}$$

Model MOTOR

$$X_{Ma} := \frac{U_{nc}^2}{\sqrt{P_{ca}^2 + Q_{ca}^2}} \quad R_{Ma} := \frac{X_{Ma}}{3} \quad Z_{cons15a_k} := R_{Ma} \cdot \sqrt{n_k} + i \cdot X_{Ma} \cdot n_k$$

Consumatorul C2 $Q_{cb} := 0.92 \text{ Mvar}$ $P_{cb} := 2 \text{ MW}$

Model R/L

$$R_{cl b} := \frac{U_{nc}^2}{P_{cb}} \quad X_{cl b} := \frac{U_{nc}^2}{Q_{cb}} \quad R_{cb_k} := \frac{R_{cl b} (n_k)^2 \cdot X_{cl b}^2}{R_{cl b}^2 + (n_k)^2 \cdot X_{cl b}^2} \quad X_{cb_k} := \frac{R_{cl b}^2 \cdot n_k \cdot X_{cl b}}{R_{cl b}^2 + (n_k)^2 \cdot X_{cl b}^2} \quad Z_{cons1b_k} := R_{cb_k} + i \cdot X_{cb_k}$$

Model rezistiv $Z_{cons11b_k} := (1.125 + 0.0879 n_k) \cdot R_{cl b}$

$$\text{Model CIGRE} \quad X_{pb_k} := n_k \cdot \frac{R_{cl b}}{6.7 \cdot \frac{Q_{cb}}{P_{cb}} - 0.74}$$

$$Z_{cons12b_k} := \frac{R_{cl b} \cdot (X_{pb_k})^2}{R_{cl b}^2 + (X_{pb_k} + 0.073 R_{cl b} \cdot n_k)^2} + i \cdot \frac{R_{cl b}^2 \cdot X_{pb_k} + X_{pb_k} \cdot 0.073 R_{cl b} \cdot n_k \cdot (X_{pb_k} + 0.073 R_{cl b} \cdot n_k)}{R_{cl b}^2 + (X_{pb_k} + 0.073 R_{cl b} \cdot n_k)^2}$$

$$\text{Model Pesonen} \quad Z_{cons13b_k} := \frac{1}{0.1 \cdot n_k + 0.9} \cdot (R_{cl b} + i \cdot X_{cl b})$$

$$\text{Modelul 5} \quad R_{aab_k} := 0.175 \cdot 0.175 \left[1 + 0.2 \cdot (n_k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aab_k} := \frac{R_{cl b}}{0.5} \cdot 0.175 n_k \left[2 \cdot (n_k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ssb} := \frac{R_{cl b}}{0.5} \quad X_{ssb_k} := \frac{Q_{cb}}{P_{cb}} \cdot n_k \cdot R_{ssb} \quad Z_{cons14b_k} := \frac{(R_{aab_k} + i \cdot X_{aab_k}) \cdot (R_{ssb} + i \cdot X_{ssb_k})}{(R_{aab_k} + R_{ssb}) + i \cdot (X_{ssb_k} + X_{aab_k})}$$

$$\text{Model MOTOR} \quad X_{Mb} := \frac{U_{nc}^2}{\sqrt{P_{cb}^2 + Q_{cb}^2}} \quad R_{Mb} := \frac{X_{Mb}}{3} \quad Z_{cons15b_k} := R_{Mb} \cdot \sqrt{n_k} + i \cdot X_{Mb} \cdot n_k$$

Consumatorul C3 $Q_{cc} := 0.7487 \text{ Mvar}$ $P_{cc} := 1.8 \text{ MW}$

Model R/L

$$R_{cl c} := \frac{U_{nc}^2}{P_{cc}} \quad X_{cl c} := \frac{U_{nc}^2}{Q_{cc}} \quad R_{cc_k} := \frac{R_{cl c} (n_k)^2 \cdot X_{cl c}^2}{R_{cl c}^2 + (n_k)^2 \cdot X_{cl c}^2} \quad X_{cc_k} := \frac{R_{cl c}^2 \cdot n_k \cdot X_{cl c}}{R_{cl c}^2 + (n_k)^2 \cdot X_{cl c}^2} \quad Z_{cons1c_k} := R_{cc_k} + i \cdot X_{cc_k}$$

Model rezistiv $Z_{cons11c_k} := (1.125 + 0.0879n_k) \cdot R_{clc}$

Model CIGRE $X_{pc_k} := n_k \cdot \frac{R_{clc}}{6.7 \cdot \frac{Q_{cc}}{P_{cc}} - 0.74}$

$$Z_{cons12c_k} := \frac{R_{clc} \cdot (X_{pc_k})^2}{R_{clc}^2 + (X_{pc_k} + 0.073R_{clc} \cdot n_k)^2} + i \cdot \frac{R_{clc}^2 \cdot X_{pc_k} + X_{pc_k} \cdot 0.073R_{clc} \cdot k \cdot (X_{pc_k} + 0.073R_{clc} \cdot n_k)}{R_{clc}^2 + (X_{pc_k} + 0.073R_{clc} \cdot n_k)^2}$$

Model Pesonen $Z_{cons13c_k} := \frac{1}{0.1 \cdot n_k + 0.9} \cdot (R_{clc} + i \cdot X_{clc})$

Modelul 5

$$R_{aac_k} := \frac{R_{clc}}{10} \cdot [1 + 0.2 \cdot (n_k \cdot 50)^{0.5}]$$

$$R_{aac_k} := 0.175 \cdot 0.175 \cdot [1 + 0.2 \cdot (n_k \cdot 50)^{0.5}] \quad X_{aac_k} := \frac{R_{clc}}{0.5} \cdot 0.175 \cdot k \cdot [2 \cdot (n_k \cdot 50)^{-0.15}]$$

$$R_{ssc} := \frac{R_{clc}}{0.5} \quad X_{ssc_k} := \frac{Q_{cc}}{P_{cc}} \cdot n_k \cdot R_{ssc} \quad Z_{cons14c_k} := \frac{(R_{aac_k} + i \cdot X_{aac_k}) \cdot (R_{ssc} + i \cdot X_{ssc_k})}{(R_{aac_k} + R_{ssc}) + i \cdot (X_{ssc_k} + X_{aac_k})}$$

Model MOTOR $X_{Mc} := \frac{U_{nc}^2}{\sqrt{P_{cc}^2 + Q_{cc}^2}} \quad R_{Mc} := \frac{X_{Mc}}{3} \quad Z_{cons15c_k} := R_{Mc} \cdot \sqrt{n_k} + i \cdot X_{Mc} \cdot n_k$

Consumatorul C 4 $Q_{cd} := 0.763 \quad Mvar \quad P_{cd} := 1.5 \text{ MW}$

Model R/L $R_{cd} := \frac{U_{nc}^2}{P_{cd}} \quad X_{cd} := \frac{U_{nc}^2}{Q_{cd}} \quad R_{cd_k} := \frac{R_{cd} \cdot (n_k)^2 \cdot X_{cd}^2}{R_{cd}^2 + (n_k)^2 \cdot X_{cd}^2} \quad X_{cd_k} := \frac{R_{cd}^2 \cdot n_k \cdot X_{cd}}{R_{cd}^2 + (n_k)^2 \cdot X_{cd}^2}$

$$Z_{cons1d_k} := R_{cd_k} + i \cdot X_{cd_k}$$

Model rezistiv $Z_{cons11d_k} := (1.125 + 0.0879n_k) \cdot R_{cd}$

Model CIGRE $X_{pd_k} := n_k \cdot \frac{R_{cd}}{6.7 \cdot \frac{Q_{cd}}{P_{cd}} - 0.74}$

$$Z_{cons12d_k} := \frac{R_{cd} \cdot (X_{pd_k})^2}{R_{cd}^2 + (X_{pd_k} + 0.073R_{cd} \cdot n_k)^2} + i \cdot \frac{R_{cd}^2 \cdot X_{pd_k} + X_{pd_k} \cdot 0.073R_{cd} \cdot n_k \cdot (X_{pd_k} + 0.073R_{cd} \cdot n_k)}{R_{cd}^2 + (X_{pd_k} + 0.073R_{cd} \cdot n_k)^2}$$

Model Pesonen $Z_{cons13d_k} := \frac{1}{0.1 \cdot n_k + 0.9} \cdot (R_{cd} + i \cdot X_{cd})$

Modelul 5 $R_{aad_k} := 0.175 \cdot 0.175 \cdot [1 + 0.2 \cdot (n_k \cdot 50)^{0.5}] \quad X_{aad_k} := \frac{R_{cd}}{0.5} \cdot 0.175 \cdot n_k \cdot [2 \cdot (n_k \cdot 50)^{-0.15}]$

$$R_{ssd} := \frac{R_{cd}}{0.5} \quad X_{ssd_k} := \frac{Q_{cd}}{P_{cd}} \cdot k \cdot R_{ssd} \quad Z_{cons14d_k} := \frac{(R_{aad_k} + i \cdot X_{aad_k}) \cdot (R_{ssd} + i \cdot X_{ssd_k})}{(R_{aad_k} + R_{ssd}) + i \cdot (X_{ssd_k} + X_{aad_k})}$$

Model MOTOR $X_{Md} := \frac{U_{nc}^2}{\sqrt{P_{cd}^2 + Q_{cd}^2}} \quad R_{Md} := \frac{X_{Md}}{3} \quad Z_{cons15d_k} := R_{Md} \cdot \sqrt{n_k} + i \cdot X_{Md} \cdot n_k$

Compensare transversala la consumator

$$Bct_{k,t} := \frac{Qcb}{Unc^2} \cdot tr_t \cdot n_k \quad d := 0..4$$

$$dr := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0.5 \\ 0.75 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$Bbatb_{k,d} := \frac{2.4}{20^2} \cdot n_k \cdot dr_d \quad Ybatb_{k,d} := i \cdot Bbatb_{k,d}$$

Linia in cablu L5

$$l := 12 \text{ km}$$

$$Rs1 := \frac{1000}{50.2 \cdot \pi \cdot 14.30.2} \quad Rcccablu := 0.377 \quad xdcablu := 0.208 \quad bcablu := 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 0.205 \cdot 10^{-6}$$

$$Xs1 := 0.1445 \log\left(\frac{126}{11.14}\right) \quad p_k := \frac{1}{1 + \left(\frac{Rs1}{n_k \cdot Xs1}\right)^2}$$

$$bcablul_k := bcablu \cdot k \quad xicab_k := 0.3545 \sqrt{\frac{n_k}{Rcccablu}} \quad ycablul_k := i \cdot bcablul_k$$

$$ricablul_k := \begin{cases} Rcccablu \cdot [0.035(xicab_k)^2 + 0.938] & \text{if } xicab_k \leq 2.4 \\ Rcccablu \cdot [0.35(xicab_k) + 0.3] & \text{if } xicab_k > 2.4 \end{cases}$$

$$rcablul_k := ricablul_k + p_k \cdot Rs1 \quad xcablul_k := xdcablu \cdot k - p_k \cdot Xs1 \cdot n_k \quad zcablul_k := rcablul_k + i \cdot xcablul_k$$

$$kzcablul_k := \frac{\sinh\left(\frac{\sqrt{zcablul_k \cdot ycablul_k} \cdot l}{2}\right)}{\sqrt{zcablul_k \cdot ycablul_k} \cdot l} \quad kycablul_k := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{zcablul_k \cdot ycablul_k} \cdot l}{2}\right)}{\sqrt{zcablul_k \cdot ycablul_k} \cdot l}$$

$$Zcablu_k := zcablul_k \cdot l \cdot kzcablul_k \quad Ycablu_k := 2 \cdot ycablul_k \cdot l \cdot kycablul_k$$

Consumatorul C5

$$Pc2 := 3 \text{ MW} \quad Qc2 := 1.8 \text{ MVA}$$

$$\text{Model R/L} \quad Rcons := \frac{20^2}{Pc2} \quad Xcons := \frac{20^2}{Qc2}$$

$$Rcons2_k := \frac{Rcons \cdot (n_k)^2 \cdot Xcons \cdot Xcons}{Rcons^2 + (n_k)^2 \cdot (Xcons \cdot Xcons)} \quad Xcons2_k := \frac{Rcons \cdot Rcons \cdot n_k \cdot Xcons}{Rcons \cdot Rcons + (n_k)^2 \cdot Xcons^2} \quad Zcons2_k := Rcons2_k + i \cdot Xcons2_k$$

$$\text{Modelul 5} \quad Raa2_k := 0.1750.175 \left[1 + 0.2 \cdot (n_k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad Xaa2_k := \frac{Rcons}{0.5} \cdot 0.175 n_k \cdot \left[2 \cdot (n_k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ss2} := \frac{R_{cons}}{0.5} \quad X_{ss2k} := \frac{Q_{c2}}{P_{c2}} \cdot n_k \cdot R_{ss2} \quad Z_{cons24k} := \frac{R_{aa2k} \cdot R_{ss2} - X_{ss2k} \cdot X_{aa2k} + i \cdot (X_{aa2k} \cdot R_{ss2} + R_{aa2k} \cdot X_{ss2k})}{(R_{aa2k} + R_{ss2}) + i \cdot (X_{ss2k} + X_{aa2k})}$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Z_{cons21k} := (1.125 + 0.0879n_k) \cdot R_{cons}$$

$$\text{Model CIGRE} \quad X_{p2k} := n_k \cdot \frac{R_{cons}}{6.7 \frac{Q_{c2}}{P_{c2}} - 0.74}$$

$$Z_{cons22k} := \frac{R_{cons} \cdot (X_{p2k})^2}{R_{cons}^2 + (X_{p2k} + 0.073 R_{cons} \cdot n_k)^2} + i \cdot \frac{R_{cons}^2 \cdot X_{p2k} + X_{p2k} \cdot 0.073 R_{cons} \cdot n_k \cdot (X_{p2k} + 0.073 R_{cons} \cdot n_k)}{R_{cons}^2 + (X_{p2k} + 0.073 R_{cons} \cdot n_k)^2}$$

Linia in cablu L6

$$l := 15 \text{ km}$$

Coefficientii Kennely

$$k_{zcablu1k} := \frac{\sinh\left(\frac{\sqrt{z_{cablu1k} \cdot y_{cablu1k}} \cdot l}{2}\right)}{\sqrt{z_{cablu1k} \cdot y_{cablu1k}} \cdot l} \quad k_{ycablu1k} := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{z_{cablu1k} \cdot y_{cablu1k}} \cdot l}{2}\right)}{\sqrt{z_{cablu1k} \cdot y_{cablu1k}} \cdot l}$$

$$Z_{cablu1k} := z_{cablu1k} \cdot l \cdot k_{zcablu1k} \quad Y_{cablu1k} := 2 \cdot y_{cablu1k} \cdot l \cdot k_{ycablu1k}$$

Consumatorul C6

$$P_{c1} := 2.5 \text{ MW} \quad Q_{c1} := 1.2 \text{ MVar}$$

$$\text{Model R/L} \quad R_{cons1} := \frac{20^2}{P_{c1}} \quad X_{cons1} := \frac{20^2}{Q_{c1}}$$

$$R_{cons2qk} := \frac{R_{cons1} \cdot (n_k)^2 \cdot X_{cons1} \cdot X_{cons1}}{R_{cons1}^2 + (n_k)^2 \cdot (X_{cons1} \cdot X_{cons1})} \quad X_{cons2qk} := \frac{R_{cons1} \cdot R_{cons1} \cdot n_k \cdot X_{cons1}}{R_{cons1} \cdot R_{cons1} + (n_k)^2 \cdot X_{cons1}^2}$$

$$Z_{cons2qk} := R_{cons2qk} + i \cdot X_{cons2qk}$$

Modelul 5

$$R_{aa2qk} := 0.1750.175 \left[1 + 0.2(n_k \cdot 50)^{0.5} \right] \quad X_{aa2qk} := \frac{R_{cons1}}{0.5} \cdot 0.175 n_k \left[2(n_k \cdot 50)^{-0.15} \right]$$

$$R_{ss2q} := \frac{R_{cons1}}{0.5} \quad X_{ss2qk} := \frac{Q_{c1}}{P_{c1}} \cdot n_k \cdot R_{ss2}$$

$$Z_{cons24qk} := \frac{R_{aa2qk} \cdot R_{ss2q} - X_{ss2qk} \cdot X_{aa2qk} + i \cdot (X_{aa2qk} \cdot R_{ss2q} + R_{aa2qk} \cdot X_{ss2qk})}{(R_{aa2qk} + R_{ss2q}) + i \cdot (X_{ss2qk} + X_{aa2qk})}$$

$$\text{Model rezistiv} \quad Z_{cons21qk} := (1.125 + 0.0879n_k) \cdot R_{cons1}$$

$$\text{cons CIGRE} \quad X_{p2qk} := n_k \cdot \frac{R_{cons1}}{6.7 \frac{Q_{c1}}{P_{c1}} - 0.74}$$

$$Z_{cons22qk} := \frac{R_{cons1} \cdot (X_{p2qk})^2}{R_{cons1}^2 + (X_{p2qk} + 0.073 R_{cons1} \cdot n_k)^2} + i \cdot \frac{R_{cons1}^2 \cdot X_{p2qk} + X_{p2qk} \cdot 0.073 R_{cons1} \cdot n_k \cdot (X_{p2qk} + 0.073 R_{cons1} \cdot n_k)}{R_{cons1}^2 + (X_{p2qk} + 0.073 R_{cons1} \cdot n_k)^2}$$

LEA prevazuta cu compensare

$$L := 25 \text{ km}$$

$$\text{Coefficienții Kennely} \quad k_z := \frac{\sinh\left(\frac{\sqrt{z_{l1k} \cdot y_{l1k}} \cdot L}{2}\right)}{\sqrt{z_{l1k} \cdot y_{l1k}} \cdot L} \quad k_y := \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{z_{l1k} \cdot y_{l1k}} \cdot L}{2}\right)}{\sqrt{z_{l1k} \cdot y_{l1k}} \cdot L}$$

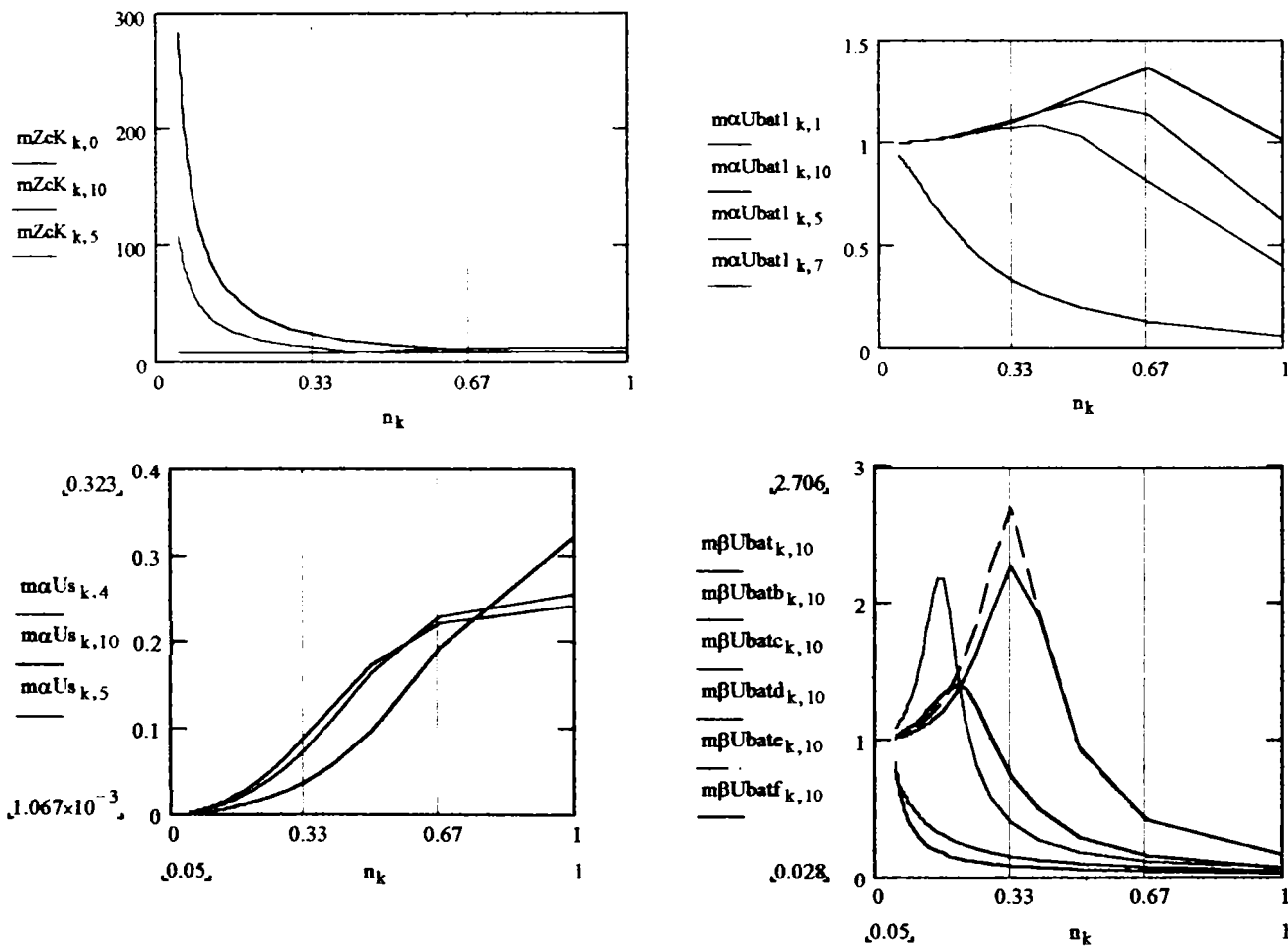
$$ZL_k := z11_k \cdot L \cdot kz_k \quad Yl_k := 2 \cdot y11_k \cdot L \cdot ky_k$$

Bateria de condensatoare serie

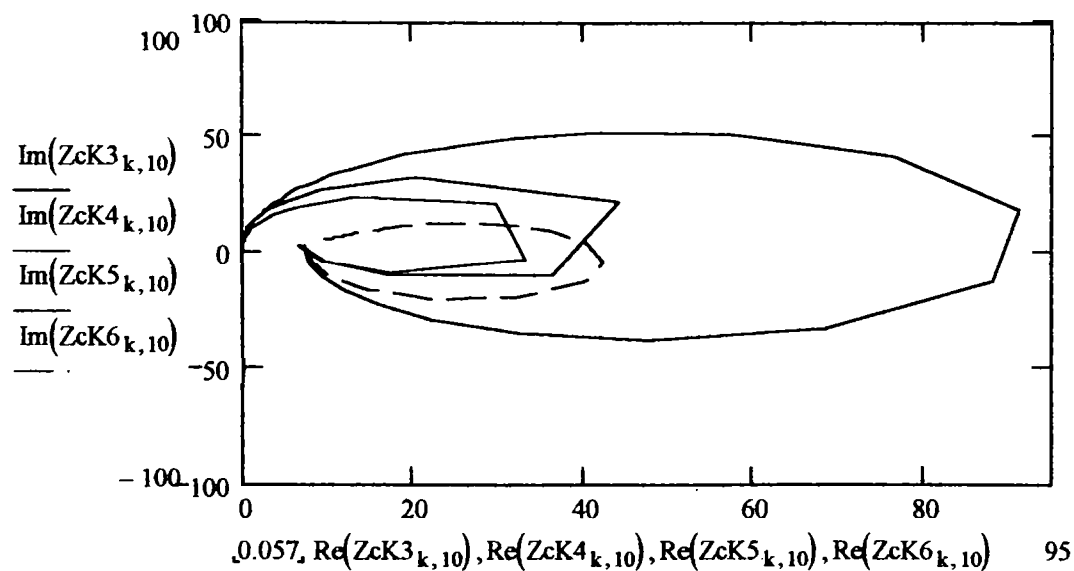
$$X_{comp_{k,t}} := \frac{(Xd11 \cdot L) \cdot tr_t}{n_k} \quad Z_{comp_{k,t}} := -i \cdot X_{comp_{k,t}}$$

Sistemul $X_{s_k} := \frac{2Z^2}{800} \cdot n_k \quad Z_{s_k} := i \cdot X_{s_k}$

Relațiile de calcul a impedanței armonice și ale coeficienților de transfer de curent și tensiune sunt aceleași ca în Anexa 2, doar că parametrii elementelor de rețea sunt la frecvențe subsincrone.

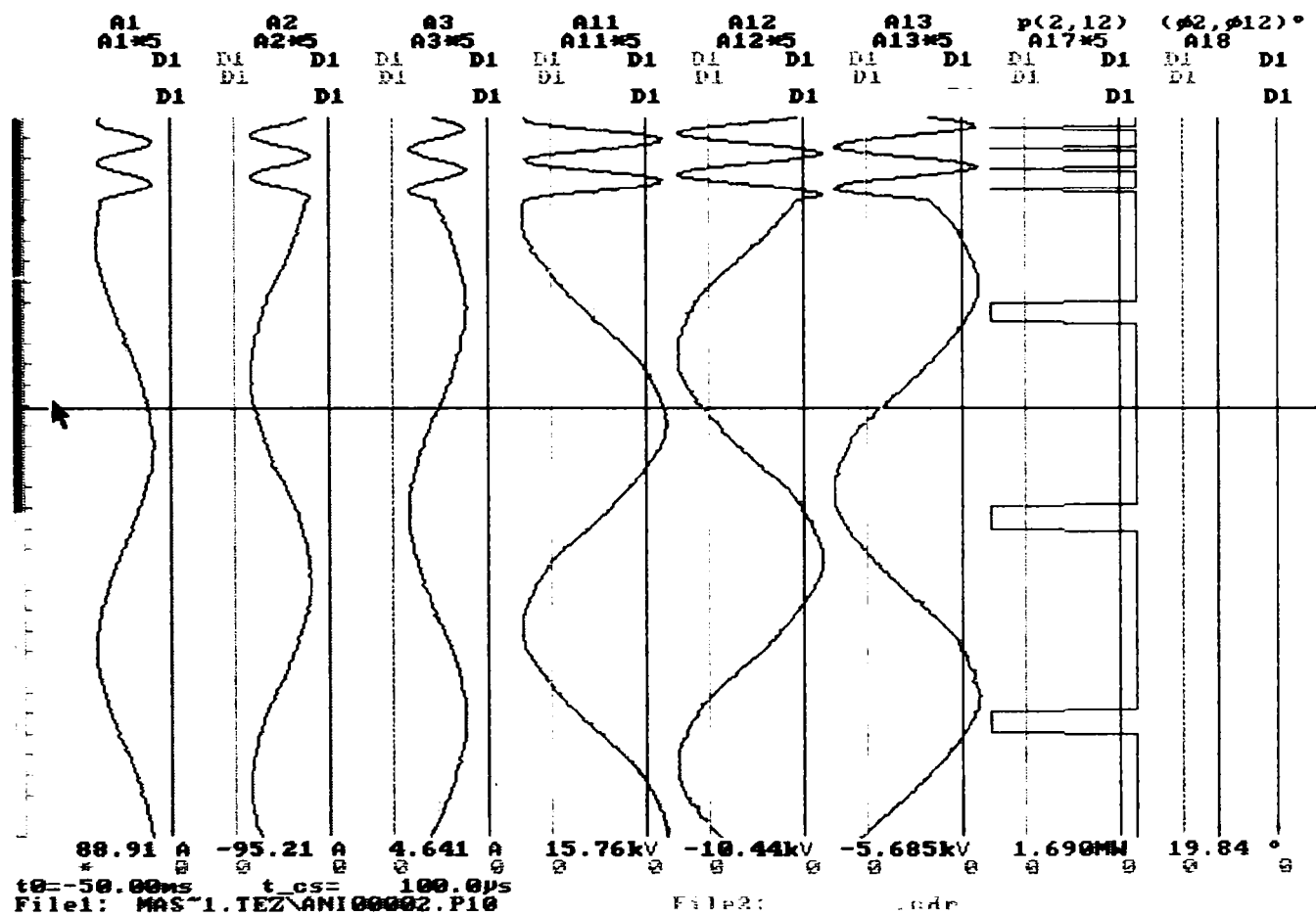


Locul geometric al impedanței armonice văzută de la bornele consumatorului deformant în funcție de modelul consumatorului linear este dată în figura:



Anexa 4

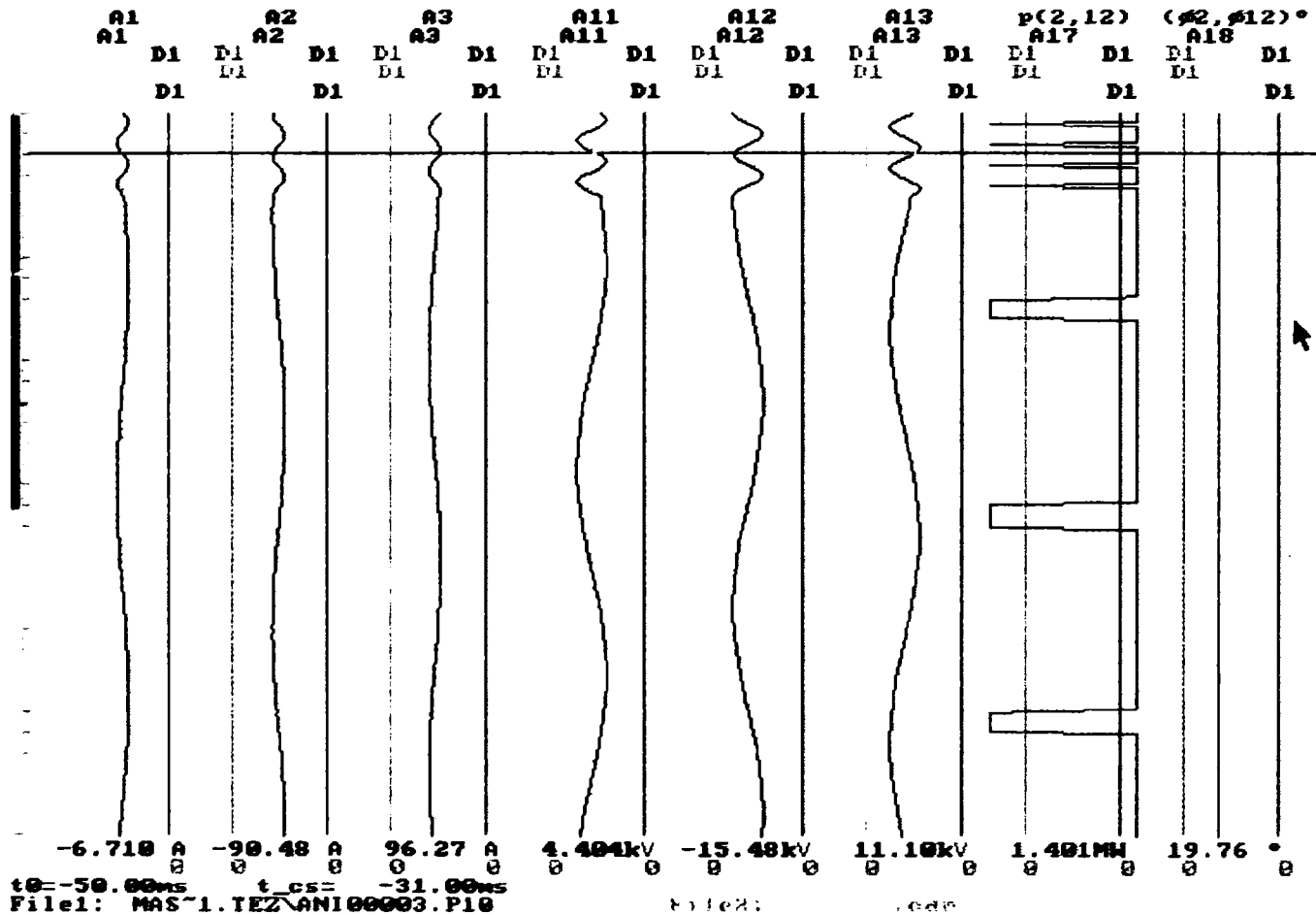
Înregistrările efectuate cu CDR 10ST pe LEA Urseni, la plecarea din stația Fratelia.
 Transformatorul din stație funcționează pe plotul 2 ce corespunde valorii procentuale +8x1,78% cu care s-a modificat numărul de spire al înfășurării. Tensiunea pe bara de MT este 19,7kV.



Ld	St	View	Cp	Get	Ev	He	Qt	Run	Zoom	F1	F2	↑↑	↑	↓	↓↓
----	----	------	----	-----	----	----	----	-----	------	----	----	----	---	---	----

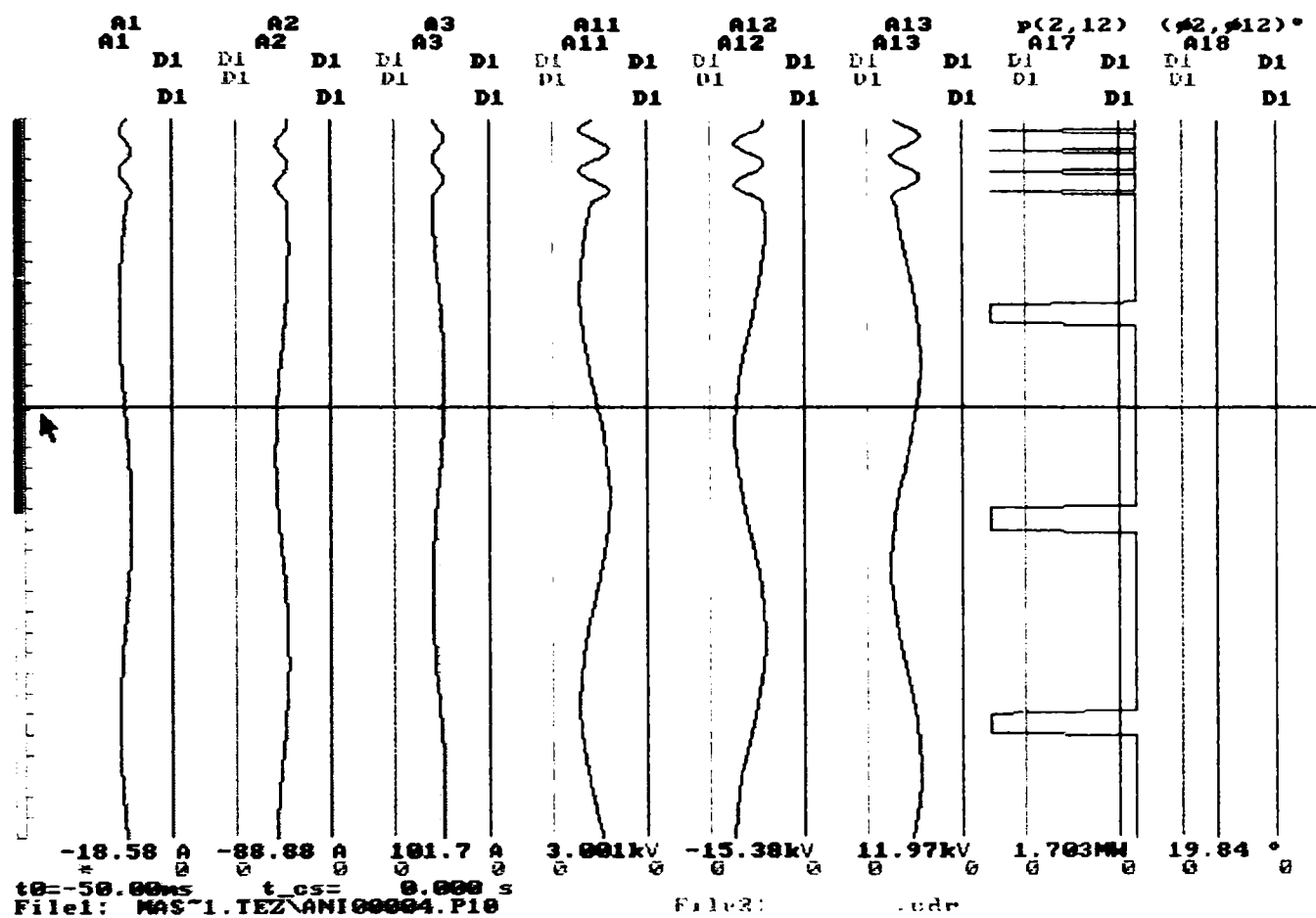
t_Loss	100.00	F1= 72.09	A1= 12.44	A2= 175.14	A3= 905.90	A4= 1									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 76.61	A1= 76.00	A2= 300.00	A3= 600.00	A4= 1.000									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 73.00	A1= 72.99	A2= 185.24	A3= 550.54	A4= 1.000									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 11.244	A1= 11.244	A2= 19.14	A3= 19.14	A4= 19.14									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 11.334	A1= 11.334	A2= 19.25	A3= 19.25	A4= 19.25									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 11.344	A1= 11.344	A2= 17.14	A3= 17.14	A4= 17.14									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 11.344	A1= 11.344	A2= 17.14	A3= 17.14	A4= 17.14									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
t_Loss	100.00	F1= 11.344	A1= 11.344	A2= 17.14	A3= 17.14	A4= 17.14									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns									

Transformatorul din stație funcționează pe plotul 3 ce corespunde valorii procentuale +7x1,78% cu care s-a modificat numărul de spire al înfășurării. Tensiunea pe bara de MT este 20,04kV.



Ld	st	Flow	Cp	Cet	Evn	Hc	Qt	Run	Zoon	F1	F2	tt	t	+	-	tt	
f_lost	0.000	EF= 75.00															
	nt= 200.0																
f_lost	0.000	EF= 73.40															
	nt= 200.0																
f_lost	0.000	EF= 75.45															
	nt= 200.0																
f_lost	0.000	EF= 11.30k															
	nt= 200.0																
f_lost	0.000	EF= 11.57k															
	nt= 200.0																
f_lost	0.000	EF= 11.49k															
	nt= 200.0																
f_lost	140.0m	EF= 1.077M															
	nt= 200.0																
f_lost	140.0m	EF= 320.0k															
	nt= 200.0																

Transformatorul din stație funcționează pe plotul 4, tensiunea pe bara de MT este 20,1kV.

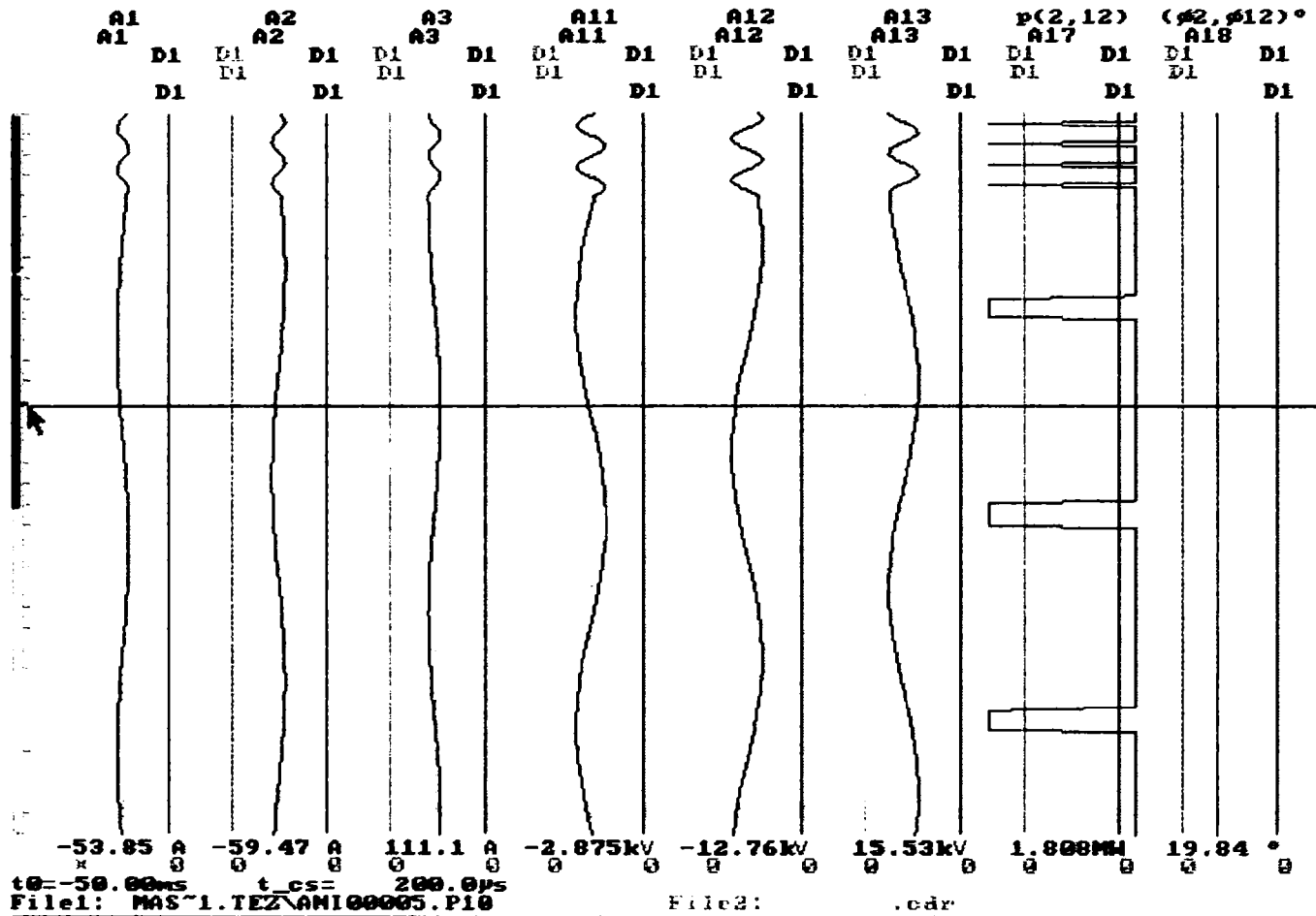


File:udr

Ld	St	Cp	Cap	Eun	Hc	Qt	Run	Zoom	F2	Zoom	↑↑	↑	↓	↓↓
----	----	----	-----	-----	----	----	-----	------	----	------	----	---	---	----

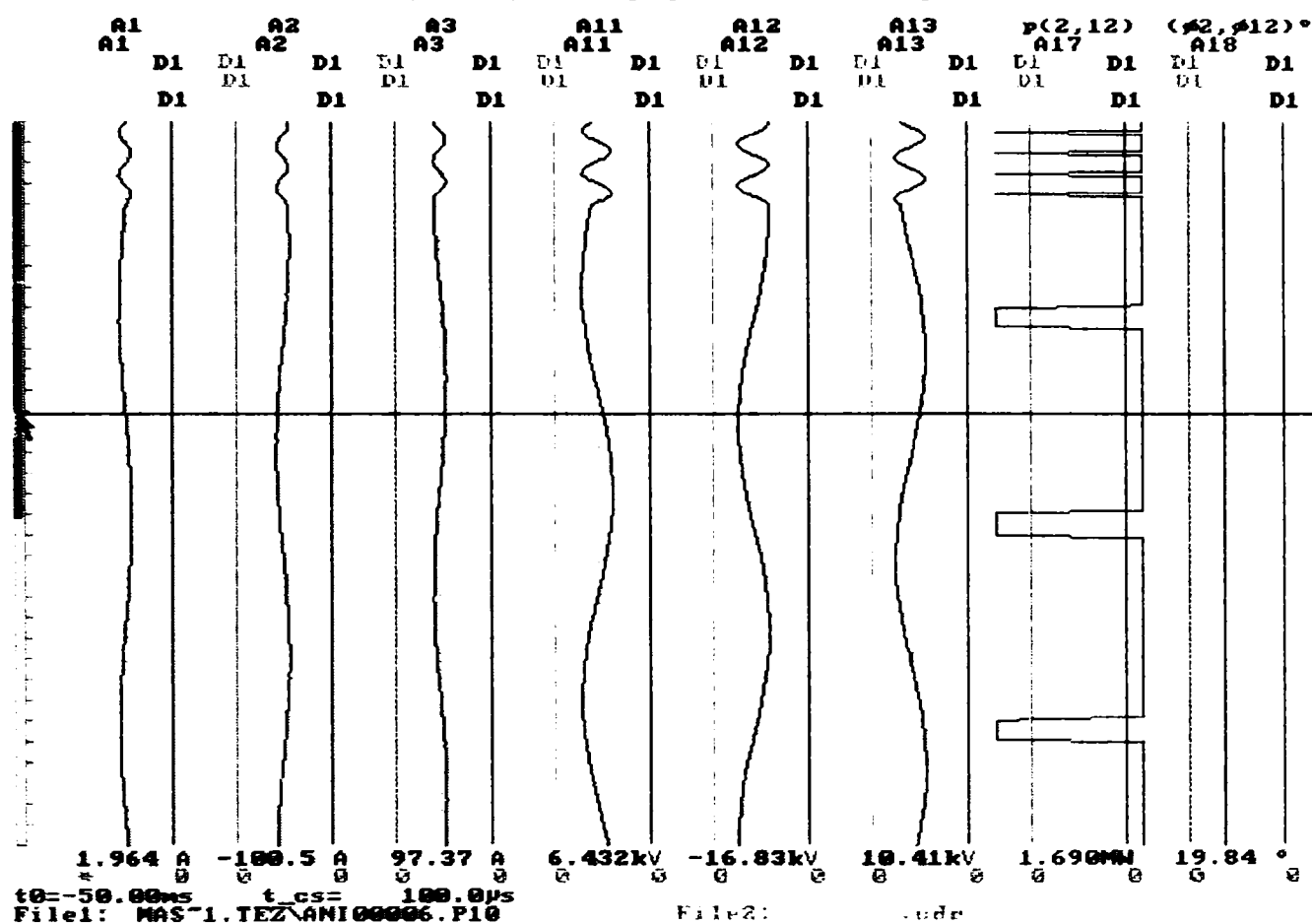
t_pos = 0.000	Ef = 75.93	A1 = 75.94	A2 = 410.7M	A3 = 1.001	A4 = 100
t = 20.00M	n = 200.0				
t_pos = 0.000	Ef = 80.56	A1 = 80.51	A2 = 58.27M	A3 = 766.9M	A4 = 1.001
t = 20.00M	n = 200.0				
t_pos = 0.000	Ef = 77.67	A1 = 77.63	A2 = 92.27M	A3 = 761.9M	A4 = 1.001
t = 20.00M	n = 200.0				
t_pos = 0.000	Ef = 11.49M	A1 = 11.49M	A2 = 22.44	A3 = 92	A4 = 204
t = 20.00M	n = 200.0				
t_pos = 0.000	Ef = 11.74M	A1 = 11.74M	A2 = 16.23	A3 = 35.34	A4 = 281.2
t = 20.00M	n = 200.0				
t_pos = 0.000	Ef = 11.64M	A1 = 11.64M	A2 = 15.22	A3 = 51.02	A4 = 279.7
t = 20.00M	n = 200.0				
t_pos = 140.0M	Ef = 1.077M	A1 = 16.54M	A2 = 640.9M	A3 = 2.120M	A4 = 696.3
t = 20.00M	n = 300.0				
t_pos = 140.0M	Ef = 325.0M	A1 = 400.5M	A2 = 356.6M	A3 = 154.8M	A4 = 5.040M
t = 20.00M	n = 200.0				

Transformatorul din stație funcționează pe plotul 5, tensiunea pe bara de MT este 20,2kV.



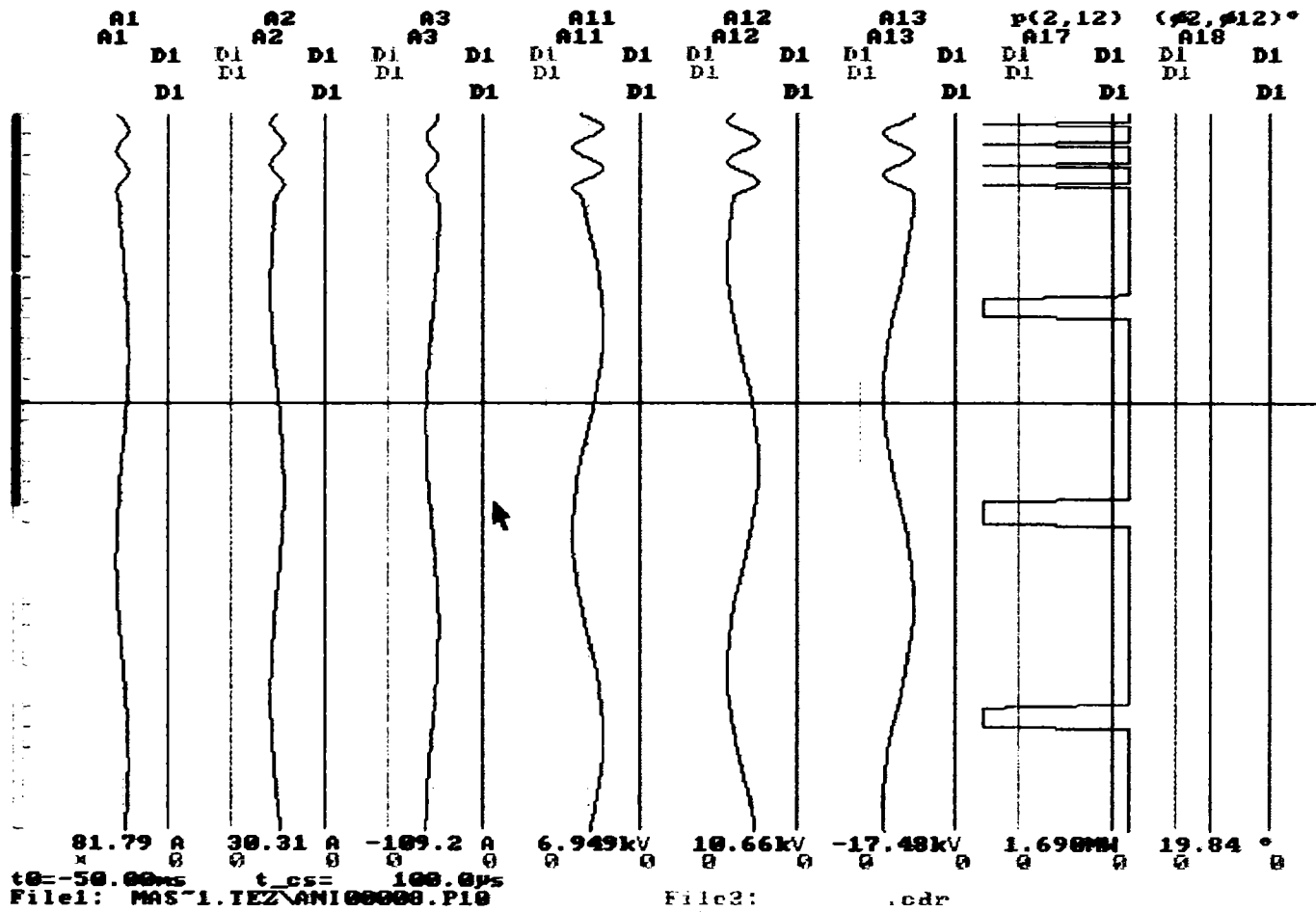
Ld	st	W	Cp	Cet	Eva	Hc	Qt	Run	Zoom	F2	↑↑	↑	↓	↓↓
t_osc	200.00p	EF= 77.00	A1= 77.26	A2= 361.7M	A3= 1.873	A5= 1.161								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	200.00p	EF= 81.50	A1= 81.54	A2= 603.0M	A3= 576.7M	A5= 1.593								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	200.00p	EF= 78.29	A1= 78.26	A2= 525.2M	A3= 961.9M	A5= 1.254								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	200.00p	EF= 11.67k	A1= 11.66k	A2= 18.7M	A3= 34.73	A5= 361.3								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	200.00p	EF= 11.86k	A1= 11.85k	A2= 24.67	A3= 33.93	A5= 307.4								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	200.00p	EF= 11.81k	A1= 11.80k	A2= 26.73	A3= 21.94	A5= 362.4								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	142.0M	EF= 1.077M	A1= 16.54k	A2= 640.9k	A3= 2.126k	A5= 696.3								
t	20.00n	n= 200.0												
t_osc	142.0M	EF= 325.3k	A1= 460.5p	A2= 356.6p	A3= 154.8p	A5= 5.040p								
t	20.00n	n= 200.0												

Transformatorul din stație funcționează pe plotul 6, tensiunea pe bara de MT este 20,5kV.



Ld	St	Am	Cp	Cat	Evn	He	Qt	Run	Zoom	F2	tt	t	↓	↑
t_cs=	100.0µs	EF=	77.91	A1=	70.95	A2=	220.2m	A3=	1.000	A5=	1.011			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	100.0µs	EF=	92.50	A1=	80.40	A2=	441.0m	A3=	640.4m	A5=	1.54V			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	100.0µs	EF=	70.01	A1=	70.96	A2=	310.4m	A3=	1.100	A5=	1.070			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	100.0µs	EF=	11.05k	A1=	11.05k	A2=	0.000	A3=	14.40	A5=	200.0			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	100.0µs	EF=	12.06k	A1=	12.06k	A2=	15.53	A3=	13.90	A5=	200.0			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	100.0µs	EF=	12.00k	A1=	11.99k	A2=	16.57	A3=	44.24	A5=	200.0			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	141.0m	EF=	1.077M	A1=	16.54k	A2=	640.9k	A3=	2.126k	A5=	590.0			
t	20.00m	n=	200.0											
t_cs=	241.0m	EF=	320.0m	A1=	400.0µs	A2=	306.6µs	A3=	104.8µs	A5=	0.0000			
t	20.00m	n=	200.0											

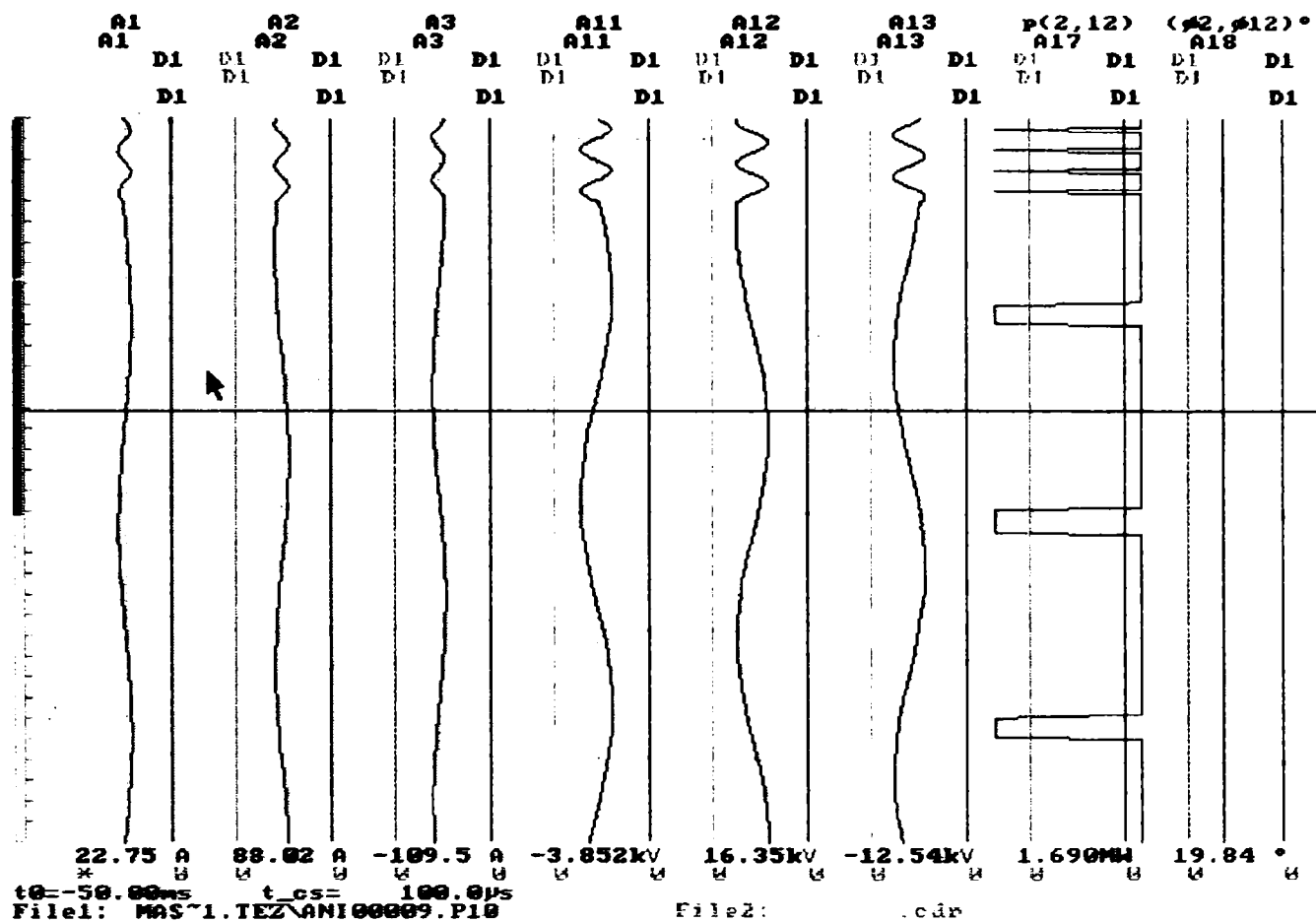
Transformatorul din stație funcționează pe plotul 7, tensiunea pe bara de MT este 20,9kV.



Ld St Cp Cgt Evm Hs Qt Run Zoom F2
 [Icons for simulation control: Run, Stop, Pause, etc.]

f _{loss} = 100.0p	EF = 78.43	A1 = 78.44	A2 = 437.4k	A3 = 1.194	A5 = 1.307
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 100.0p	EF = 84.13	A1 = 84.67	A2 = 219.4k	A3 = 771.8k	A5 = 1.770
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 100.0p	EF = 88.90	A1 = 88.84	A2 = 174.2k	A3 = 931.7k	A5 = 1.775
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 100.0p	EF = 12.05k	A1 = 12.05k	A2 = 1.898	A3 = 27.76	A5 = 311.2
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 100.0p	EF = 12.24k	A1 = 12.23k	A2 = 32.26	A3 = 8.417	A5 = 331.6
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 100.0p	EF = 12.17k	A1 = 12.16k	A2 = 28.28	A3 = 20.60	A5 = 330.2
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 141.0k	EF = 1.077M	A1 = 16.54k	A2 = 640.9k	A3 = 2.126k	A5 = 696.3
t = 20.00ms	n = 200.0				
f _{loss} = 141.0k	EF = 325.8k	A1 = 488.5p	A2 = 356.6p	A3 = 154.8p	A5 = 5.040p
t = 20.00ms	n = 200.0				

Transformatorul din stație funcționează pe plotul 8, tensiunea pe bara de MT este 21,2kV.

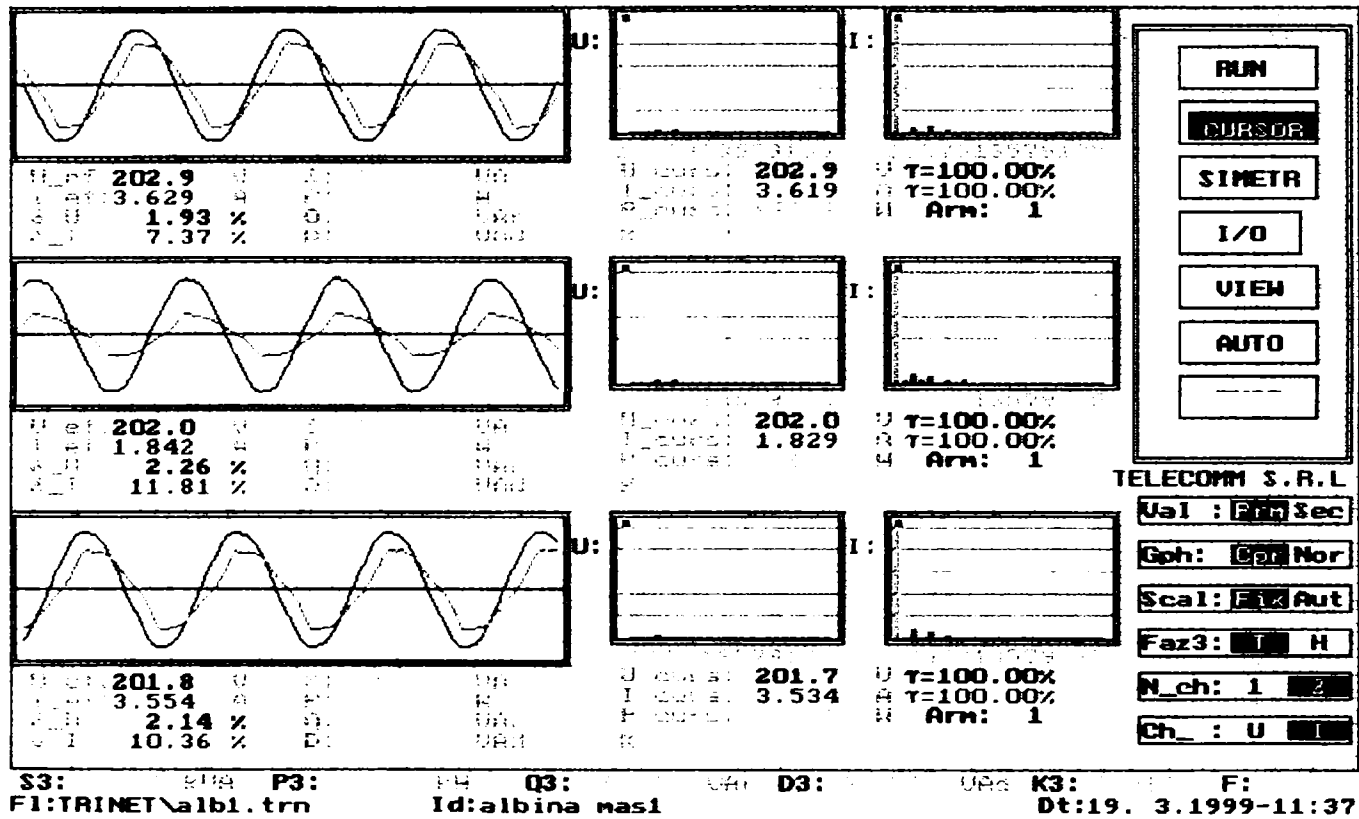


Ld St Run Cp Gct Evn Hc Qt Run Zoom F2 ZOOM:1
 ↑↑ ↑ ↓ ↓↓

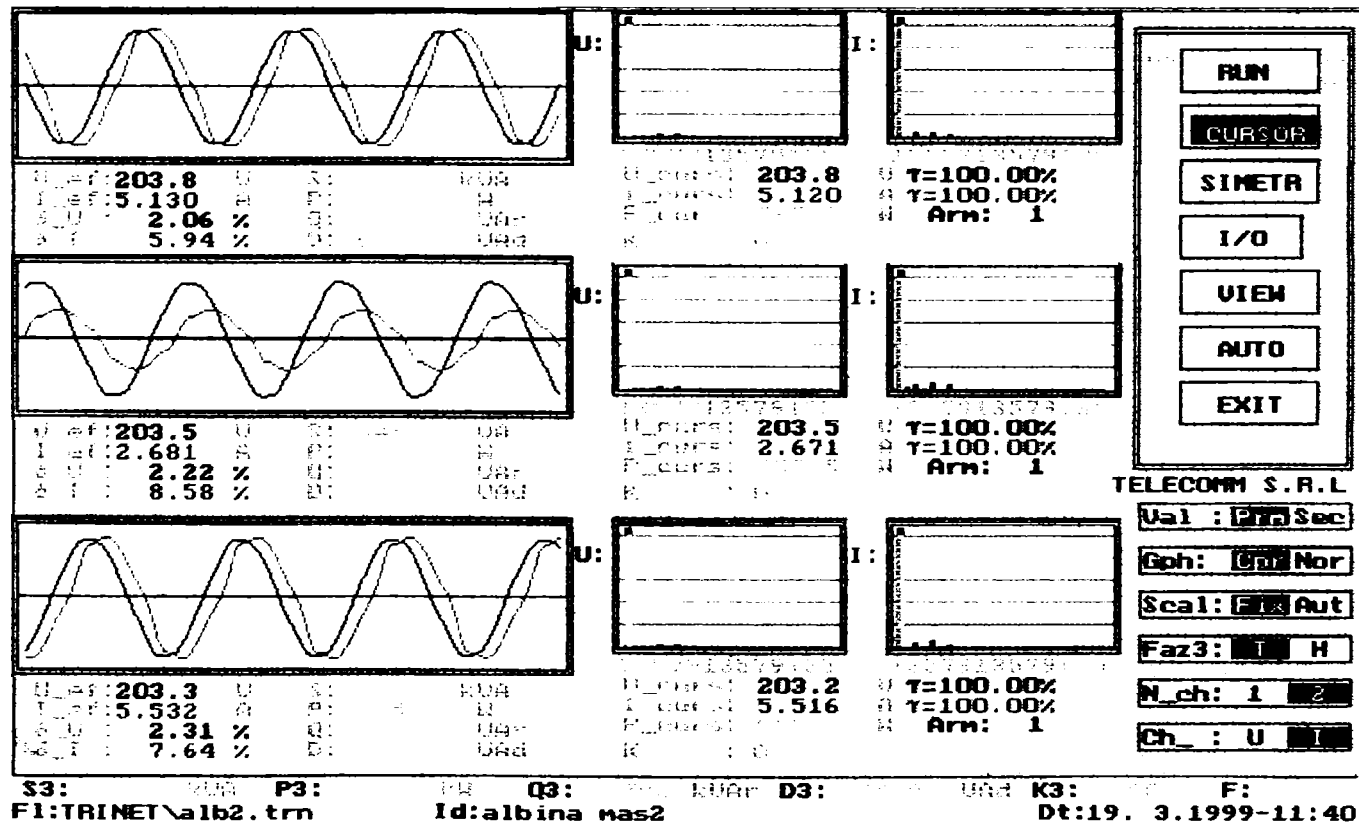
t_cs = 100.0μs	Ef = 80.99	A1 = 80.99	A2 = 612.7m	A3 = 1.016	A5 = 1.033
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 100.0μs	Ef = 95.50	A1 = 95.47	A2 = 170.0m	A3 = 0.121m	A5 = 2.180
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 100.0μs	Ef = 91.84	A1 = 91.70	A2 = 211.5m	A3 = 901.0m	A5 = 2.120
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 100.0μs	Ef = 12.21k	A1 = 12.21k	A2 = 10.35	A3 = 21.65	A5 = 307.3
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 100.0μs	Ef = 12.41k	A1 = 12.40k	A2 = 23.56	A3 = 66.80	A5 = 340.4
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 100.0μs	Ef = 12.31k	A1 = 12.30k	A2 = 29.17	A3 = 49.00	A5 = 325.5
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 141.0m	Ef = 1.077k	A1 = 16.54k	A2 = 640.9k	A3 = 0.128k	A5 = 696.3
t = 20.00m	n = 200.0				
t_cs = 141.0m	Ef = 320.8k	A1 = 414.0μ	A2 = 356.6μ	A3 = 104.8μ	A5 = 0.449μ
t = 20.00m	n = 200.0				

Înregistrări efectuate cu TRINET-ul în postul de transformare ALBINA.

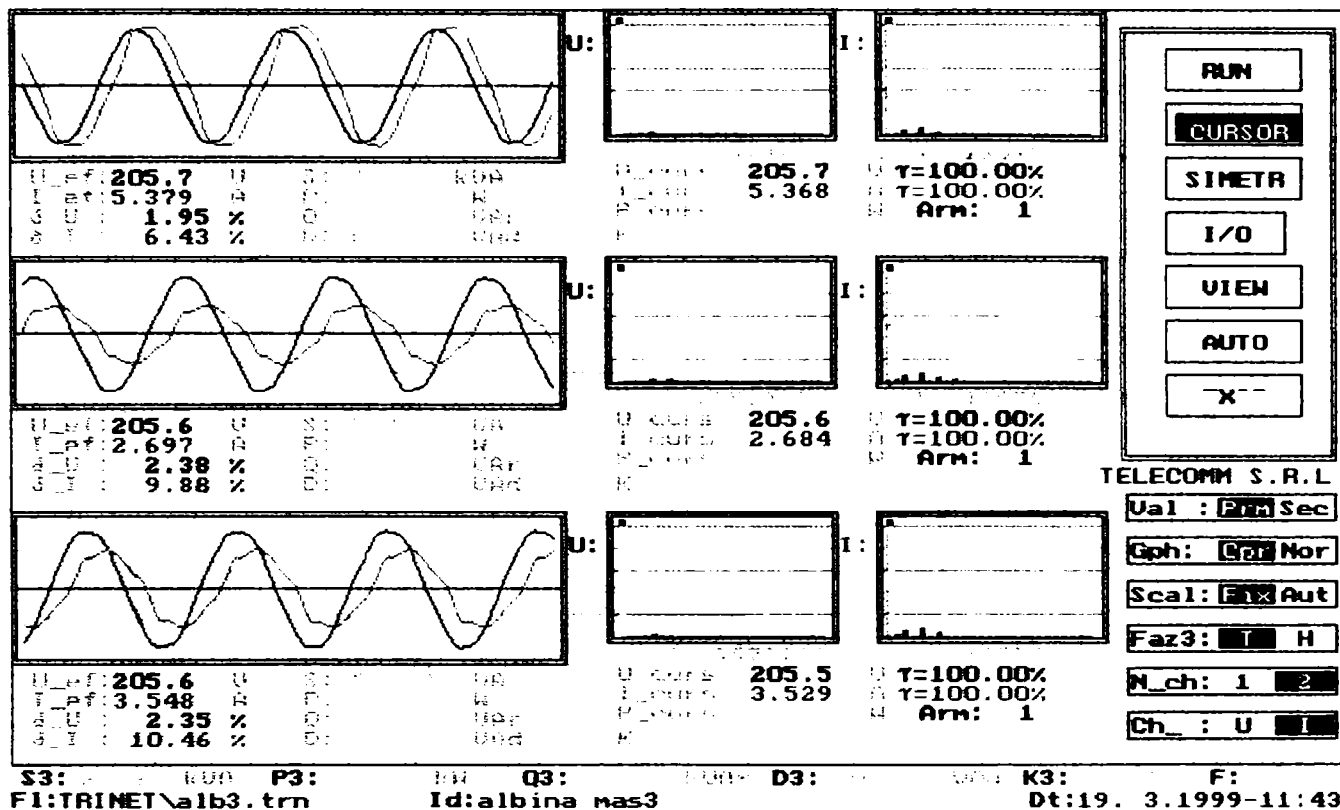
Tensiunea pe bara de MT este 19,7kV.



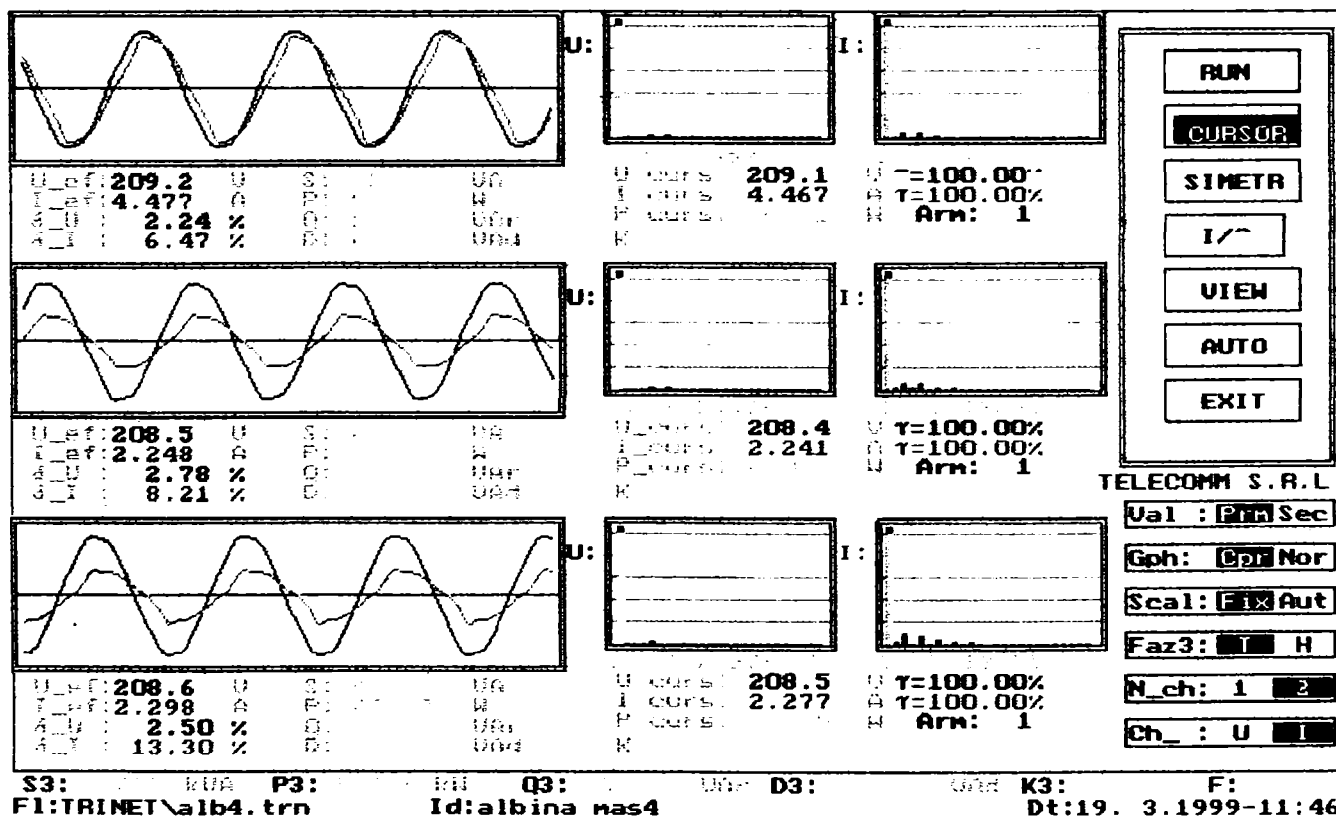
Tensiunea pe bara de MT este 20,04kV.



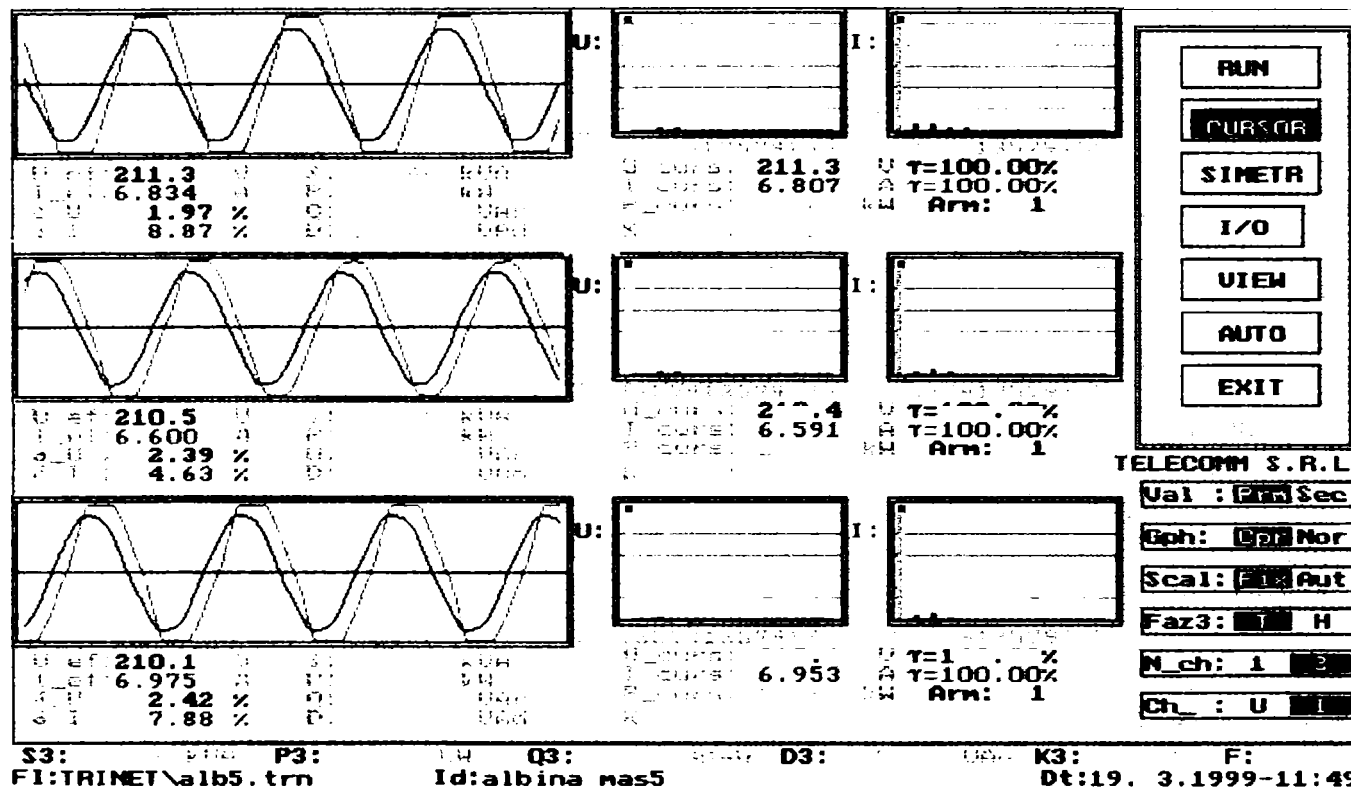
Tensiunea pe bara de MT este 20,1kV.



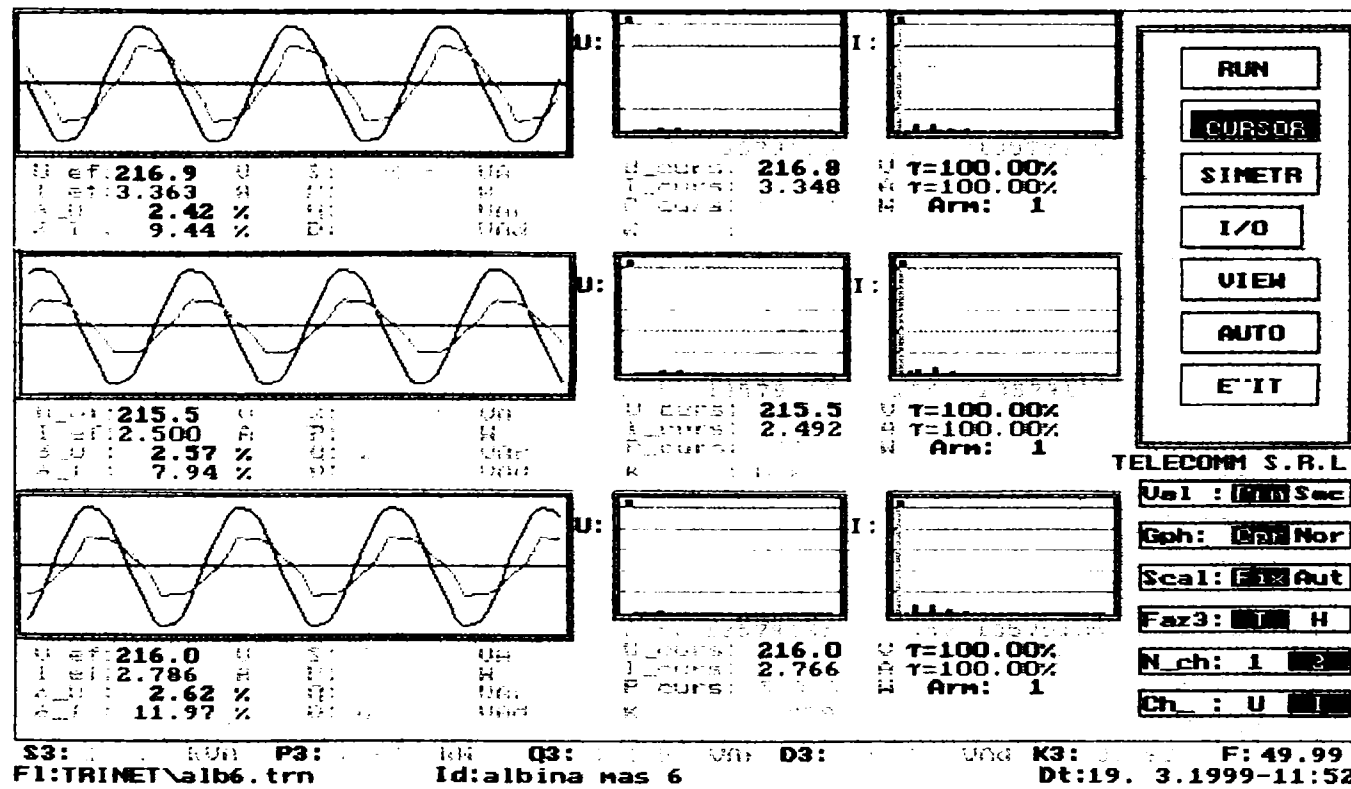
Tensiunea pe bara de MT este 20,2kV.



Tensiunea pe bara de MT este 20,5kV.

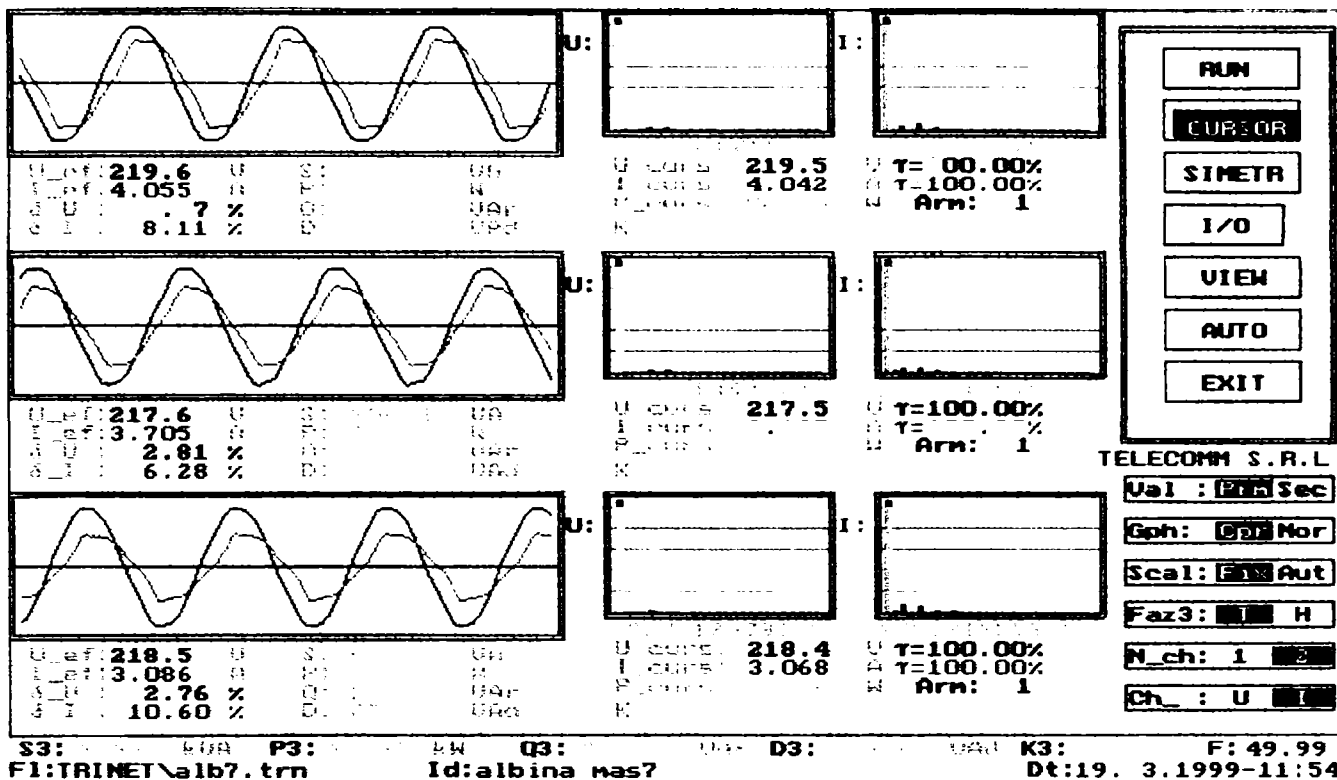


Tensiunea pe bara de MT este 20,9kV.



UN	U	A	UN	U	B	U
UN	U	A	UN	U	A	U
UN	U	A	UN	U	A	U
	U	A		U	A	U
	U	A		U	A	U

Tensiunea pe bara de MT este 21,2kV.



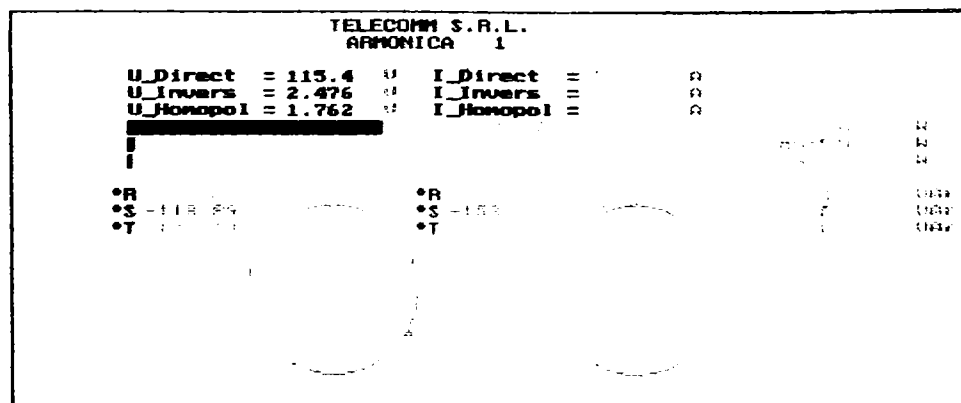
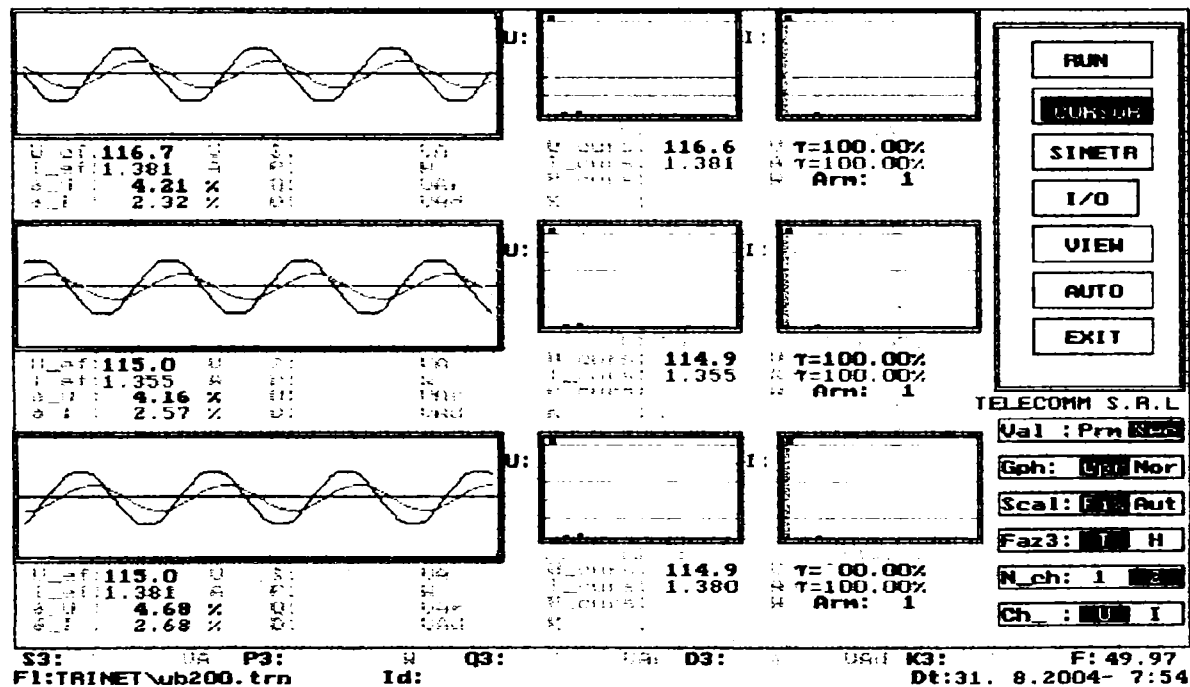
Anexa 5

Măsurători efectuate în laborator pe model

5.1. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la începutul liniei, respectiv la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 1,05$ și $Kc = 2,1$. (Consumatorul modelat absoarbe o putere de $657VA_{model}$ la $\cos\phi=0,84$).

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei



Coef. nesim. inversa:	kn2(0) = 0.021	kn2(1) = 0.025
Coef. nesim. homopol:	kn2(0) = 0.015	kn2(1) = 0.013
Coef. total de nesim:	kn2(0) = 0.037	kn2(1) = 0.038
Raport de asimetrie:	kn2(0) = 0.99	kn2(1) = 0.98
Dez. dif. de nesim:	kn2(0) = -0.015	kn2(1) = 0.019

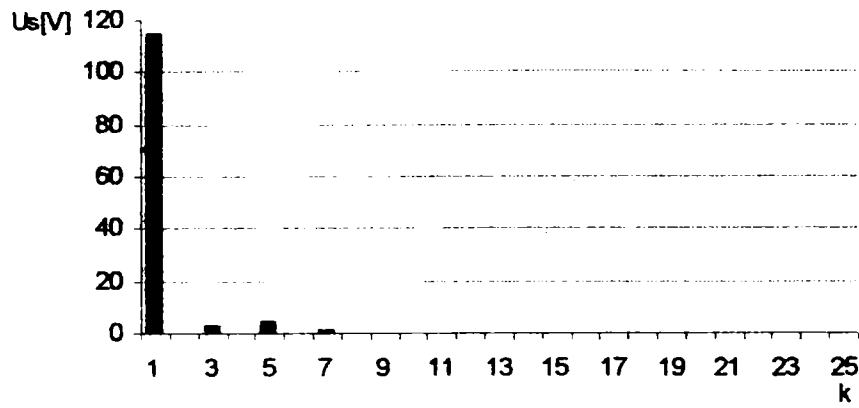


Fig.1 Spectrul armoniilor de tensiune pe faza S la începutul liniei

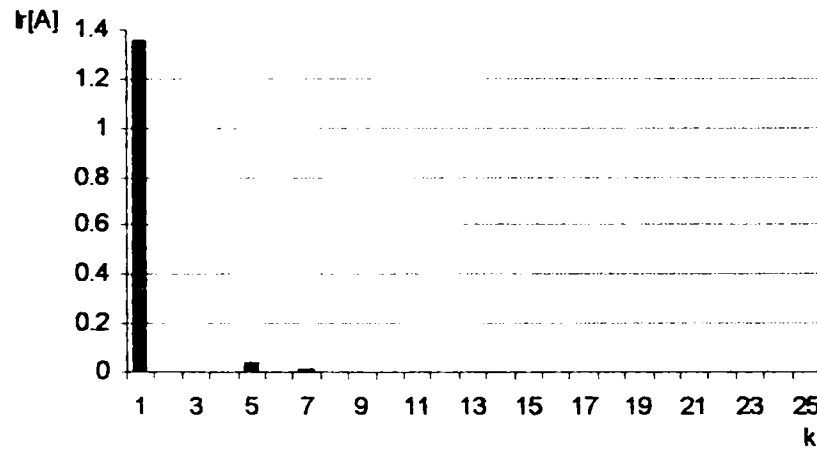


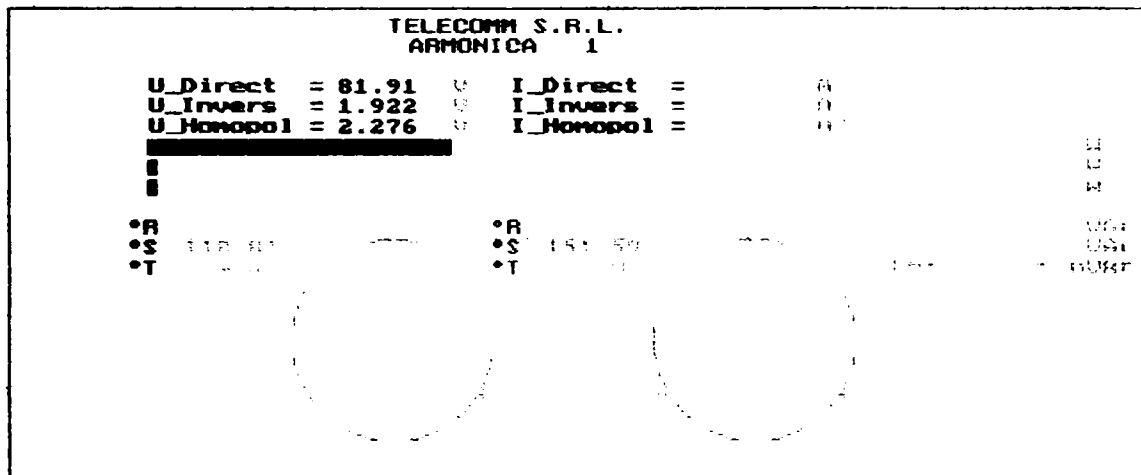
Fig.2 Spectrul armoniilor de curent pe faza S la începutul liniei

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

 U1: $U_{eff}: 81.57$ V $S: 0.99$ $U_{max}: 1.376$ A $I_{eff}: 4.36$ % $I_{max}: 2.43$ %	 I1: $U_{eff}: 1.375$ A $T: 00.00\%$ $T: 100.00\%$ $Arm: 1$	RUN CURSOR SIMETR I/O VIEW AUTO EXIT TELECOMM S.R.L. Ua1: Prm Gph: Off Nor Scal: Off Aut Faz3: H N_ch: 1 2 Ch: U I
 U2: $U_{eff}: 82.25$ V $S: 0.99$ $U_{max}: 1.352$ A $I_{eff}: 4.40$ % $I_{max}: 2.72$ %	 I2: $U_{eff}: 82.16$ V $T: 100.00\%$ $T: 100.00\%$ $Arm: 1$	
 U3: $U_{eff}: 82.38$ V $S: 0.99$ $U_{max}: 1.378$ A $I_{eff}: 5.43$ % $I_{max}: 2.87$ %	 I3: $U_{eff}: 82.25$ V $T: 100.00\%$ $T: 100.00\%$ $Arm: 1$	
S3: UA P3: U Q3: UA1 K3: F: 49.98 FI: TRINET\c200.trn Id: Dt: 31. 8.2004- 7:52		

U1100
 (Q110)
 (D110)
 (R110)
 (S110)

U1100 110.00 V
 I1100 1.00 A
 U1100 110.00 V
 I1100 1.00 A



Coef. nesim. inversa: kns2(U) = 0.023 kns2(I) = 0.025
 Coef. nesim. homop.: kns0(U) = 0.028 kns0(I) = 0.013
 Coef. total de nesim: kns(T) = 0.051 kns(C) = 0.039
 Raport de nesim (I) : kns(I) = 0.99 kns(C) = 0.98
 Rap. dif. de nesim.: knsd(I) = 9.4 knsd(I) = 0.019

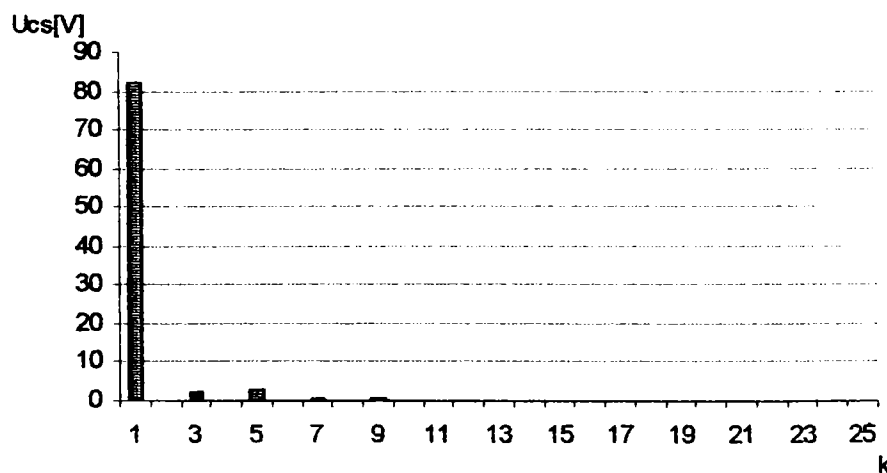


Fig.3 Spectrul armoniilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

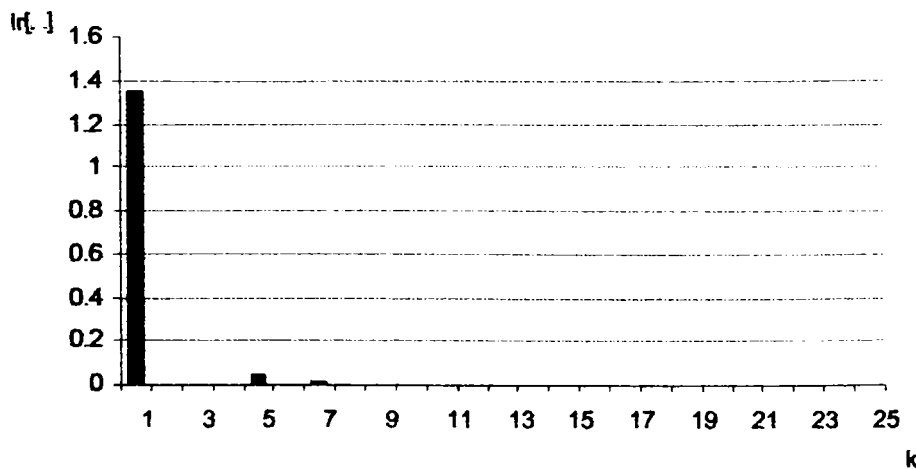
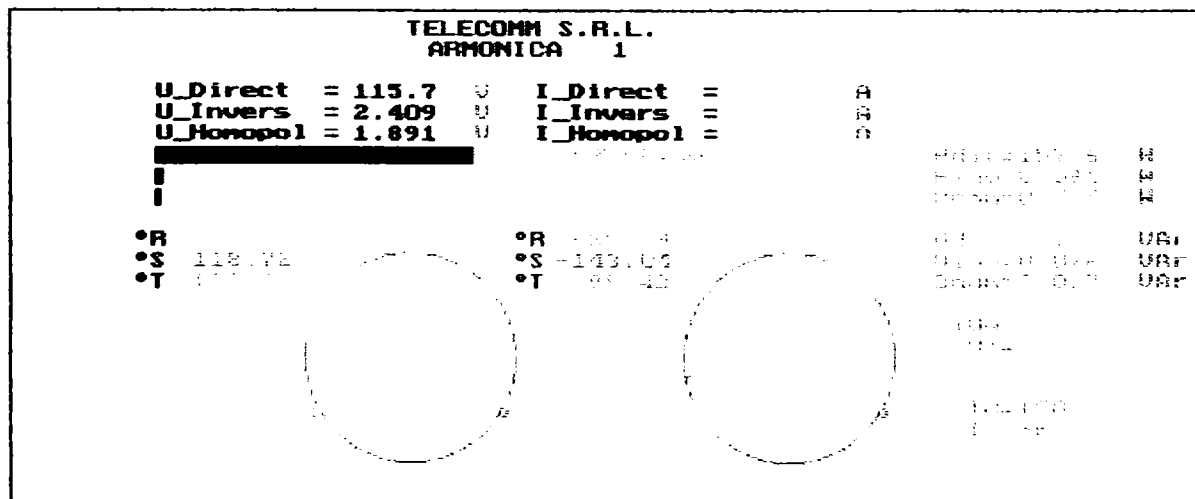
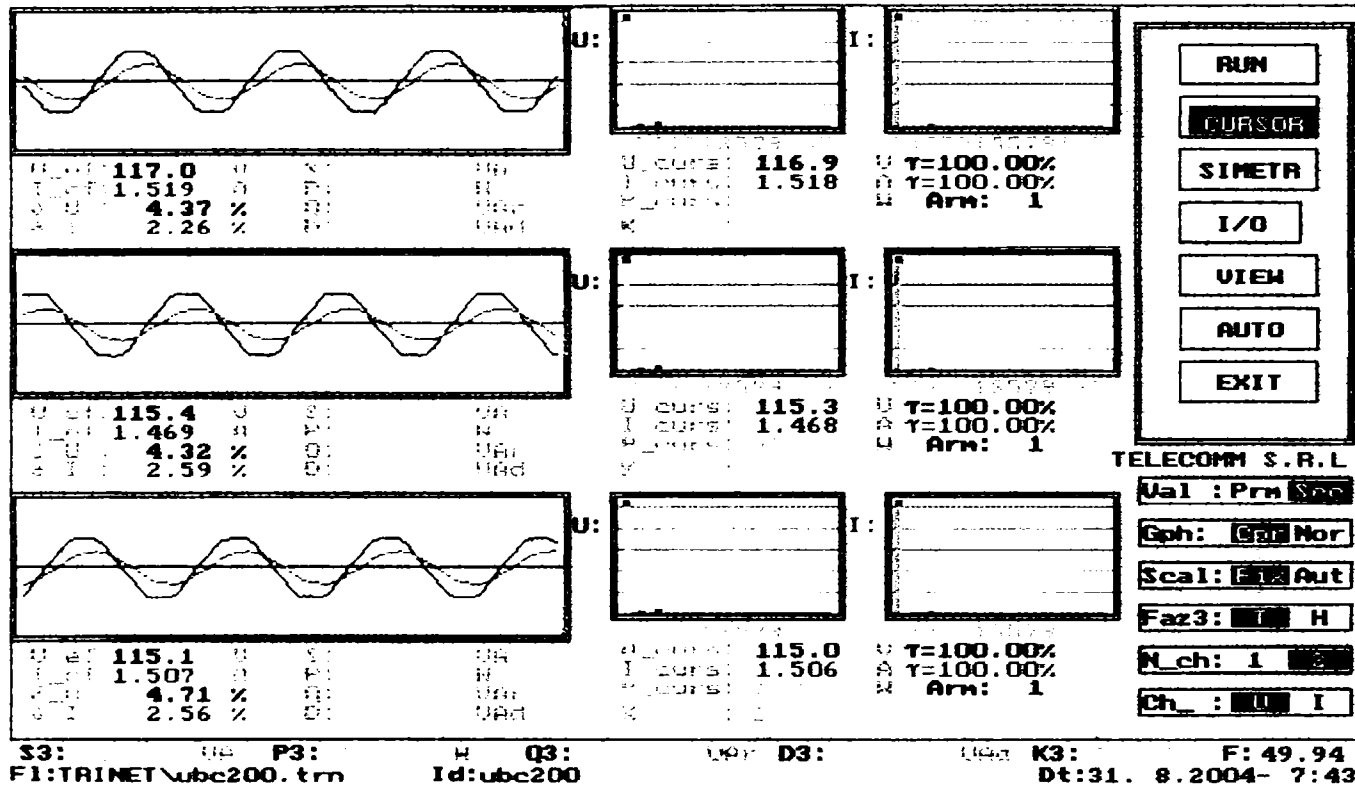


Fig.4 Spectrul armoniilor de curent pe faza S la bornele consumatorului

b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 1,05$.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.



Coef. nesim. inversa:	Kns2(U) = 0.021	Kns2(I) = 0.033
Coef. nesim. directa:	Kns1(U) = 0.016	Kns1(I) = 0.013
Coef. total de nesim:	Kns(U) = 0.037	Kns(I) = 0.046
Raport de nesimetrie:	ms(U) = 0.98	ms(I) = 0.97
Rap. dif. de nesim.:	Knsd(U) = 0.017	Knsd(I) = 0.033

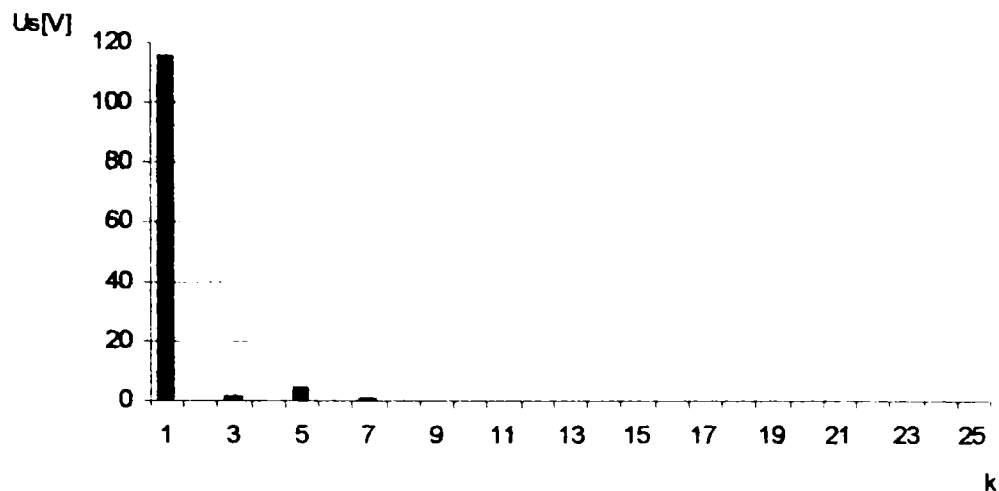


Fig.5 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la începutul liniei

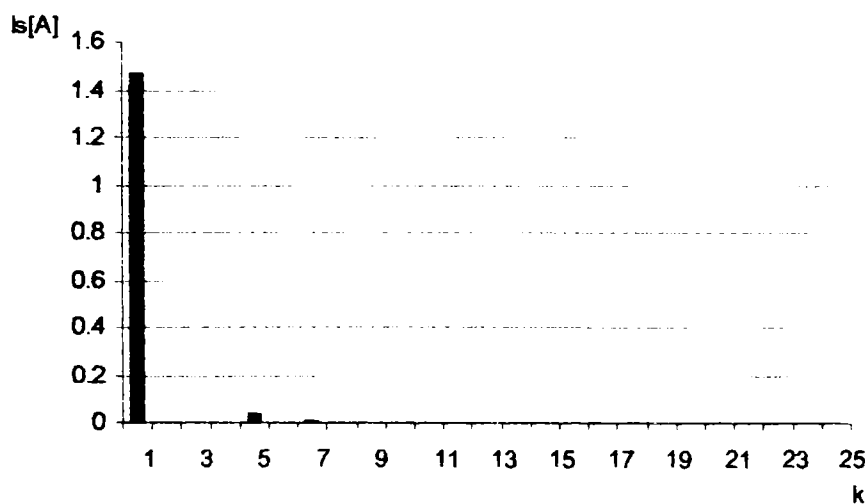


Fig.6 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la începutul liniei

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

TELECOMM S.R.L.

U₁: 89.27 V, I₁: 1.513 A, T=100.00%, Arm: 1

U₂: 88.70 V, I₂: 1.463 A, T=100.00%, Arm: 1

U₃: 89.92 V, I₃: 1.503 A, T=100.00%, Arm: 1

U₁: 89.18 V, I₁: 1.513 A, T=100.00%, Arm: 1

U₂: 88.61 V, I₂: 1.462 A, T=100.00%, Arm: 1

U₃: 89.82 V, I₃: 1.502 A, T=100.00%, Arm: 1

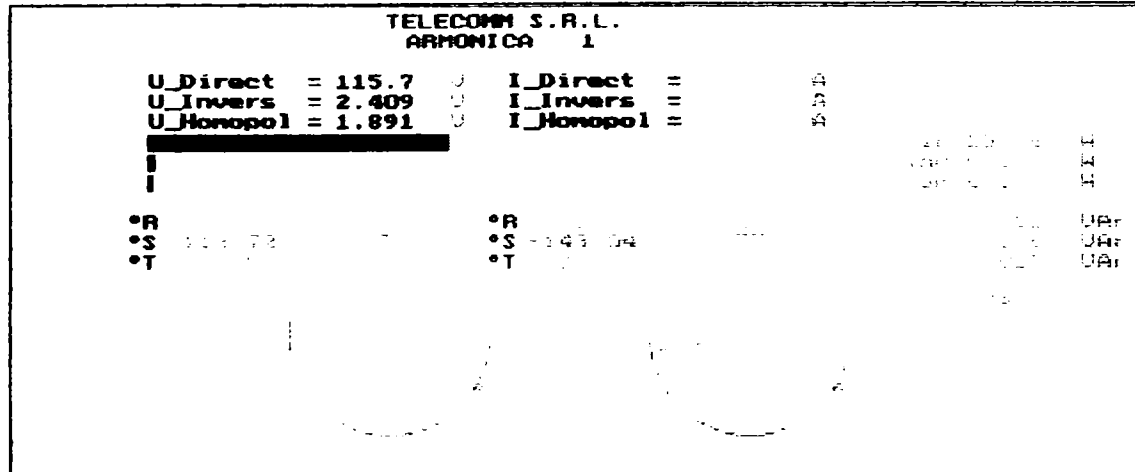
S3: U₁ P3: H Q3: U₁ D3: U₁ K3: F: 50.00
 F1:TRINET\ucc200.trn Id: Dt:31. 8.2004- 7:46

CP1 (A)
 CP1 (B)
 CP1 (C)
 CP1 (D)
 CP1 (E)

15
 15

15
 15

15
 15



coef. de la inversa:
 coef. de la homopol:
 coef. total de la inversa:
 coef. de la homopol:
 coef. de la inversa:

kn2(I) = 0.021
 kn3(I) = 0.016
 kn4(I) = 0.037
 kn5(I) = 0.98
 kn6(I) = -0.017

kn2(I) = 0.033
 kn3(I) = 0.013
 kn4(I) = 0.046
 kn5(I) = 0.97
 kn6(I) = 0.033

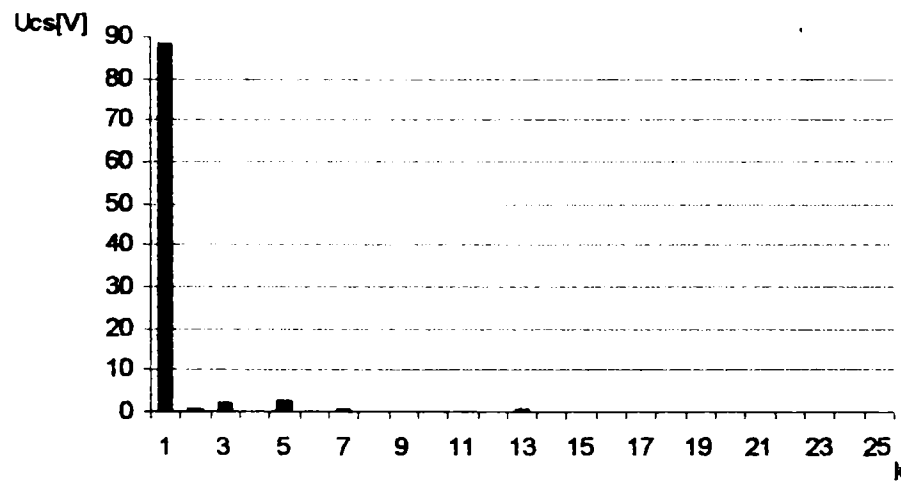


Fig.7 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

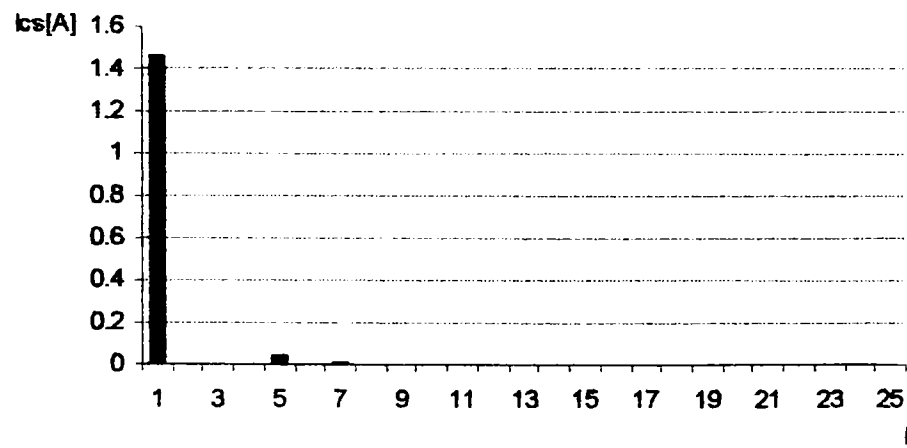
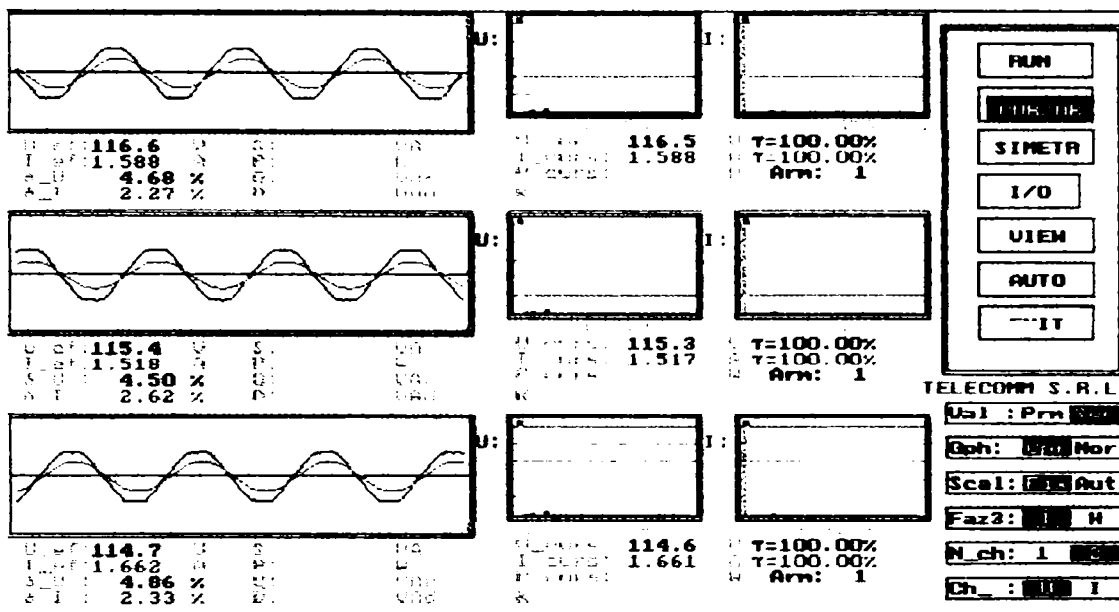


Fig.8 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

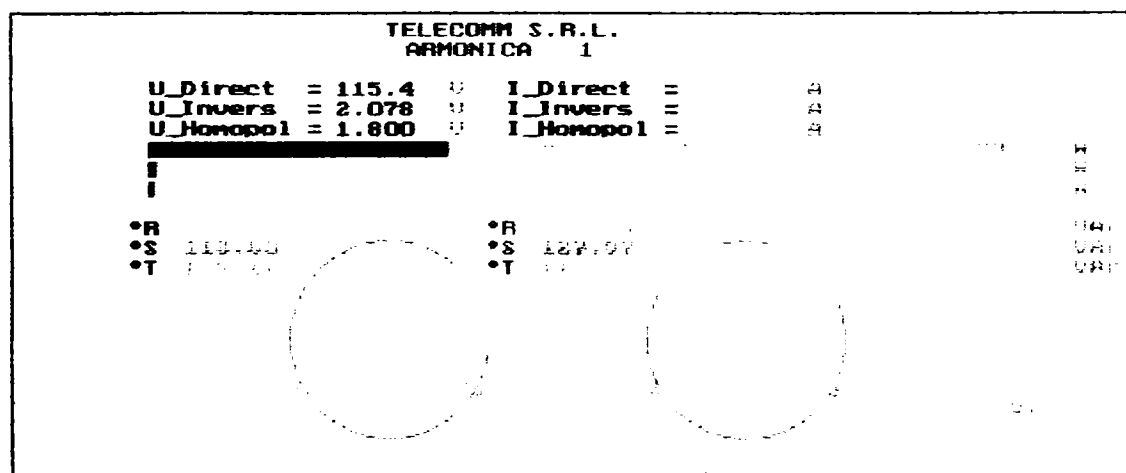
c) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.



S3:	UR	P3:	K	Q3:	UR	D3:	Q3	K3:	F:
F1:TRINET\ubc1200.trn									49.97
									Dt:31. 8.2004- 8:44

00100
00100
00100
00100
00100



Coeff. nesim. inversat:	kn2(U) = 0.018	kn2(I) = 0.065
Coeff. nesim. homop. :	kn2(U) = 0.016	kn2(I) = 0.014
Coeff. total de nesim:	kn(U) = 0.034	kn(I) = 0.078
Raport de nesimetrie:	kn(U) = 0.98	kn(I) = 0.91
Rap. dif. de nesim. :	kn2(U) = 0.016	kn2(I) = 0.091

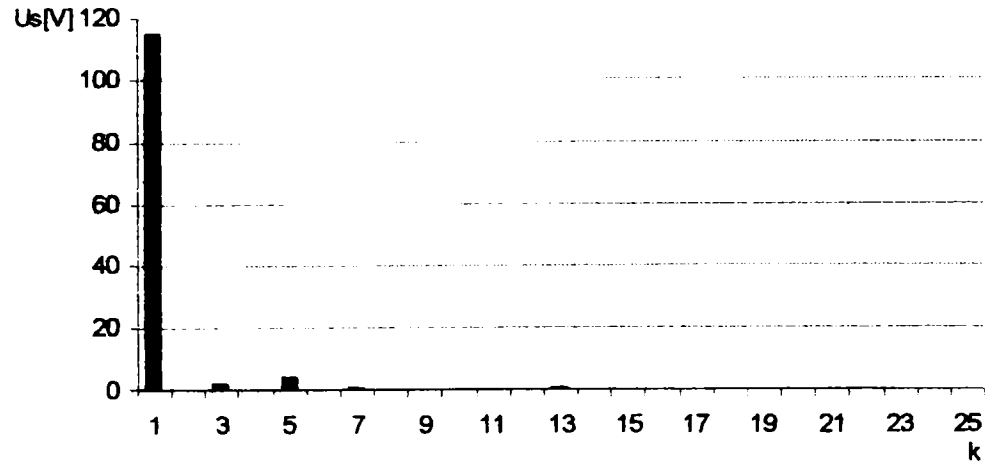


Fig.9 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la începutul liniei

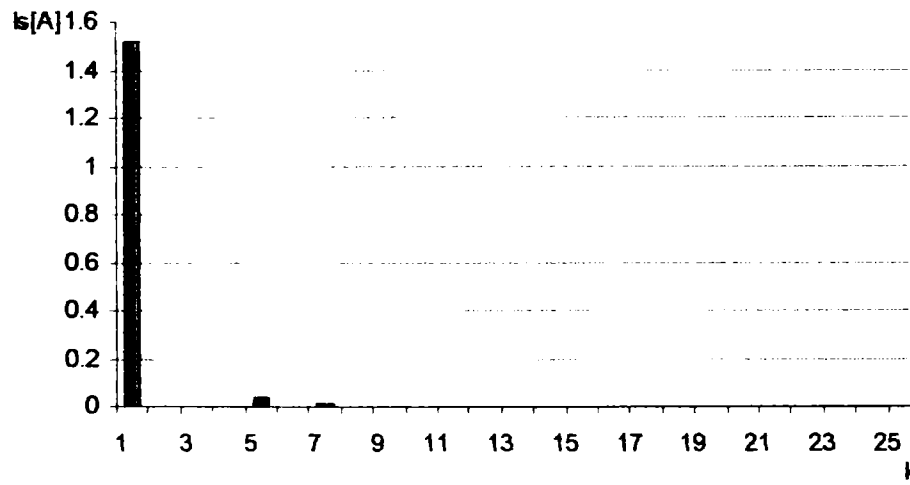


Fig.10 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la începutul liniei.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

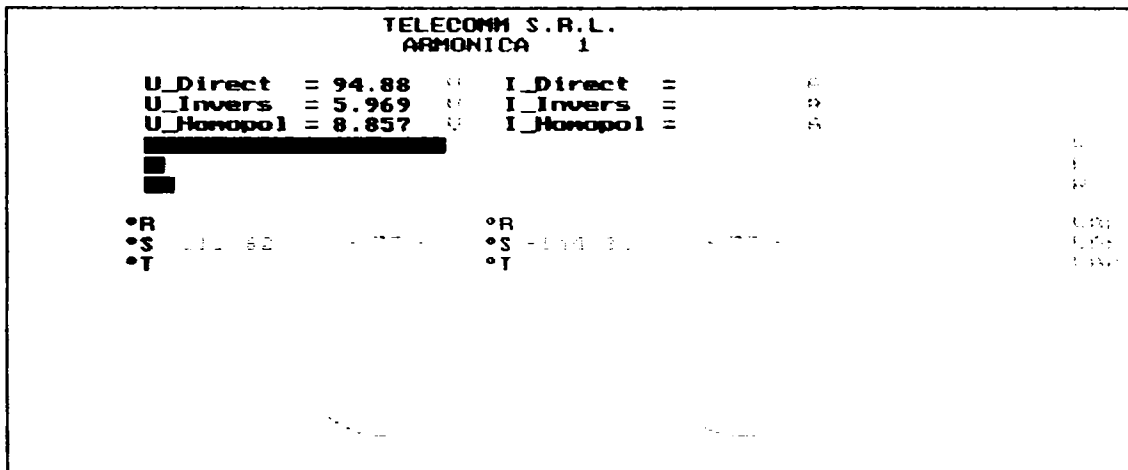
Row	U (V)	I (A)	U THD (%)	I THD (%)
1	91.10	1.597	3.81	2.11
2	98.11	1.519	3.46	2.22
3	97.32	1.674	3.76	2.22

S3: P3: Q3: D3: UAd K3: F: 49.94
 F1:TRINET\ucc1200.trn Id: Dt:31. 8.2004- 8:42

U(1) = 94.88
 U(3) = 5.969
 U(5) = 8.857
 U(7) =
 U(9) =
 U(11) =
 U(13) =
 U(15) =
 U(17) =
 U(19) =
 U(21) =
 U(23) =
 U(25) =

I(1) =
 I(3) =
 I(5) =
 I(7) =
 I(9) =
 I(11) =
 I(13) =
 I(15) =
 I(17) =
 I(19) =
 I(21) =
 I(23) =
 I(25) =

U(1) = 94.88
 U(3) = 5.969
 U(5) = 8.857
 U(7) =
 U(9) =
 U(11) =
 U(13) =
 U(15) =
 U(17) =
 U(19) =
 U(21) =
 U(23) =
 U(25) =



Coef. nesim. inversa:	h _{ns(1)} = 0.063	h _{ns(3)} = 0.068
Coef. sim. homop.	h _{so(1)} = 0.093	h _{so(3)} = 0.014
Coef. total de nesim.	h _{st(1)} = 0.16	h _{st(3)} = 0.082
Raport de nesimetrii:	h _{sd(1)} = 0.93	h _{sd(3)} = 0.91
Rep. dif. de nesim.	h _{sd(1)} = 0.074	h _{sd(3)} = 0.097

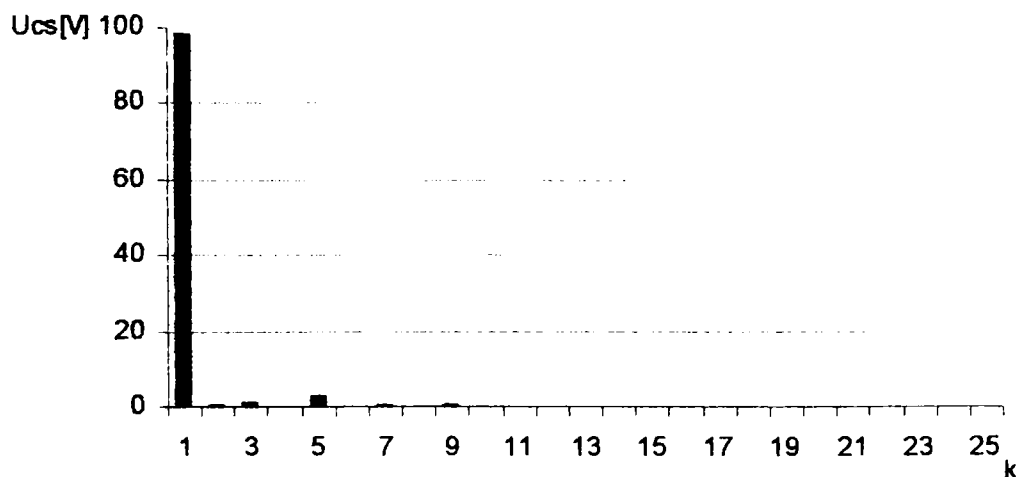


Fig.11 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului.

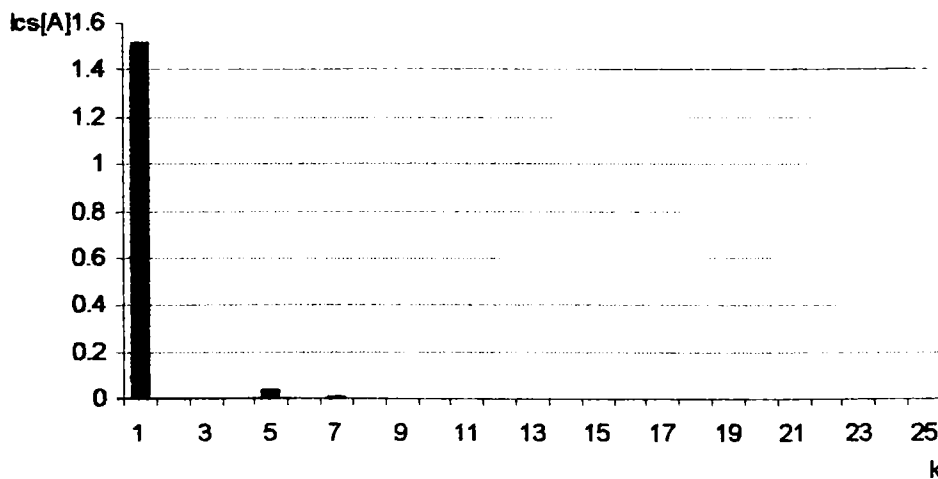
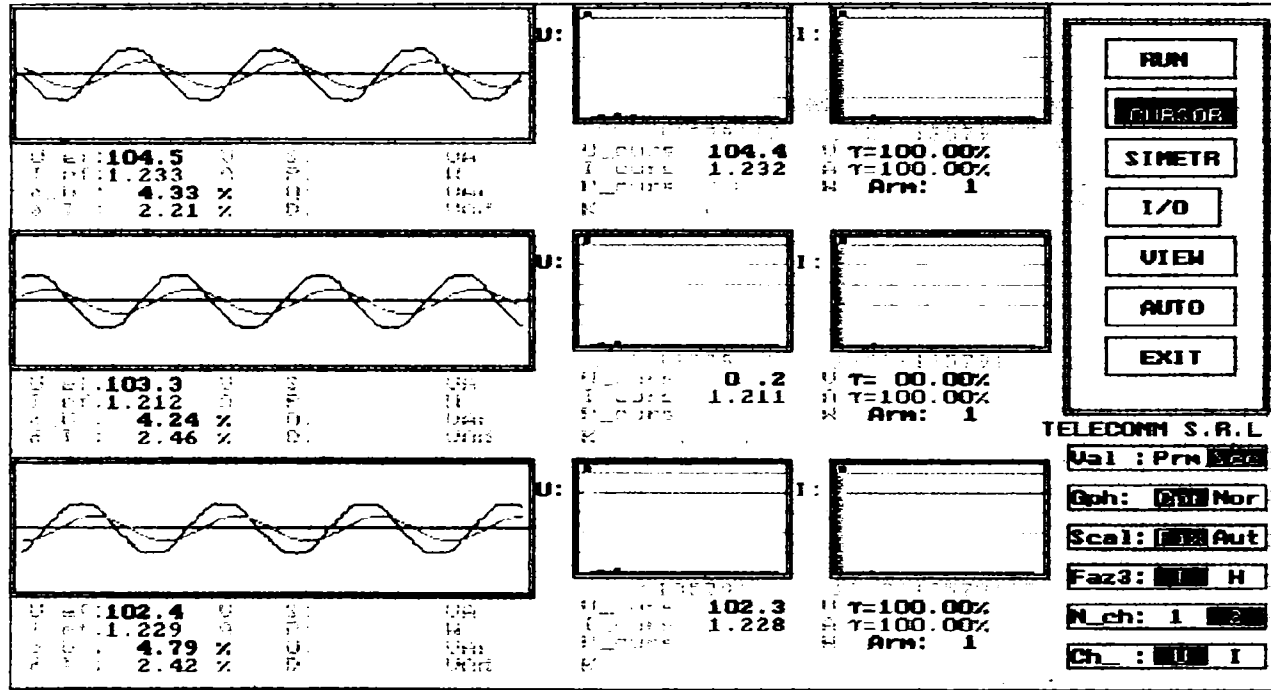


Fig.12 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

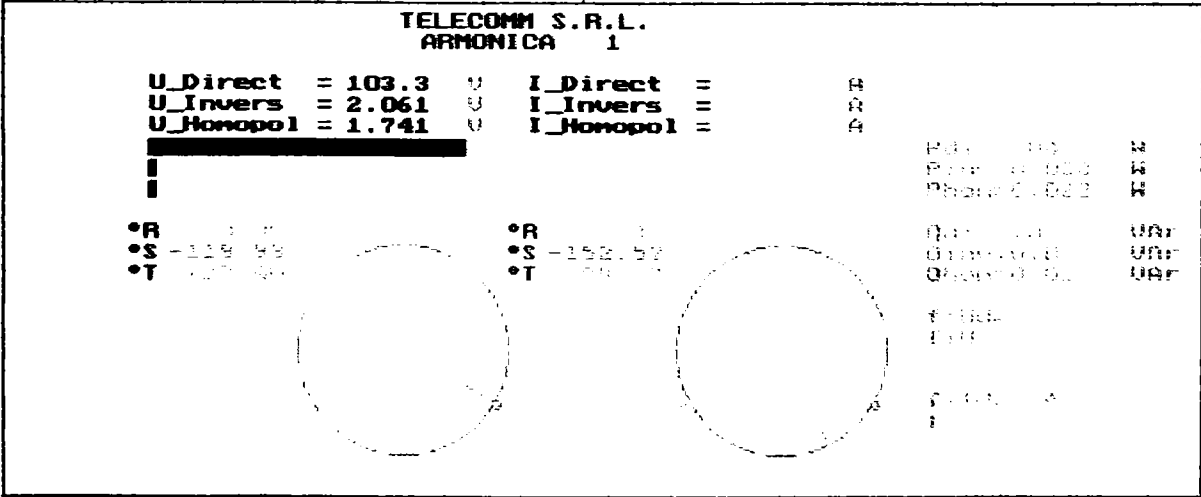
5.2. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=180V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la începutul liniei, respectiv la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 1,05$ și $Kc = 2,1$. (Consumatorul modelat absoarbe o putere de 657VA la $\cos\phi=0,84$).

a) *Linia fără compensare*

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei

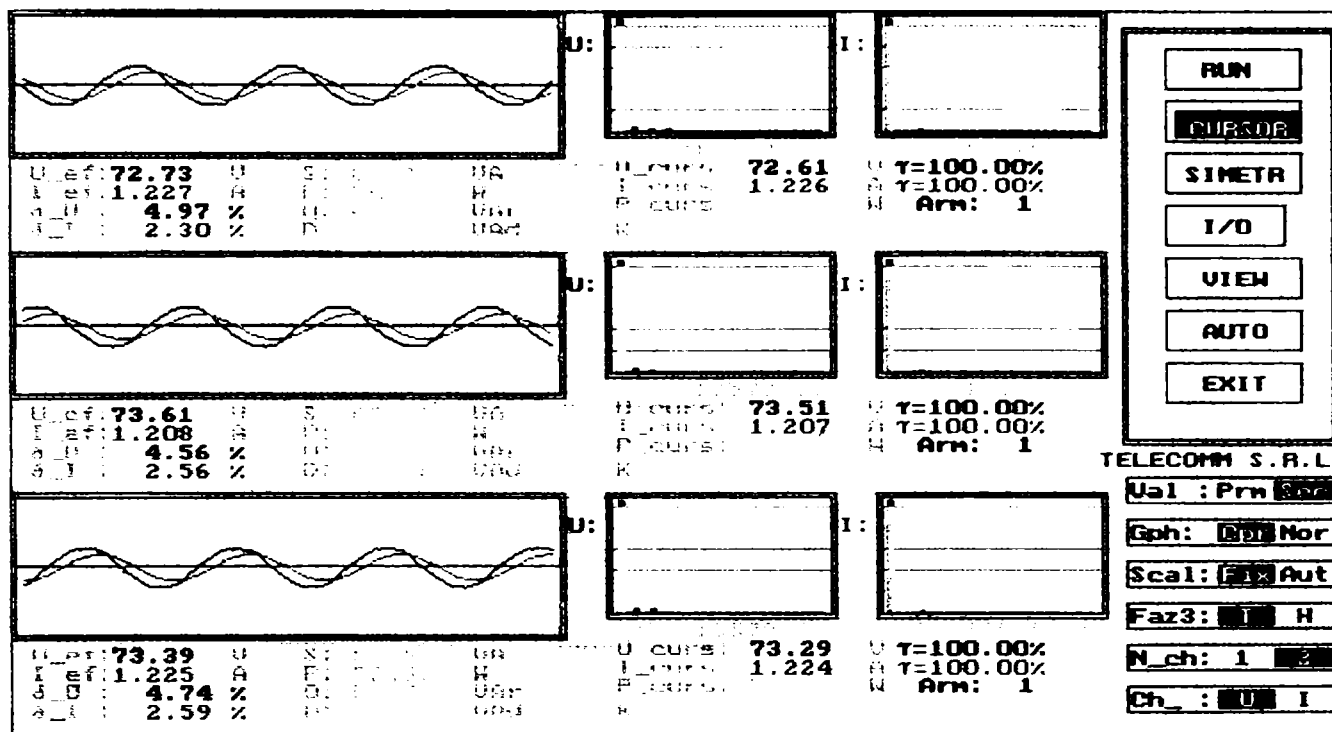


S3:	U1:	P3:	Id:	Q3:	Var D3:	Var K3:	F: 49.95
F1:TRAINET\ub180.trn							Dt:31. 8.2004- 8:24
U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8
U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11
U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12
U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14
U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15
U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16
U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17
U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18
U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19
U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20
U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21
U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22
U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23
U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24
U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25
U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	U26
U20	U21	U22	U23	U24	U25	U26	U27
U21	U22	U23	U24	U25	U26	U27	U28
U22	U23	U24	U25	U26	U27	U28	U29
U23	U24	U25	U26	U27	U28	U29	U30
U24	U25	U26	U27	U28	U29	U30	U31
U25	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32
U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33
U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34
U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35
U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36
U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37
U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	U38
U32	U33	U34	U35	U36	U37	U38	U39
U33	U34	U35	U36	U37	U38	U39	U40
U34	U35	U36	U37	U38	U39	U40	U41
U35	U36	U37	U38	U39	U40	U41	U42
U36	U37	U38	U39	U40	U41	U42	U43
U37	U38	U39	U40	U41	U42	U43	U44
U38	U39	U40	U41	U42	U43	U44	U45
U39	U40	U41	U42	U43	U44	U45	U46
U40	U41	U42	U43	U44	U45	U46	U47
U41	U42	U43	U44	U45	U46	U47	U48
U42	U43	U44	U45	U46	U47	U48	U49
U43	U44	U45	U46	U47	U48	U49	U50
U44	U45	U46	U47	U48	U49	U50	U51
U45	U46	U47	U48	U49	U50	U51	U52
U46	U47	U48	U49	U50	U51	U52	U53
U47	U48	U49	U50	U51	U52	U53	U54
U48	U49	U50	U51	U52	U53	U54	U55
U49	U50	U51	U52	U53	U54	U55	U56
U50	U51	U52	U53	U54	U55	U56	U57
U51	U52	U53	U54	U55	U56	U57	U58
U52	U53	U54	U55	U56	U57	U58	U59
U53	U54	U55	U56	U57	U58	U59	U60
U54	U55	U56	U57	U58	U59	U60	U61
U55	U56	U57	U58	U59	U60	U61	U62
U56	U57	U58	U59	U60	U61	U62	U63
U57	U58	U59	U60	U61	U62	U63	U64
U58	U59	U60	U61	U62	U63	U64	U65
U59	U60	U61	U62	U63	U64	U65	U66
U60	U61	U62	U63	U64	U65	U66	U67
U61	U62	U63	U64	U65	U66	U67	U68
U62	U63	U64	U65	U66	U67	U68	U69
U63	U64	U65	U66	U67	U68	U69	U70
U64	U65	U66	U67	U68	U69	U70	U71
U65	U66	U67	U68	U69	U70	U71	U72
U66	U67	U68	U69	U70	U71	U72	U73
U67	U68	U69	U70	U71	U72	U73	U74
U68	U69	U70	U71	U72	U73	U74	U75
U69	U70	U71	U72	U73	U74	U75	U76
U70	U71	U72	U73	U74	U75	U76	U77
U71	U72	U73	U74	U75	U76	U77	U78
U72	U73	U74	U75	U76	U77	U78	U79
U73	U74	U75	U76	U77	U78	U79	U80
U74	U75	U76	U77	U78	U79	U80	U81
U75	U76	U77	U78	U79	U80	U81	U82
U76	U77	U78	U79	U80	U81	U82	U83
U77	U78	U79	U80	U81	U82	U83	U84
U78	U79	U80	U81	U82	U83	U84	U85
U79	U80	U81	U82	U83	U84	U85	U86
U80	U81	U82	U83	U84	U85	U86	U87
U81	U82	U83	U84	U85	U86	U87	U88
U82	U83	U84	U85	U86	U87	U88	U89
U83	U84	U85	U86	U87	U88	U89	U90
U84	U85	U86	U87	U88	U89	U90	U91
U85	U86	U87	U88	U89	U90	U91	U92
U86	U87	U88	U89	U90	U91	U92	U93
U87	U88	U89	U90	U91	U92	U93	U94
U88	U89	U90	U91	U92	U93	U94	U95
U89	U90	U91	U92	U93	U94	U95	U96
U90	U91	U92	U93	U94	U95	U96	U97
U91	U92	U93	U94	U95	U96	U97	U98
U92	U93	U94	U95	U96	U97	U98	U99
U93	U94	U95	U96	U97	U98	U99	U100



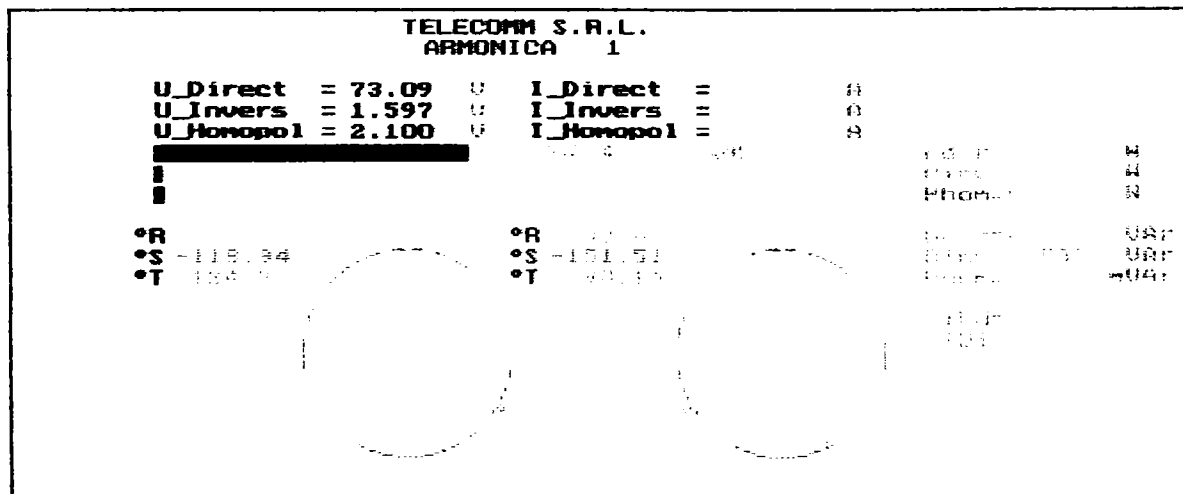
Coef. nesim. inversa:	kns2(U) = 0.020	kns2(I) = 0.023
Coef. nesim. homop. :	kns0(U) = 0.017	kns0(I) = 0.013
Coef. total de nesim:	kns(U) = 0.037	kns(I) = 0.036
Raport de nesimetrie:	rns(U) = 0.98	rns(I) = 0.98
Rap. dif. de nesim. :	knsd(U) = 0.020	knsd(I) = 0.017

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



S3: P3: N Q3: D3: K3: F: 49.98
 Fl .RINET\uc180.trn Id: Dt: 1. 8. 004- 8:27

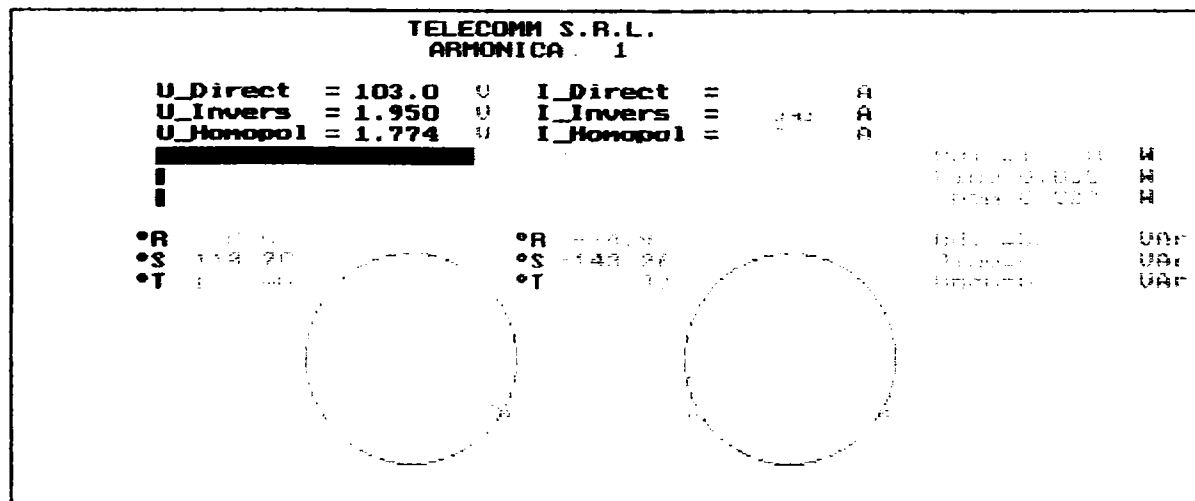
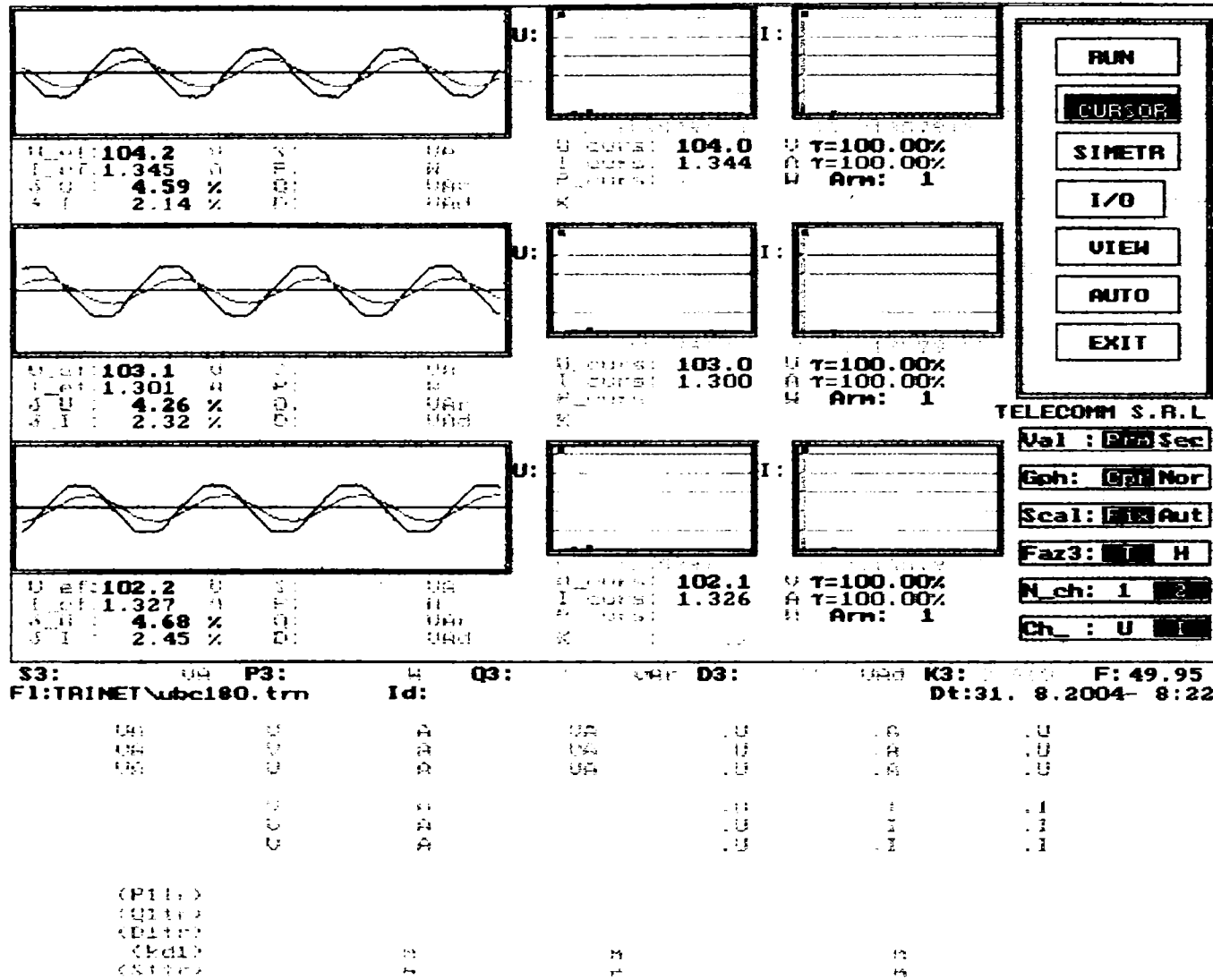
UA	U	A	UA	I	A	UA	I
UA	U	A	UA	I	A	UA	I
UA	U	A	UA	I	A	UA	I
	U	A		I	A		I
	U	A		I	A		I
	U	A		I	A		I
(PIFF)							
(O1FF)							
(O1FF)							
(O1FF)							
(O1FF)							



Coef. nesim. inversa:	kns0(U) = 0.022	kns2(U) = 0.023
Coef. nesim. homop. :	kns0(I) = 0.029	kns0(I) = 0.013
Coef. total de nesim:	kns(U) = 0.051	kns(I) = 0.036
Raport de nesimetrie:	ms(U) = 0.99	ms(I) = 0.98
Rap. dif. de nesim. :	knsd(I) = -0.012	knsd(I) = 0.015

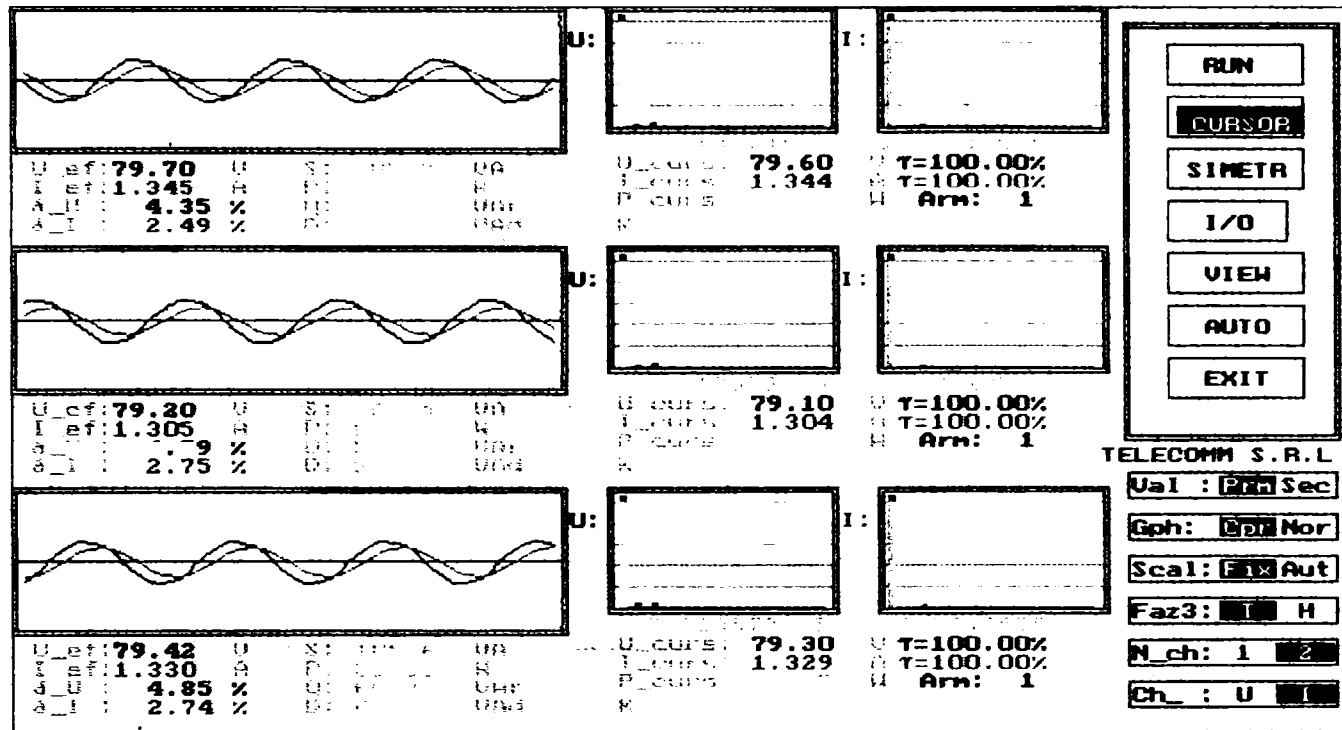
b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 1,05$.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.



Coef. nesim. inversa:	kns2(U) = 0.019	kns2(I) = 0.031
Coef. nesim. monop. :	kns0(U) = 0.017	kns0(I) = 0.013
Coef. total de nesim:	kns(U) = 0.036	kns(I) = 0.045
Raport de nesimetrii:	rns(U) = 0.98	rns(I) = 0.97
Rap. dif. de nesim.	knsd(U) = 0.019	knsd(I) = 0.034

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



TELECOMM S.R.L.

U_{al}: **Prn** Sec

G_{oh}: **Op** Nor

Scal: **Fix** Aut

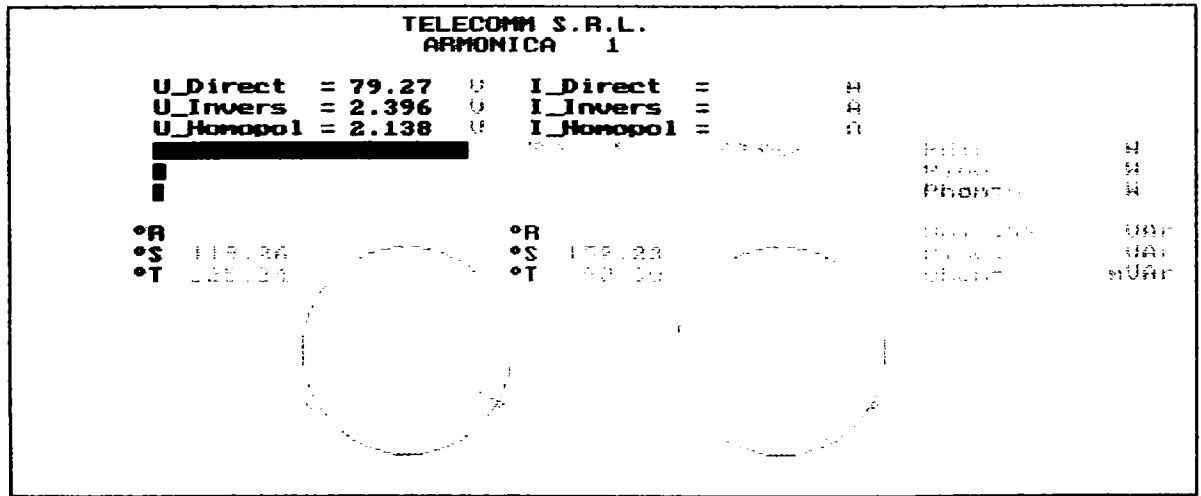
Faz3: **I** H

N_{ch}: **1** 2

Ch: **U** I

S3: UA P3: N Q3: D3: UA K3: F: 49.97
 F1:TRINET\ucc180.trn Id: Dt:31. 8.2004- 8:20

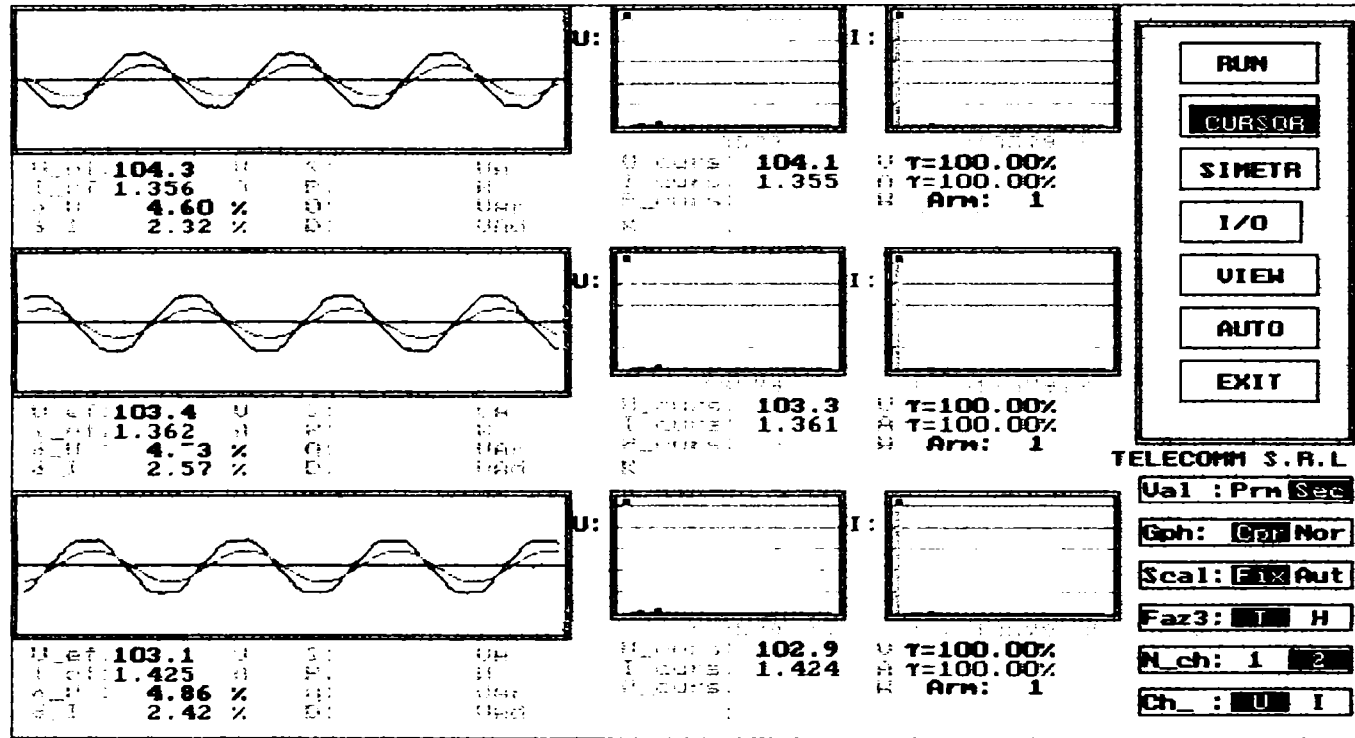
UA	U	A	UA	U	A	U
UA	U	A	UA	U	A	U
UA	U	A	UA	U	A	U
	U	A		U	A	
	U	A		U	A	
	U	A		U	A	
(P1tr)						
(Q1tr)						
(D1tr)						
(KdL)		A	(KdL)		A	
(S1tr)		A	(S1tr)		A	



Coef. nesim. inversa: kns2(U) = 0.030 kns2(I) = 0.030
 Coef. nesim. homop.: kns3(U) = 0.027 kns3(I) = 0.014
 Coef. total de nesim: kns(U) = 0.057 kns(I) = 0.043
 Raport de nesimetrie: rms(U) = 0.99 rms(I) = 0.97
 Rap. dif. de nesim.: knsd(U) = 6.3 knsd(I) = 0.030

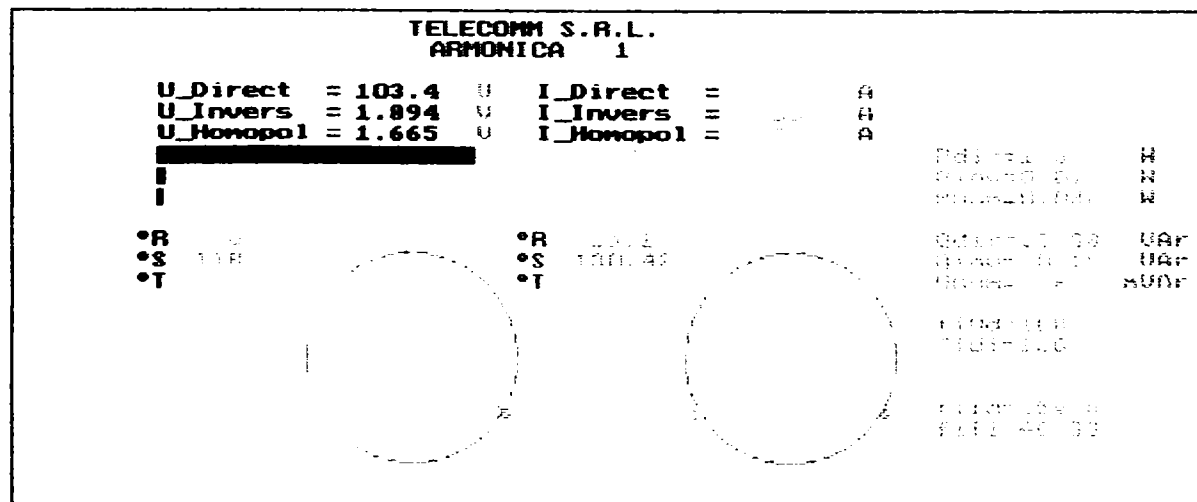
c) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.



S3: P3: Q3: D3: K3: F: 49.98
 FI:TRINET\ubc1180.trn Id: Dt:31. 8.2004- 9: 0

Ua	Ub	Uc	Ud	Ue	Uf	Ug	Uh	Ui
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Coef. nesim. inversa:	kns2(U) = 0.018	kns2(I) = 0.040
Coef. nesim. monop.:	kns0(U) = 0.016	kns0(I) = 0.013
Coef. total de nesim:	kns(U) = 0.034	kns(I) = 0.054
Raport de nesim. total:	kns(0) = 0.99	kns(1) = 0.95
Rap. def. de nesim.:	knsd(U) = -0.011	knsd(I) = 0.049

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

U: I:

U_{eff}: 80.54 U S: 0A
I_{eff}: 1.354 R P: R
a_U: 4.31 % U: U₀
a_I: 2.38 % P: P₀

U_{eff}: 80.45 U T=100.00%
I_{eff}: 1.353 S T=100.00%
P_{cur} R Arm: 1

U: I:

U_{eff}: 86.66 U S: 0A
I_{eff}: 1.358 R P: R
a_U: % U: U₀
a_I: 2.62 % P: P₀

U_{eff}: 86.59 U T=100.00%
I_{eff}: 1.357 S T=100.00%
P_{cur} R Arm: 1

U: I:

U_{eff}: 80.20 U S: 0A
I_{eff}: 1.424 R P: R
a_U: 4.57 % U: U₀
a_I: 2.52 % P: P₀

U_{eff}: 80.09 U T=100.00%
I_{eff}: 1.423 S T=100.00%
P_{cur} R Arm: 1

TELECOMM S.R.L.
Ual: Prn Sec
Gph: Opt Nor
Scal: Fix Aut
Faz3: I H
N_ch: 1 2
Ch: U I

S3: ... P3: ... Q3: ... D3: ... K3: ... F: 49.94
F1: TRINET\ucc1180.trn Id: ... Dt: 31. 8.2004- 8:58

UA	U	A	UA	U	R	U
UB	U	A	UB	U	R	U
UC	U	A	UC	U	R	U
	U	A		U	R	U
	U	A		U	R	U
	U	A		U	R	U

(P1):
(Q1):
(D1):
(k1):
(S1):

TELECOMM S.R.L.
ARMONICA 1

U_Direct	=	82.10	U	I_Direct	=	A
U_Invers	=	2.890	U	I_Invers	=	A
U_Homopol	=	6.752	U	I_Homopol	=	A

°R 100.00
°S 100.00
°T 100.00

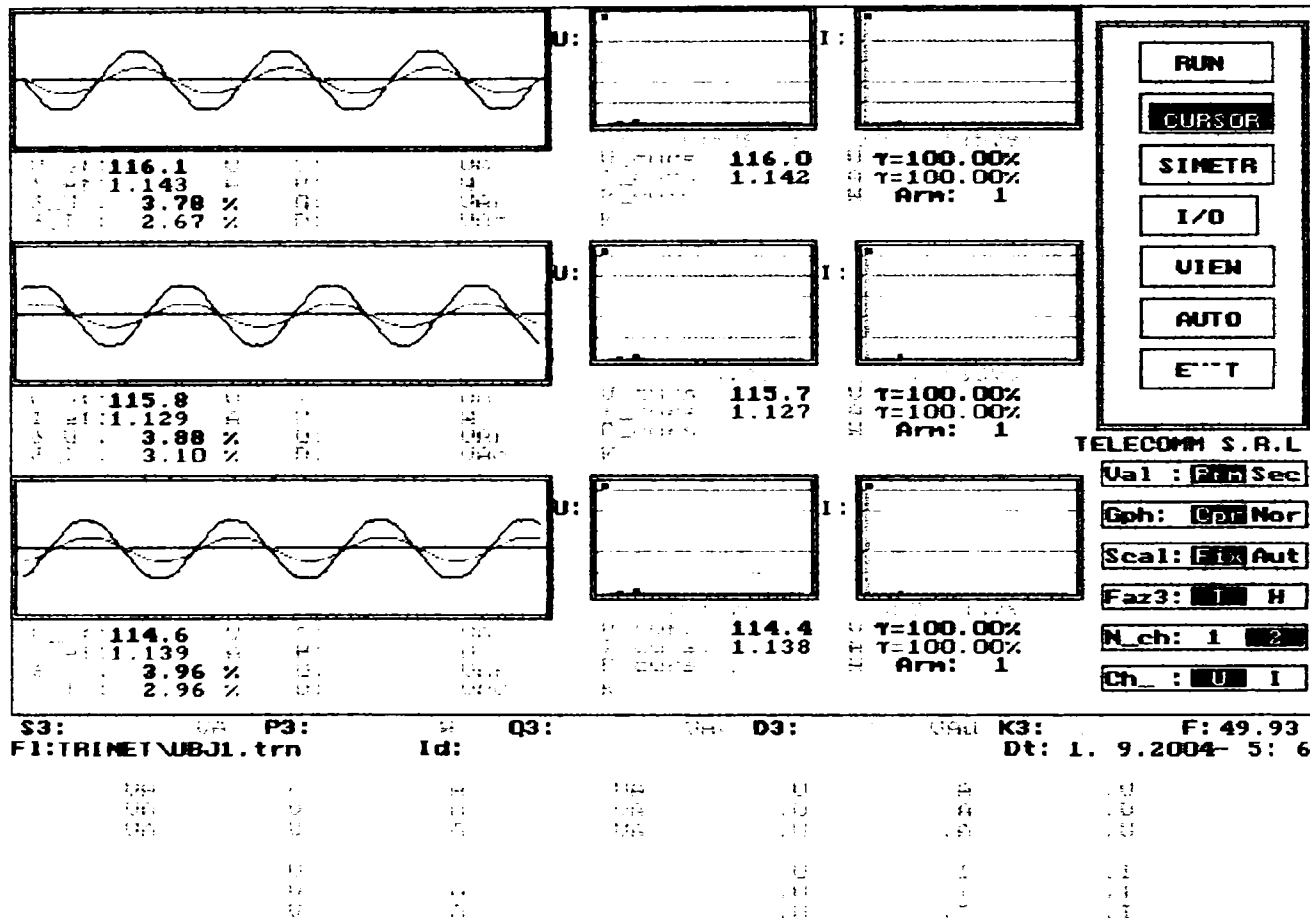
°R 140.00
°S 140.00
°T 140.00

Coef. nesim. inversa:	kns2(U) = 0.035	kns2(I) = 0.042
Coef. nesim. homop.:	kns3(U) = 0.082	kns3(I) = 0.013
Coef. total de nesim:	kns(U) = 0.12	kns(I) = 0.055
Raport de nesimetrie:	kns(U) = 0.92	kns(I) = 0.95
Rap. dif. de nesim.:	knsd(U) = -0.078	knsd(I) = 0.050

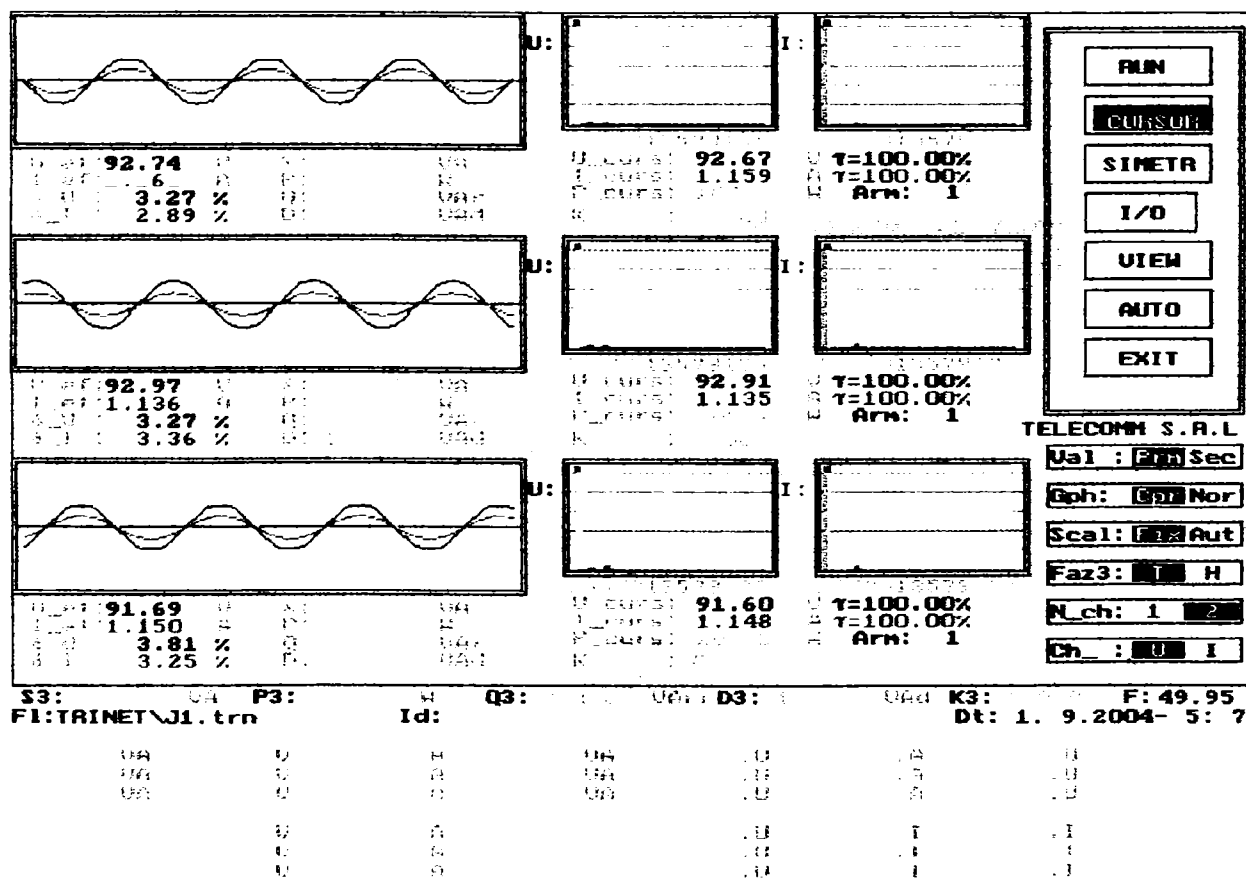
5.3. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la începutul liniei, respectiv la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $K_c = 2,1$. (Consumatorul pur rezistiv).

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei



Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



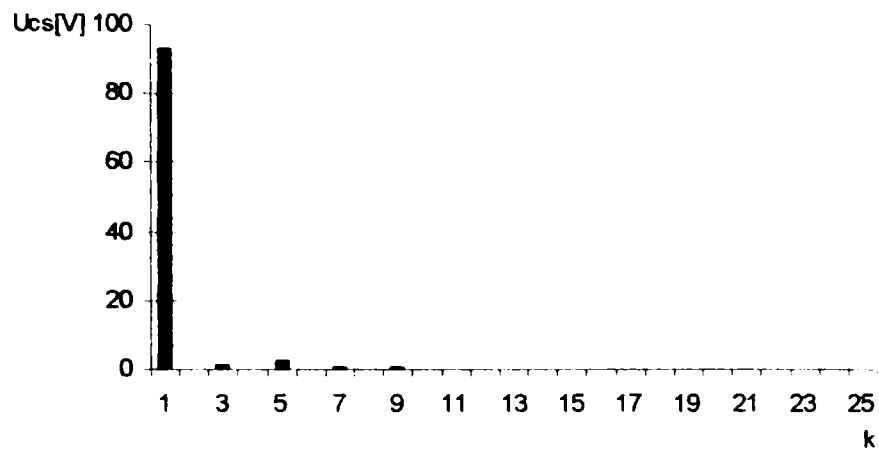


Fig.13 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

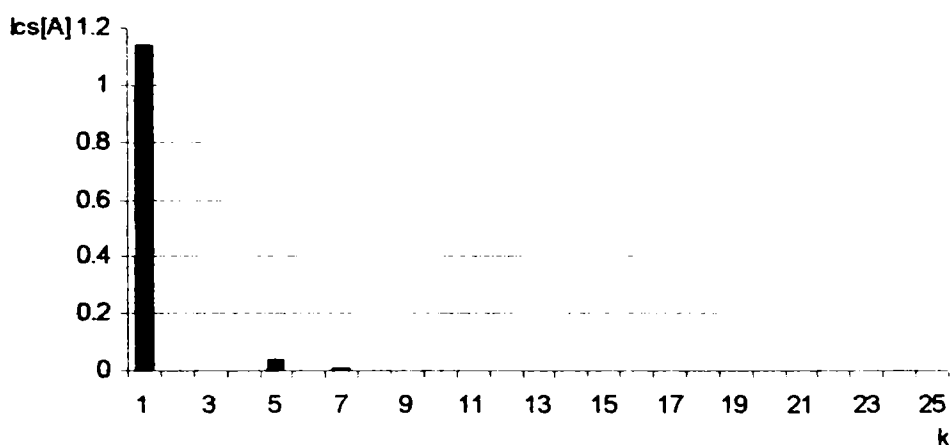


Fig.14 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului

b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.

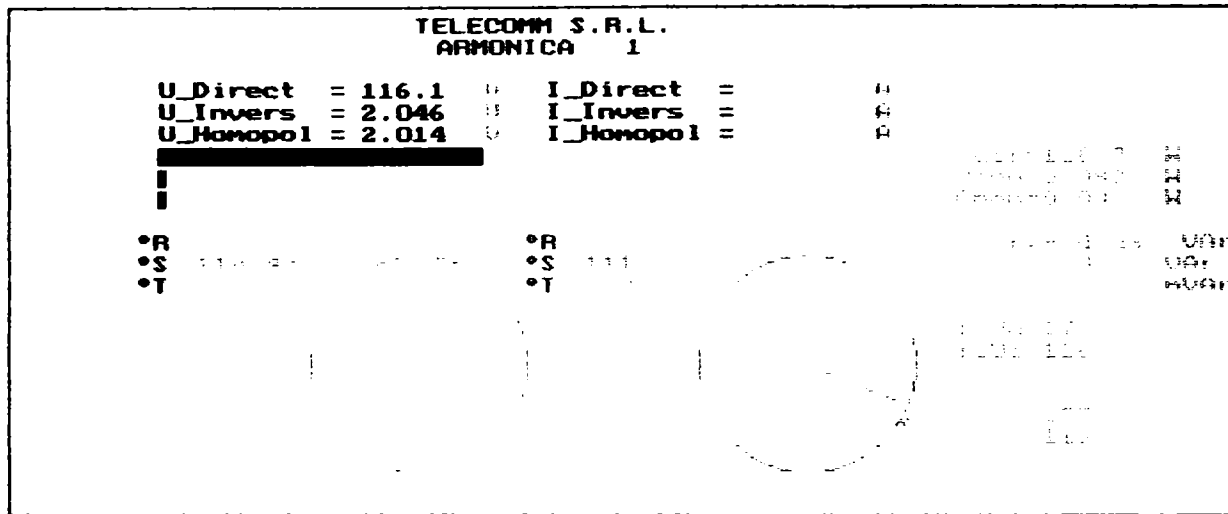
U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]
117.0	1.113	116.9	1.112	116.2	1.073
4.42 %	3.23 %	4.42 %	3.23 %	4.28 %	3.66 %
115.4	1.115	115.3	1.114	115.4	1.115
4.54 %	3.48 %	4.54 %	3.48 %	4.54 %	3.48 %

S3: UR P3: Id: Q3: D3: K3: F: 50.02
 FI: TRINET\ubrez1.trn Dt: 31. 8. 2004-10:51

```

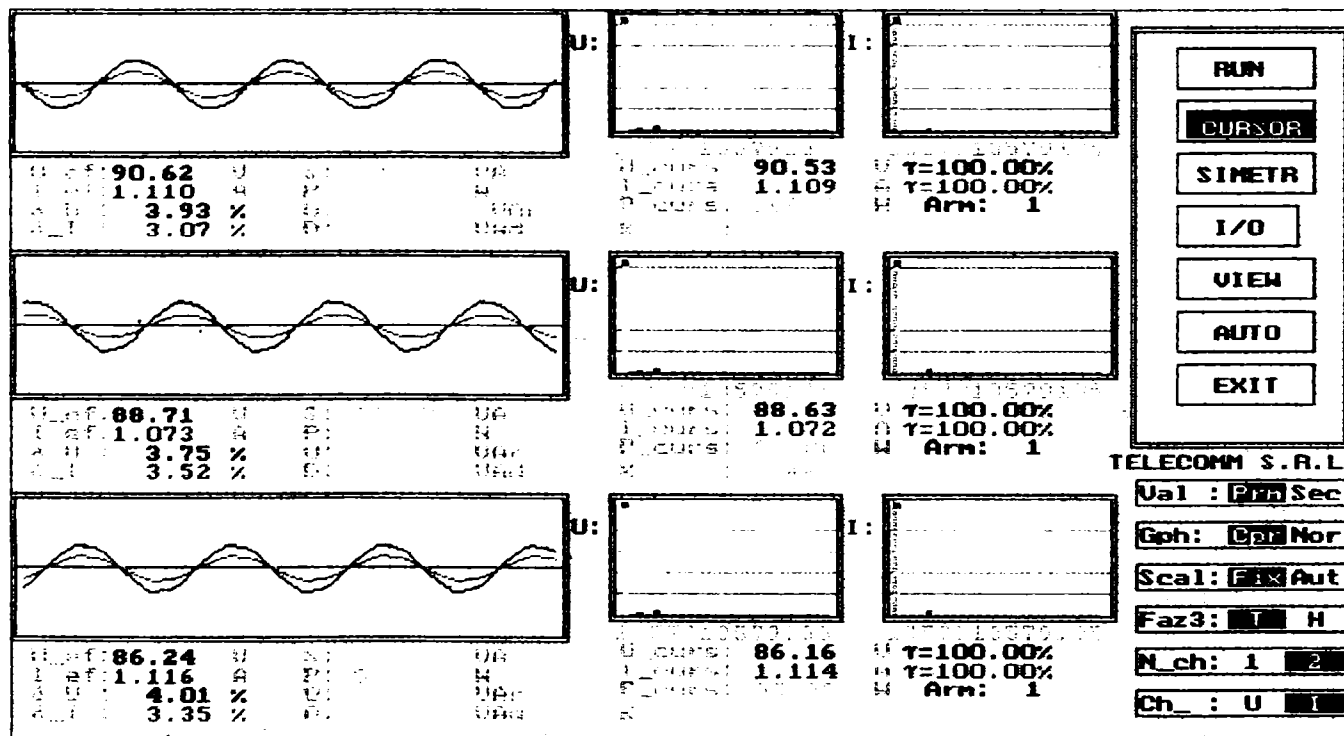
U1: 116.10 V
U2: 116.10 V
U3: 116.10 V
I1: 1.10 A
I2: 1.10 A
I3: 1.10 A
PF: 0.99

```



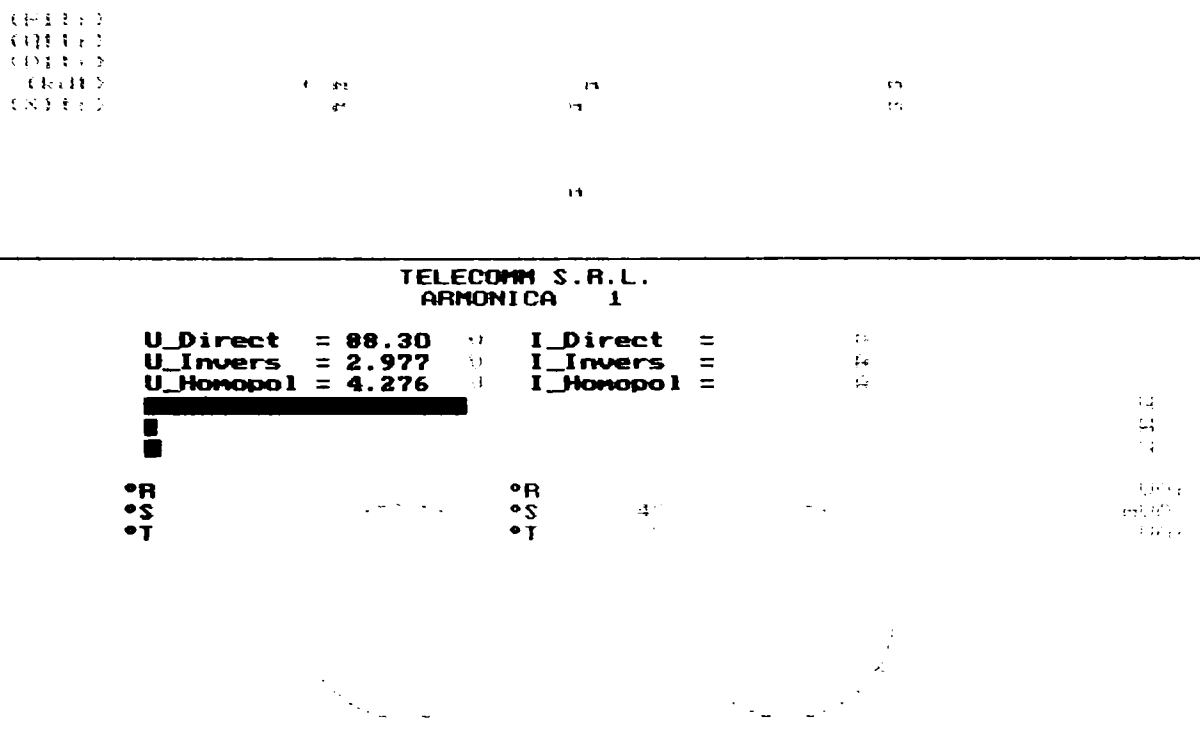
Coef. nesim. general:	kns2(U) = 0.018	kns2(I) = 0.038
Coef. nesim. monop.:	kns2(U) = 0.017	kns2(I) = 0.014
Coef. total de nesim.:	kns(U) = 0.035	kns(I) = 0.052
Coef. de nesimetrii:	kns(I) = 0.99	kns(I) = 0.96
Coef. de nesim.:	kns(I) = 0.014	kns(I) = 0.038

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



S3: P3: D3: K3: F:
 FI:TRINET\crezi1.trn Id: Dt:31. 8.2004-10:49

UA	U	A	UA	U	A	U
UB	U	A	UB	U	A	U
UC	U	A	UC	U	A	U
	U	A		U	A	I
	U	A		U	A	I
	U	A		U	A	I



Coef. nesim. inversa:	kns2(0) = 0.034	kns2(1) = 0.038
Coef. nesim. homop. :	kns0(0) = 0.048	kns0(1) = 0.014
Coef. total de nesim.:	kns(0) = 0.082	kns(1) = 0.051
Raport de nesimetrii:	kns(0) = 0.95	kns(1) = 0.96
Rap. dif. de nesim. :	knsd(0) = -0.049	knsd(1) = 0.039

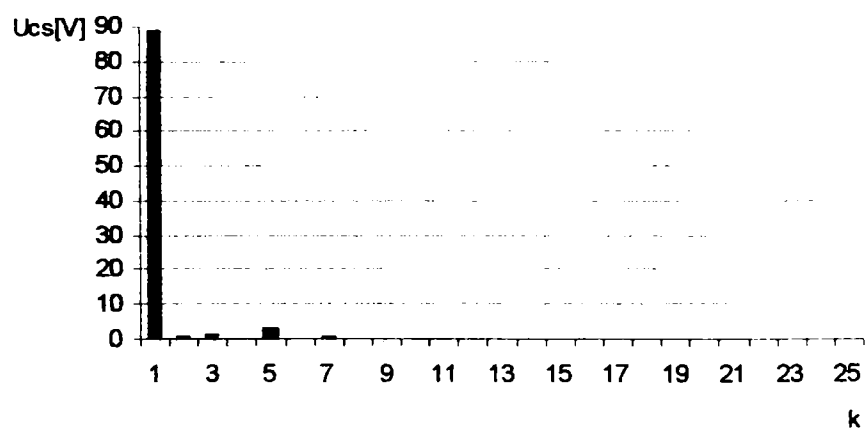


Fig.15 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului.

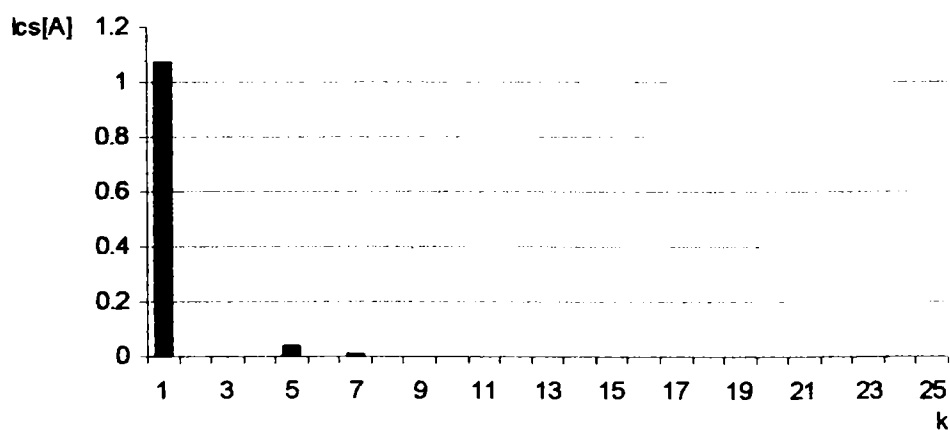
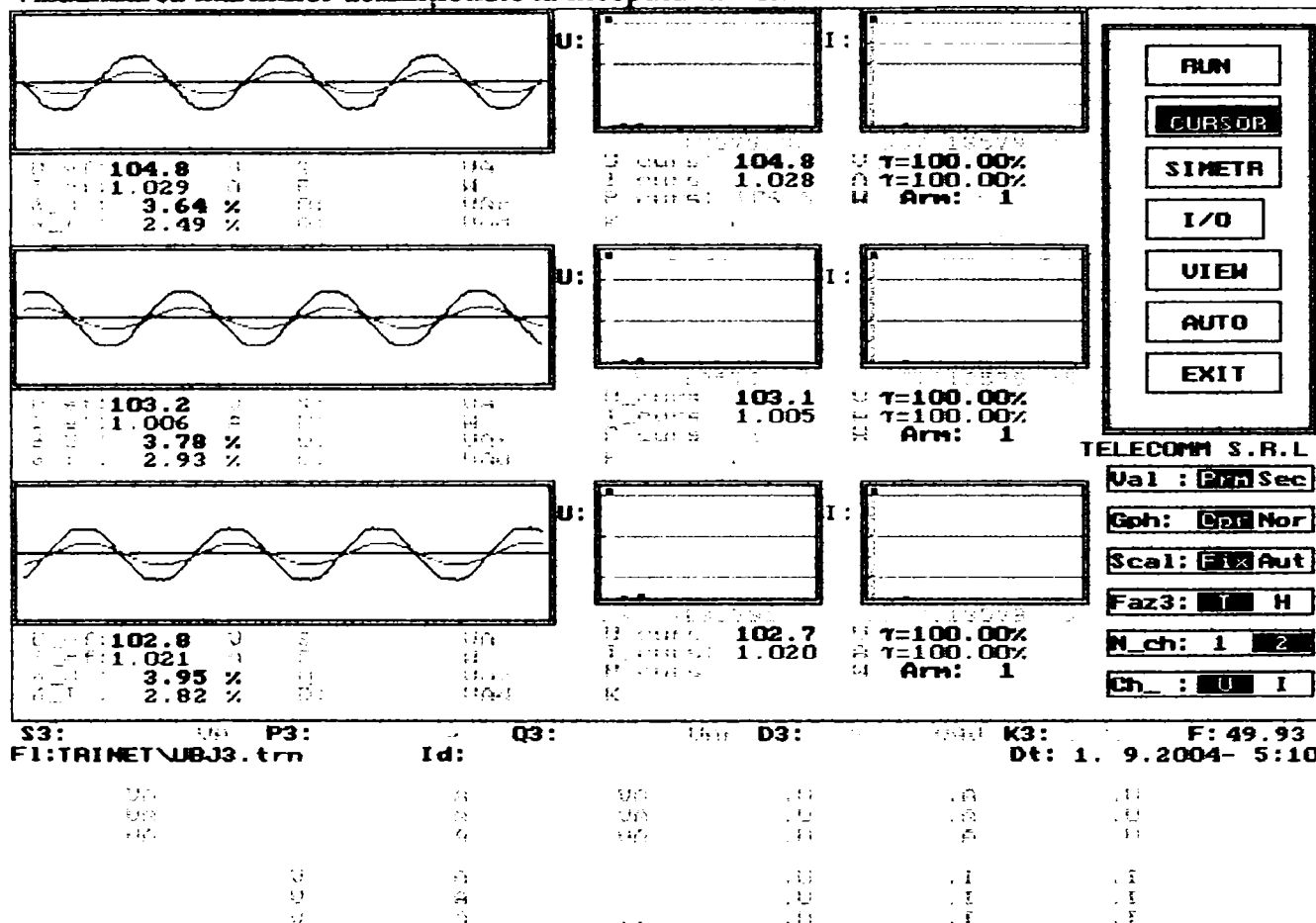


Fig.16 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

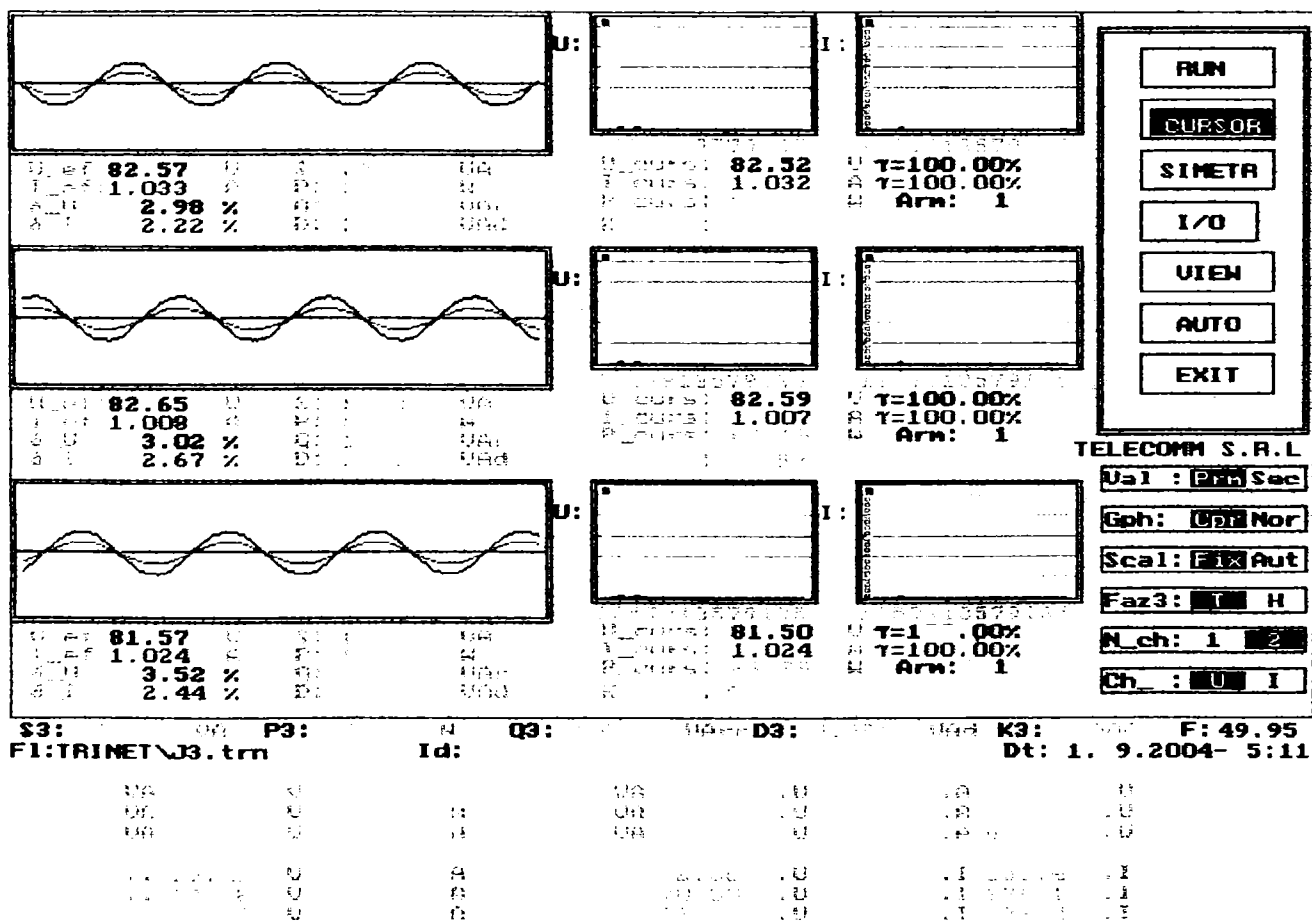
5.4. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=180V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la începutul liniei, respectiv la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 2,1$. (Consumatorul pur rezistiv).

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.

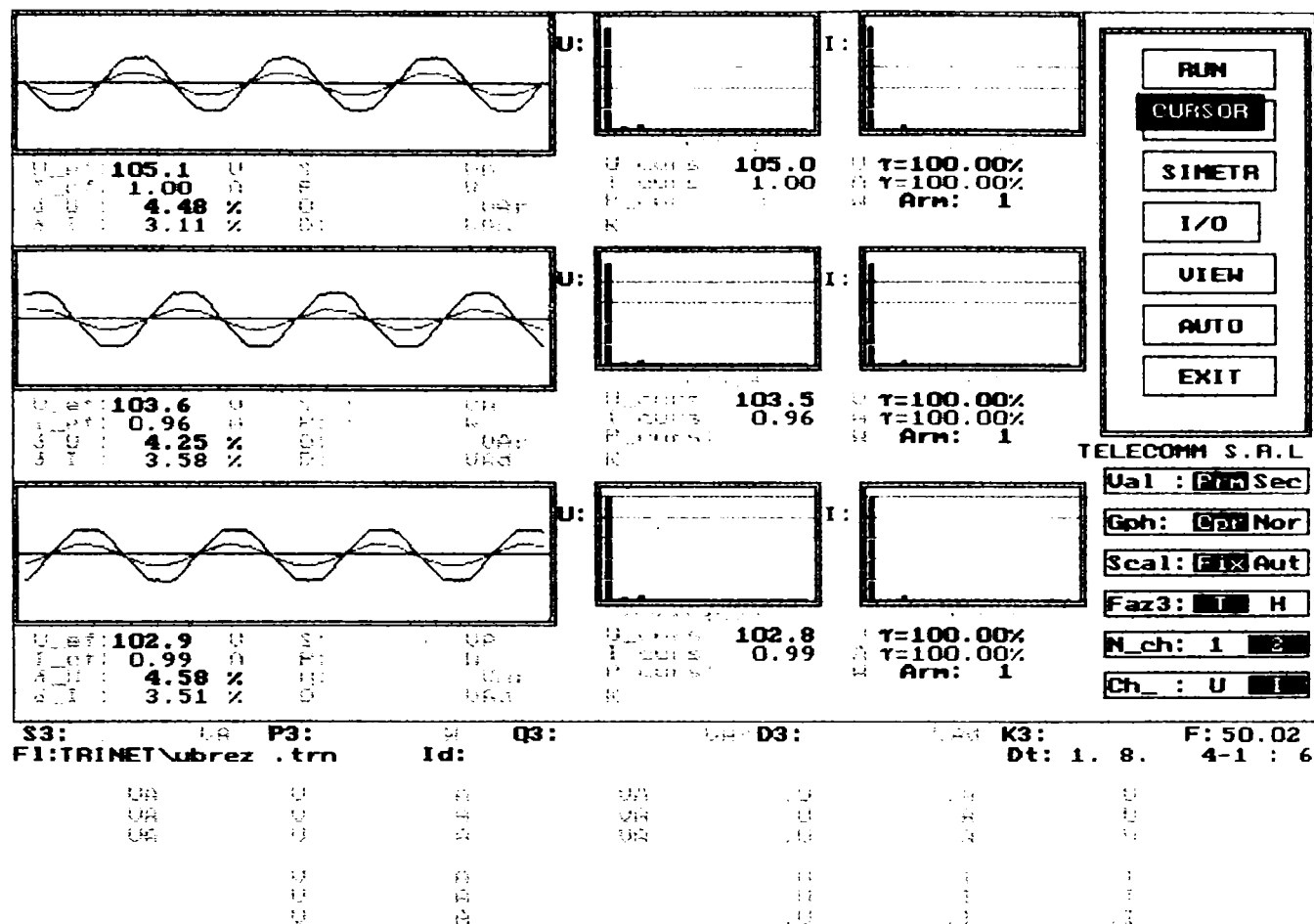


Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

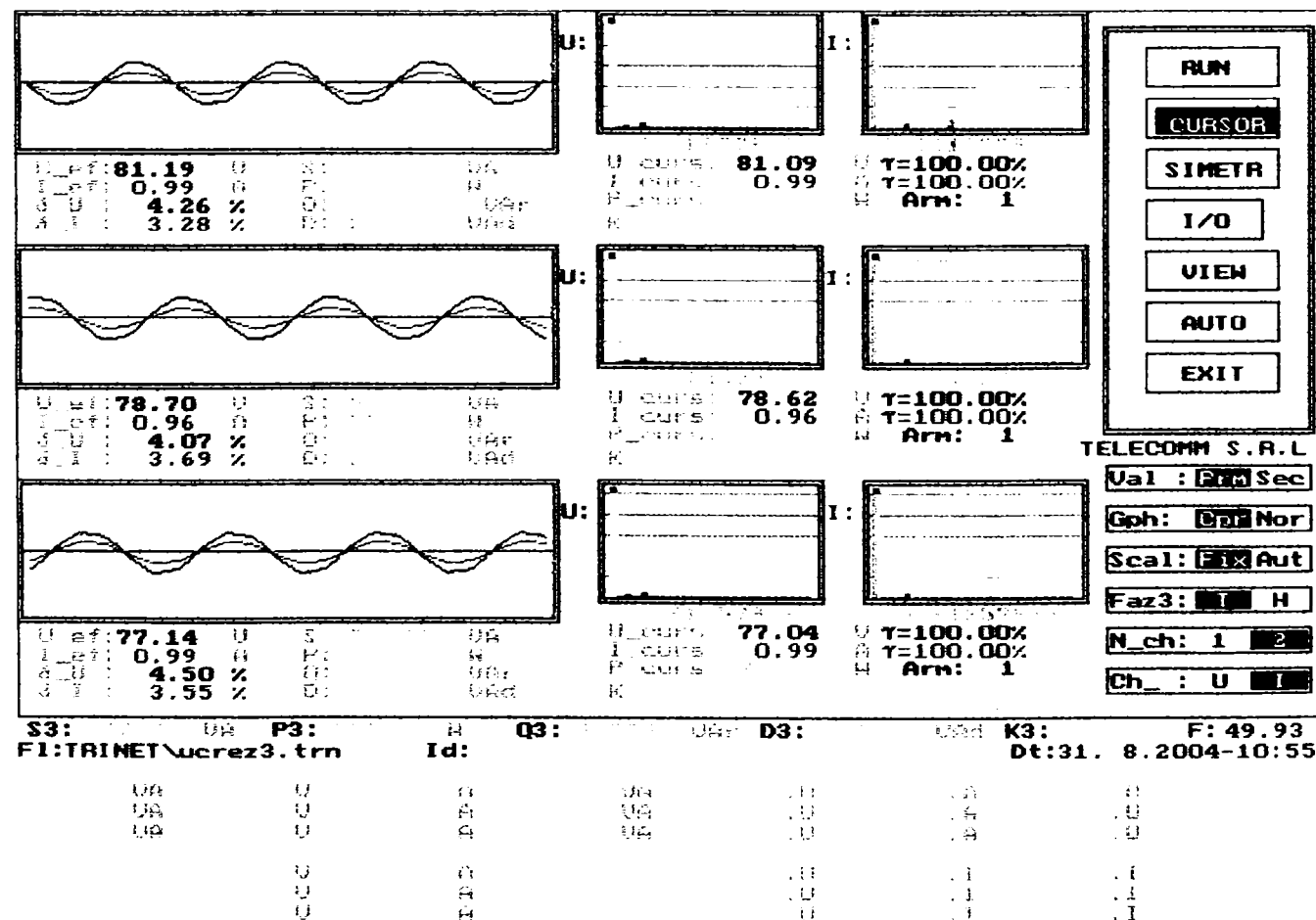


b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la începutul liniei.



Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



5.5. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $K_c=2,1$. (Consumatorul modelat prin rezistențe de 80Ω în paralel cu condensatoare, având capacitatea $11,25\mu F$)

a) *Linia fără compensare*

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

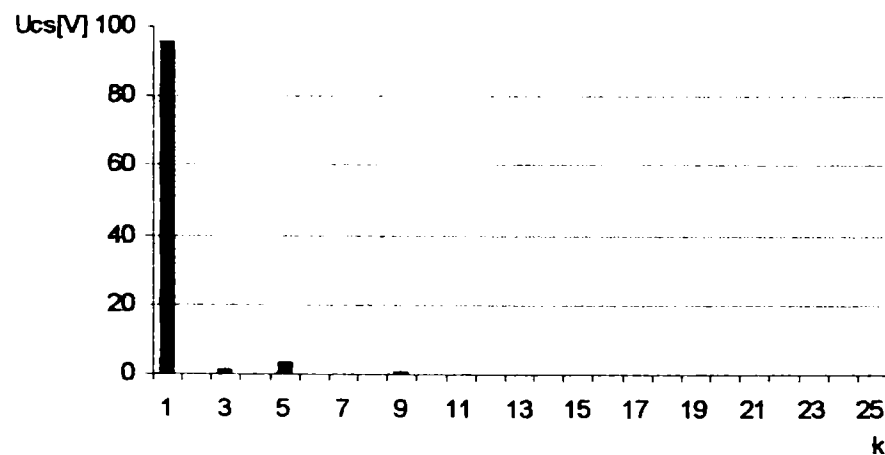
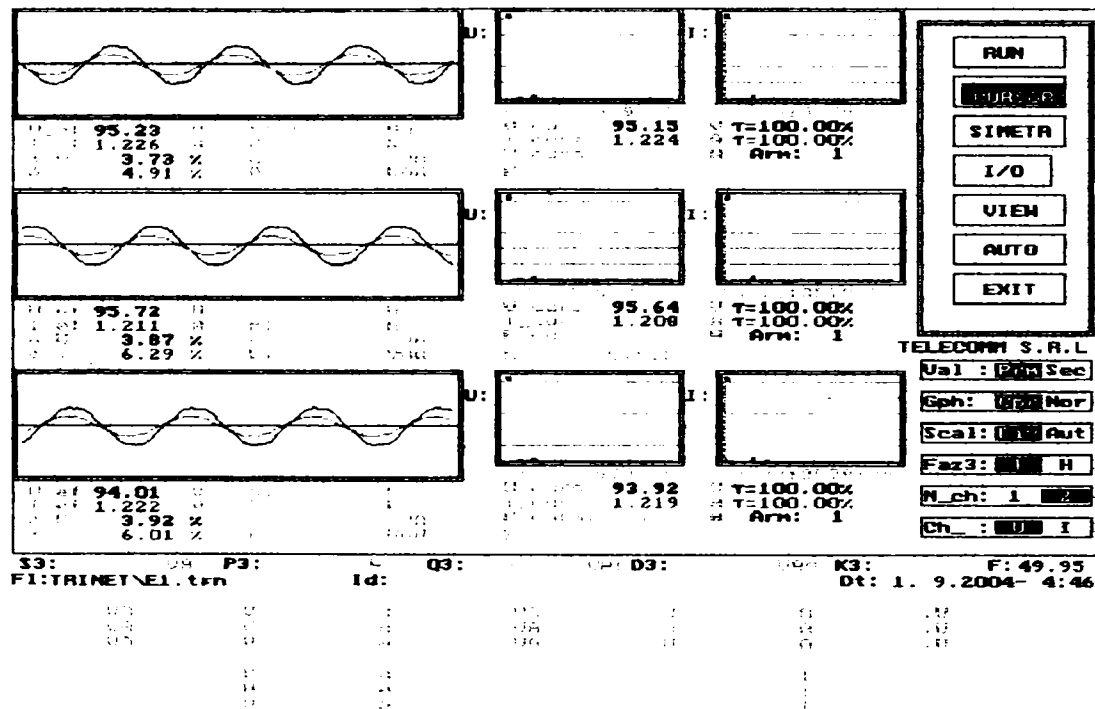


Fig. 17 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

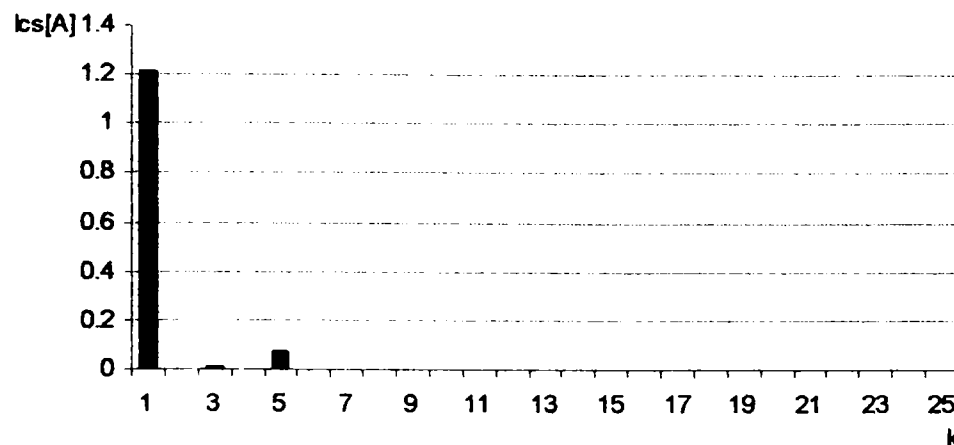
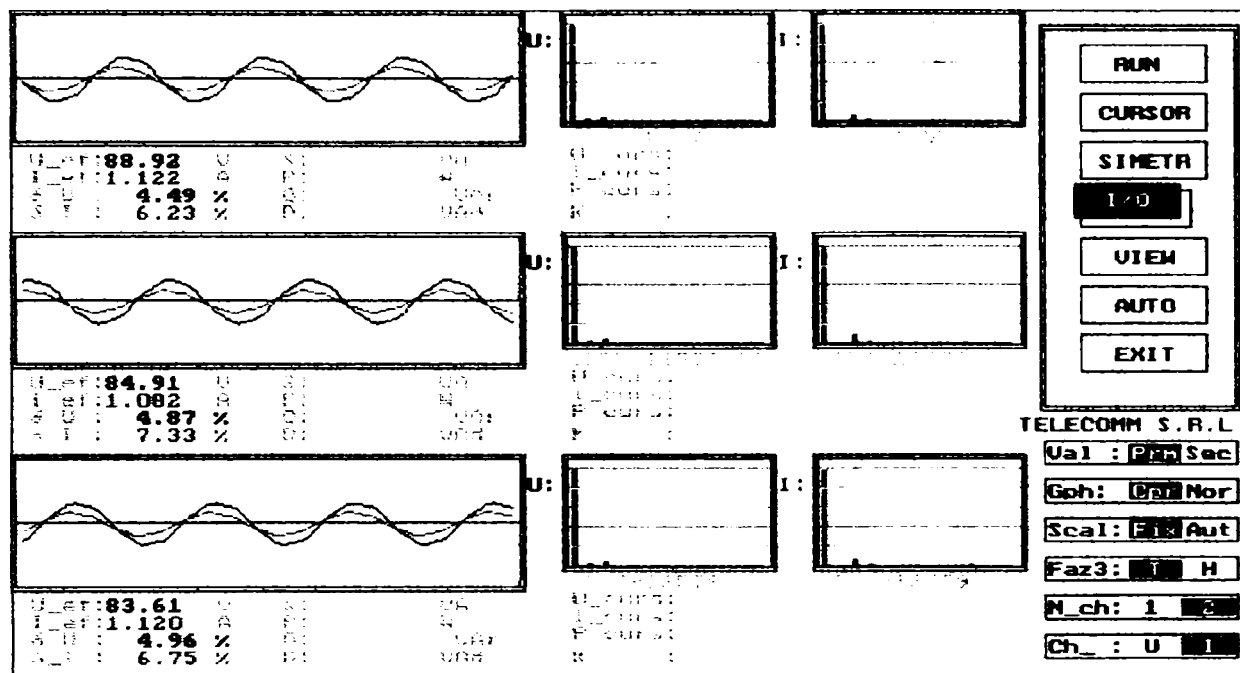


Fig. 18 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului

b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.

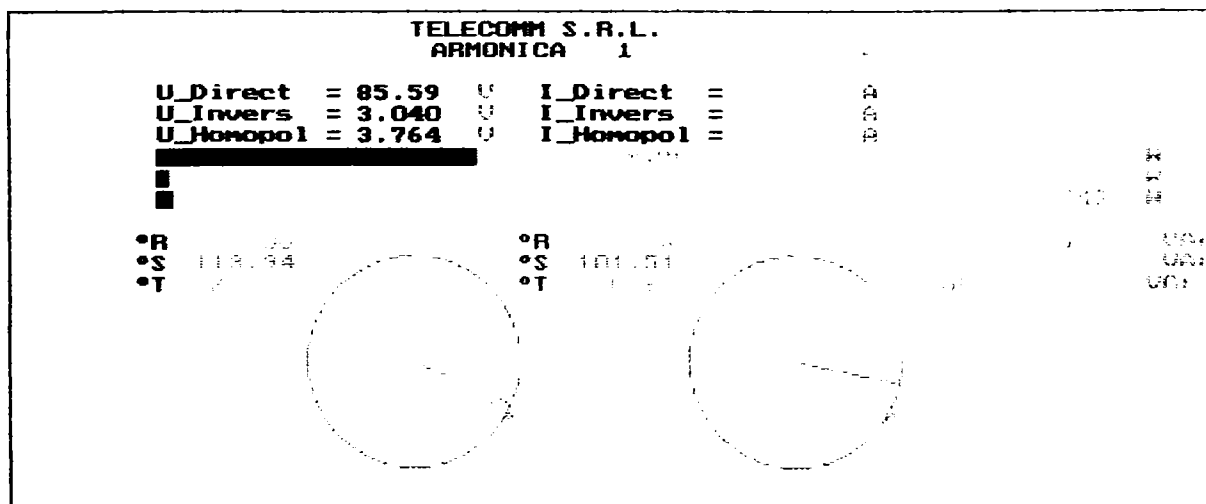
Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



S3: P3: H D3: K3: F: 49.95
 FI: TRINET\uccr3c.trn Id: Dt: 31. 8.2004-10:38

U0	U1	U2	I0	I1	I2
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(P11)
 (Q11)
 (D11)
 (I11)
 (S11)



Coef. nesim. inversa:	kns2(U) = 0.036	kns2(I) = 0.037
Coef. nesim. homop.:	kns0(U) = 0.044	kns0(I) = 0.014
Coef. total de nesim.:	knc(U) = 0.079	knc(I) = 0.051
Raport de nesimetrie:	rns(U) = 0.94	rns(I) = 0.96
Rap. dif. de nesim.:	knsd(U) = -0.062	knsd(I) = -0.037

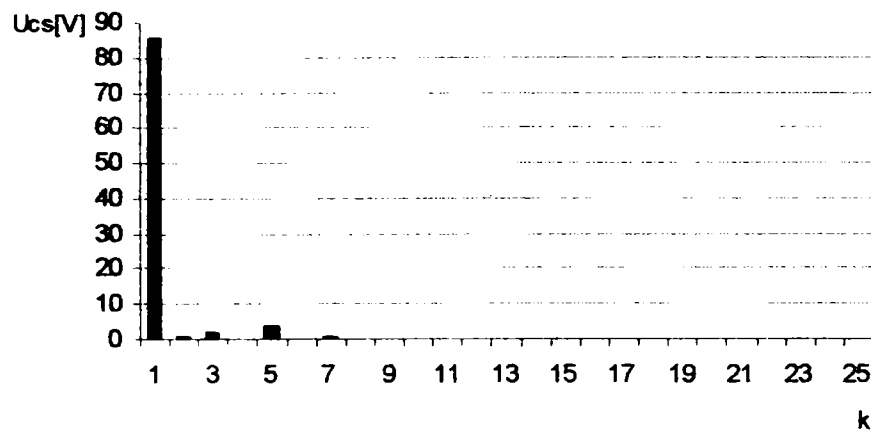


Fig.19 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului.

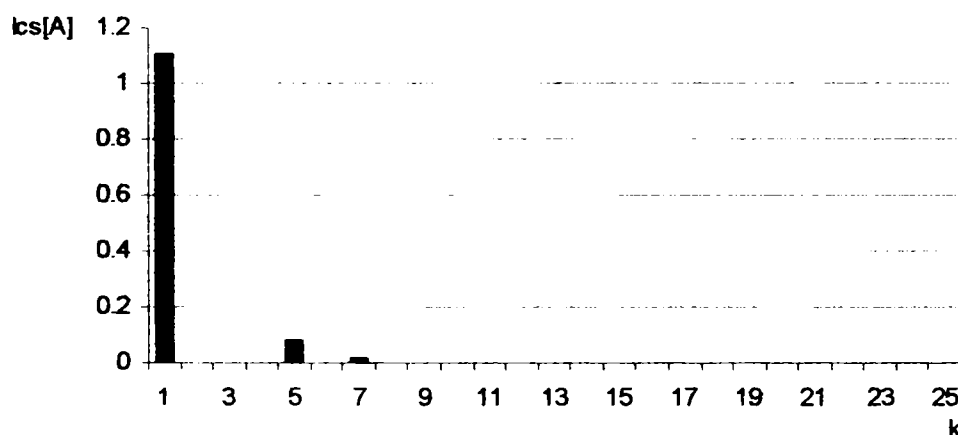
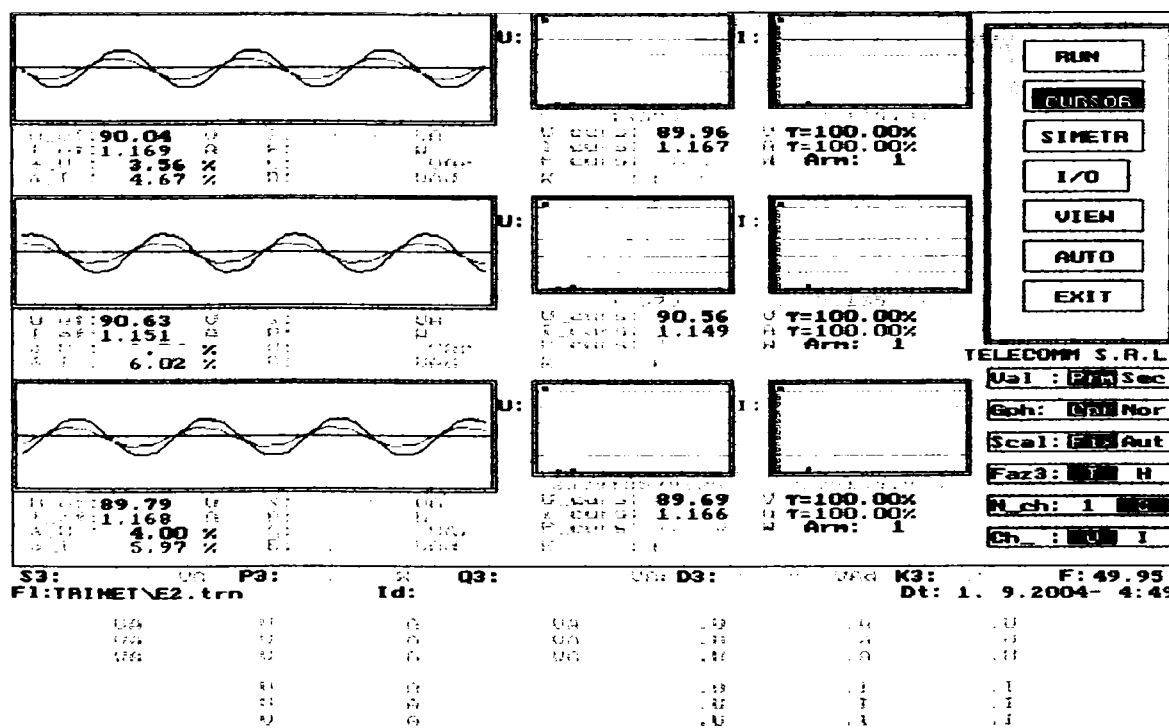


Fig.20 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

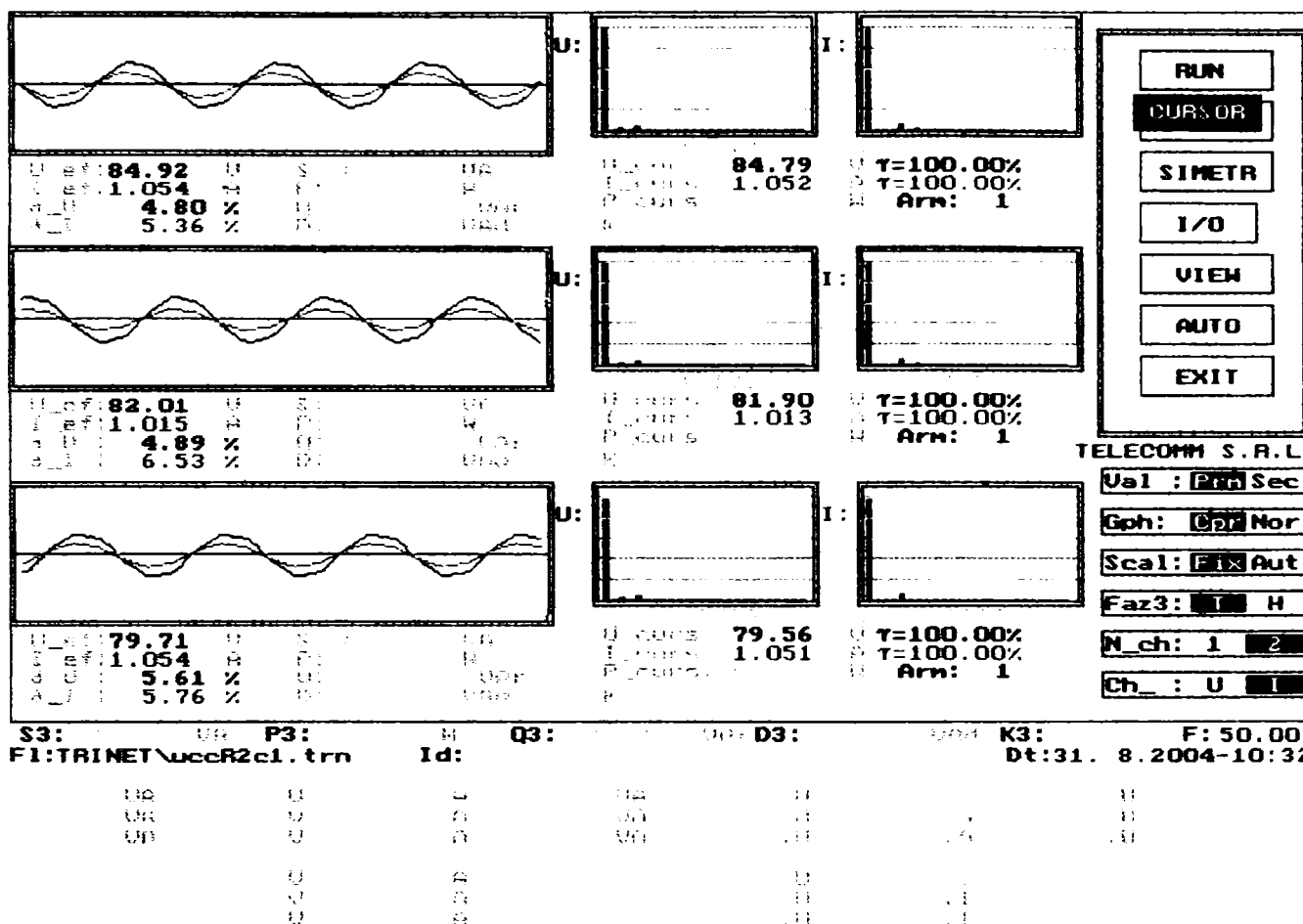
5.6. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=190V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 2,1$.(Consumatorul modelat prin rezistențe de 80Ω în paralel cu condensatoare, având capacitatea $11,25\mu F$)

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



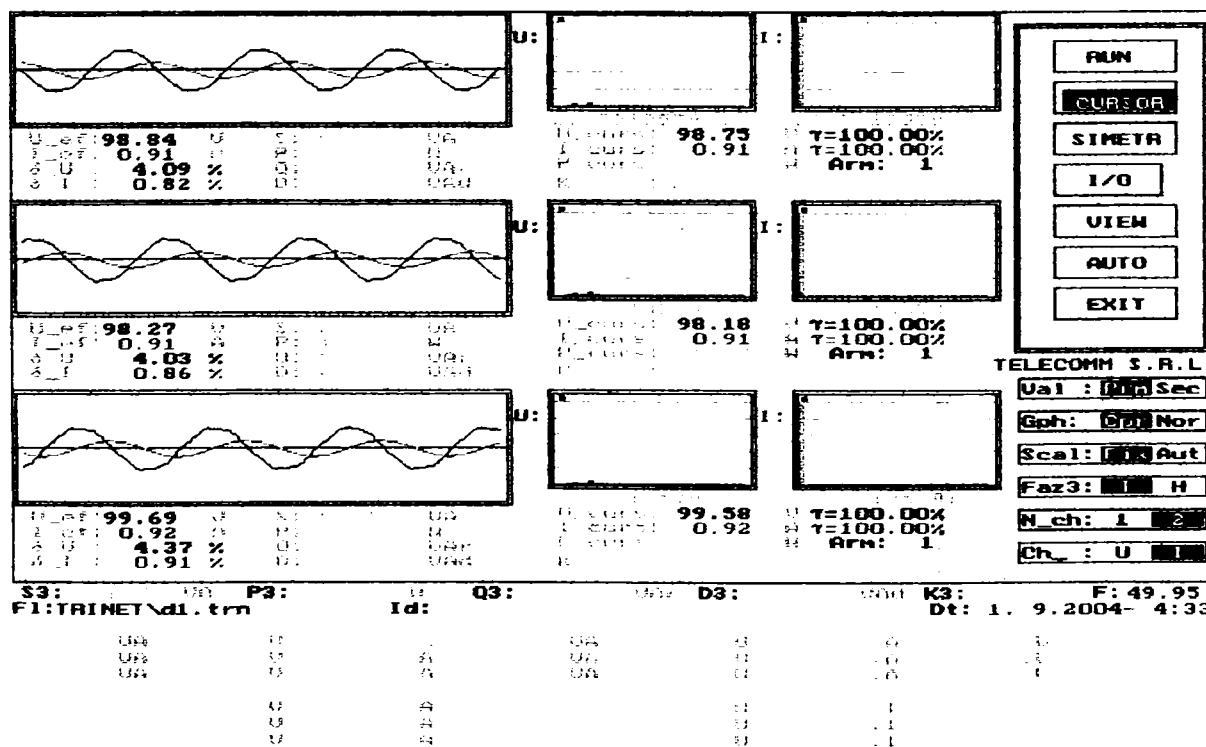
b) Linia prevăzută cu compensare $K_c=2,1$.

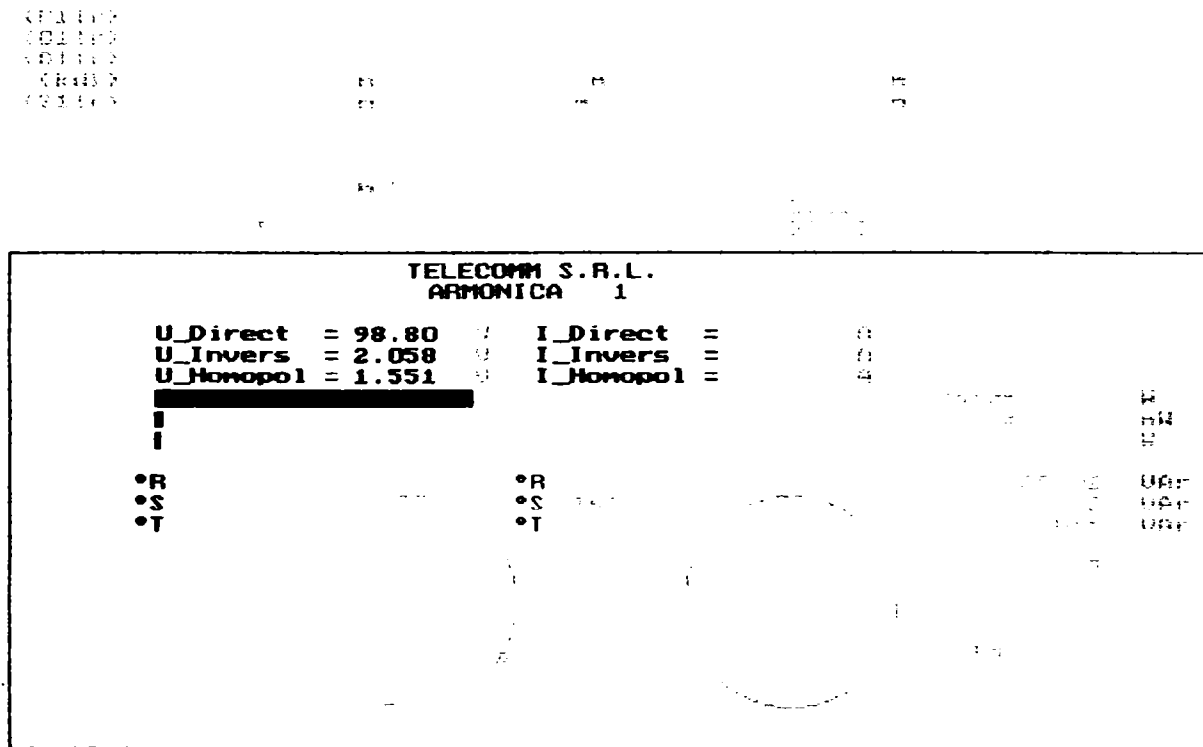


5.7. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $K_c = 2,1$. (Consumatorul pur inductiv)

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.





Clasf. armonici armonici	Armonici	0.021	Armonici	0.023
Clasf. nes in armonici	Armonici	0.016	Armonici	0.013
Clasf. total de nes in:	Armonici	0.037	Armonici	0.035
Armonici	Armonici	0.99	Armonici	0.98
Armonici	Armonici	0.014	Armonici	0.019

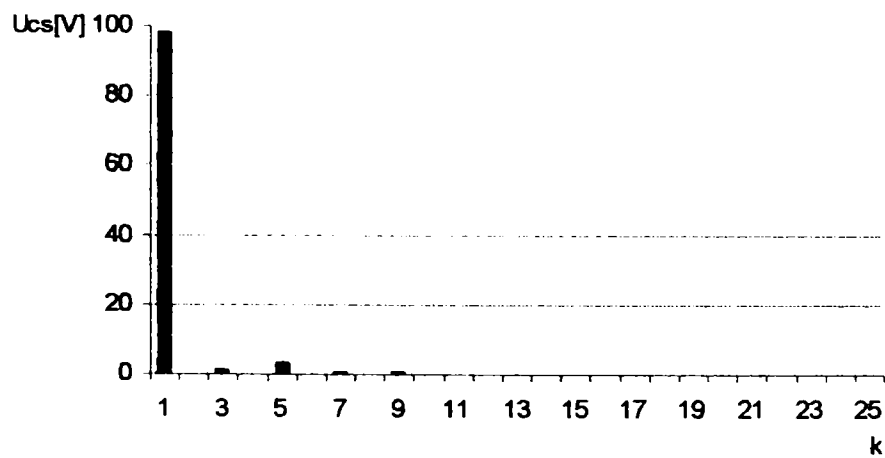


Fig.21 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

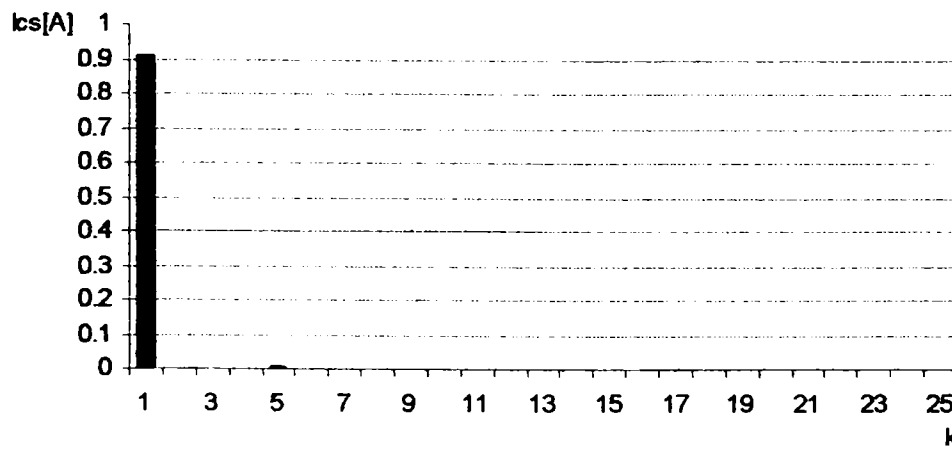


Fig.22 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

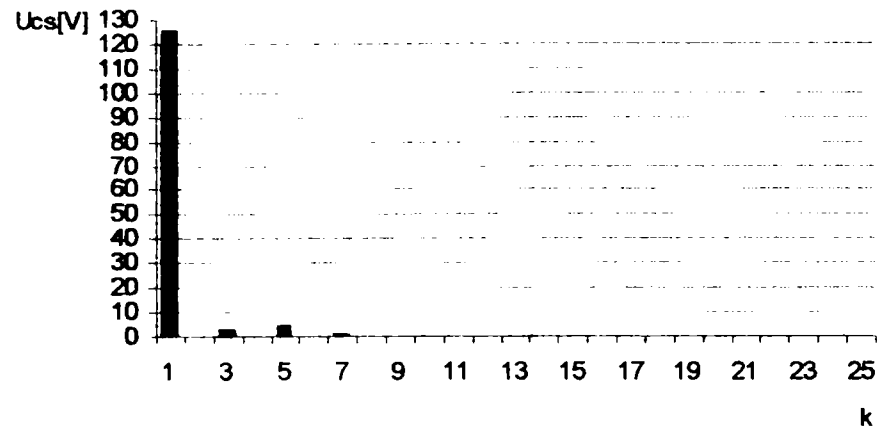


Fig.23 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului.

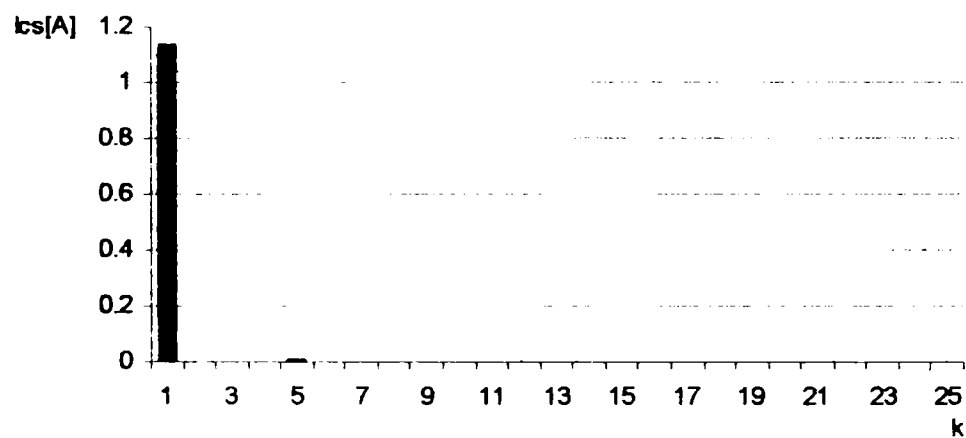
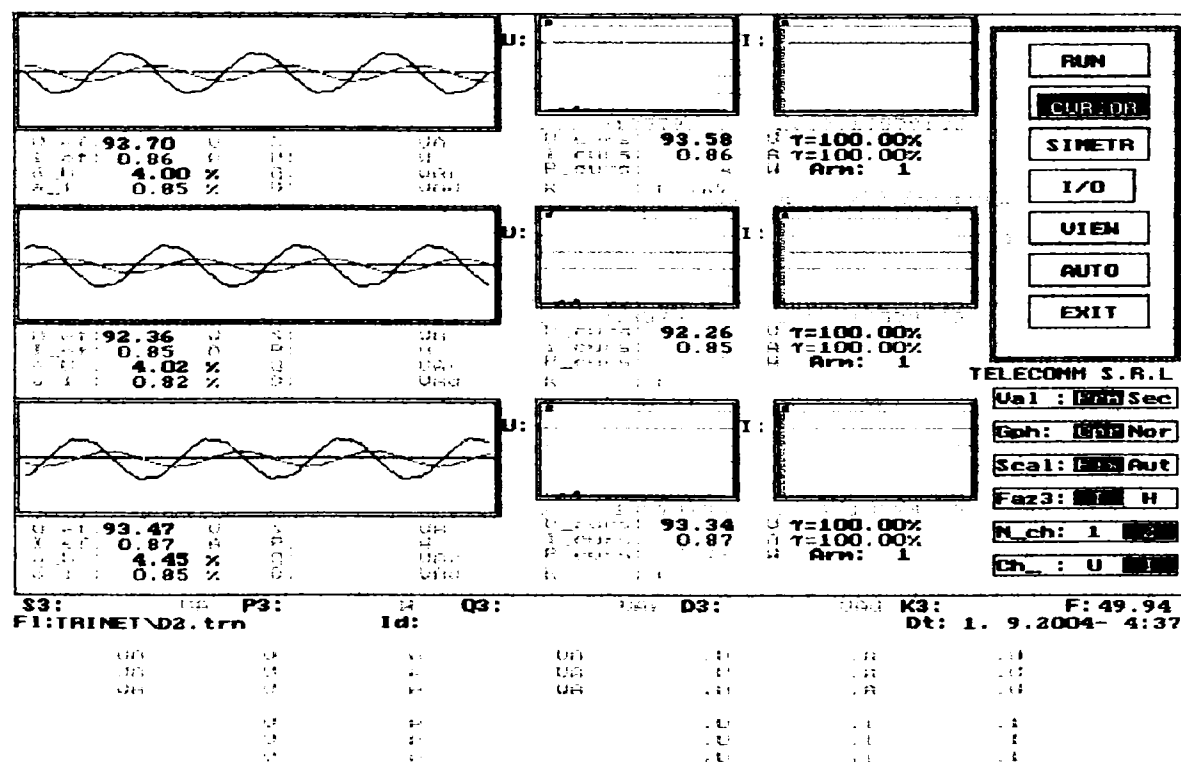


Fig.24 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

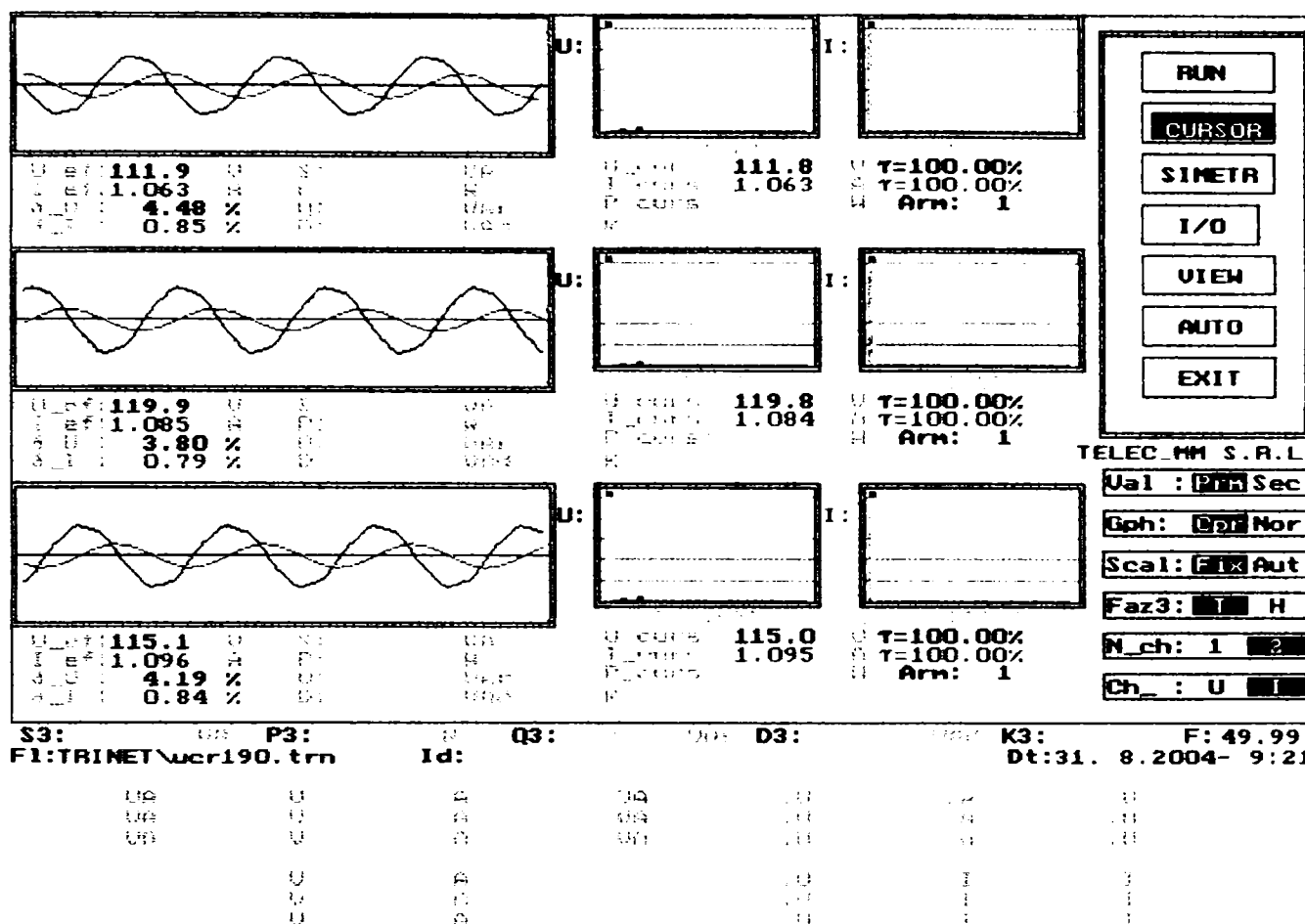
5.8. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=190V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 2,1$. (Consumatorul pur inductiv)

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



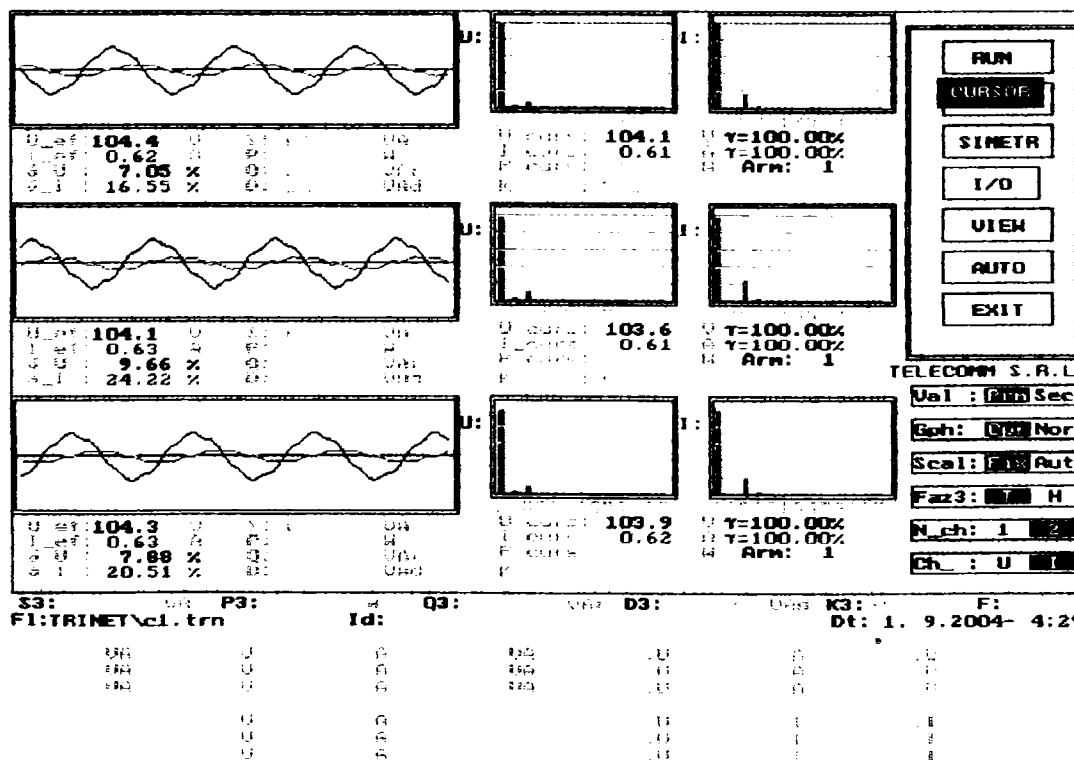
b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.



5.9. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $K_c = 2,1$. (Consumator inductiv prevăzut cu compensarea la borne $K_Q=0,389$)

a) Linia fără compensare

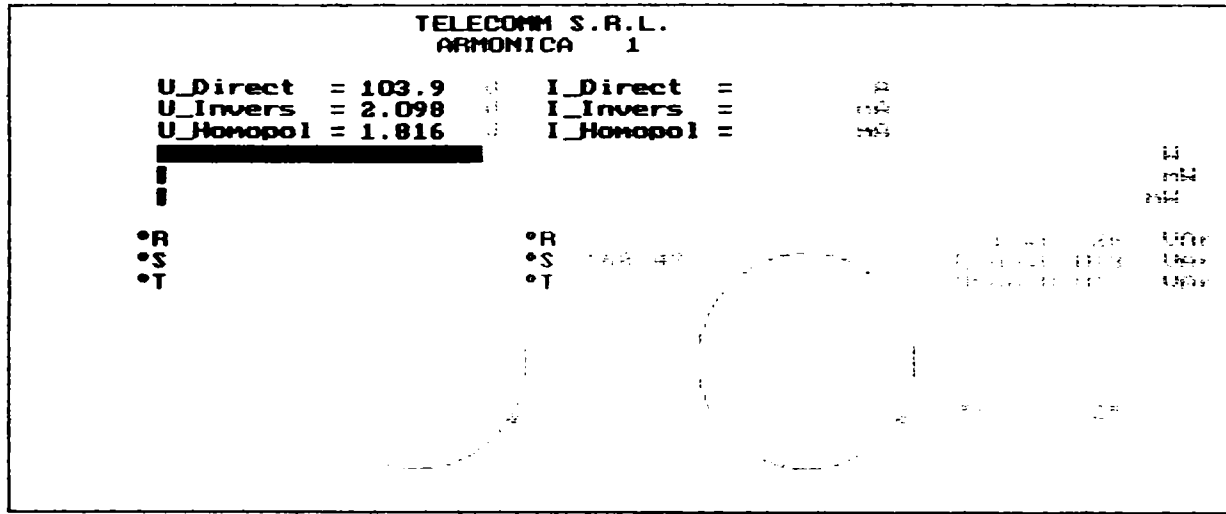
Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



(P111)
 (P112)
 (P113)
 (K11)
 (K12)

P1
 P2

P



U_{Direct} = 103.9 V
 U_{Invers} = 2.098 V
 U_{Monopol} = 1.816 V
 I_{Direct} = 0.020 A
 I_{Invers} = 0.017 A
 I_{Monopol} = 0.038 A
 cos φ = 0.99
 cos φ₁ = 0.99
 cos φ₂ = 0.99
 cos φ₃ = 0.99

U_{Direct} = 103.9 V
 U_{Invers} = 2.098 V
 U_{Monopol} = 1.816 V
 I_{Direct} = 0.020 A
 I_{Invers} = 0.017 A
 I_{Monopol} = 0.038 A
 cos φ = 0.99
 cos φ₁ = 0.99
 cos φ₂ = 0.99
 cos φ₃ = 0.99

U_{Direct} = 103.9 V
 U_{Invers} = 2.098 V
 U_{Monopol} = 1.816 V
 I_{Direct} = 0.020 A
 I_{Invers} = 0.017 A
 I_{Monopol} = 0.038 A
 cos φ = 0.99
 cos φ₁ = 0.99
 cos φ₂ = 0.99
 cos φ₃ = 0.99

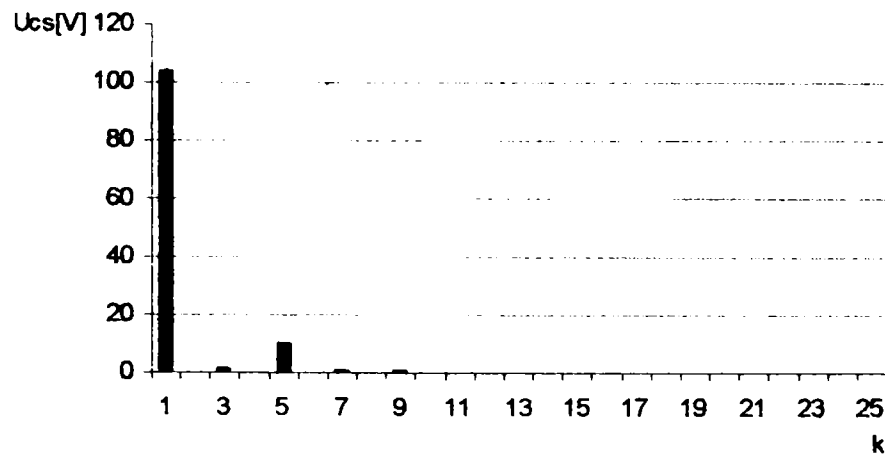


Fig.25 Spectrul armonicilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului

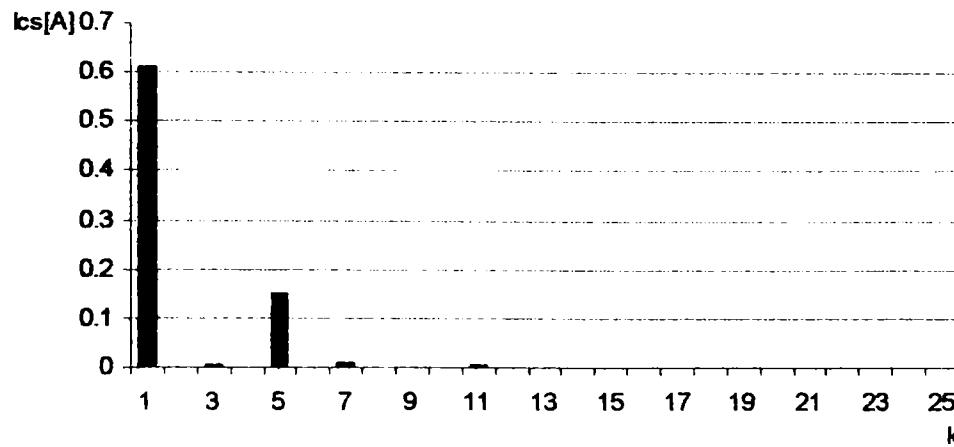
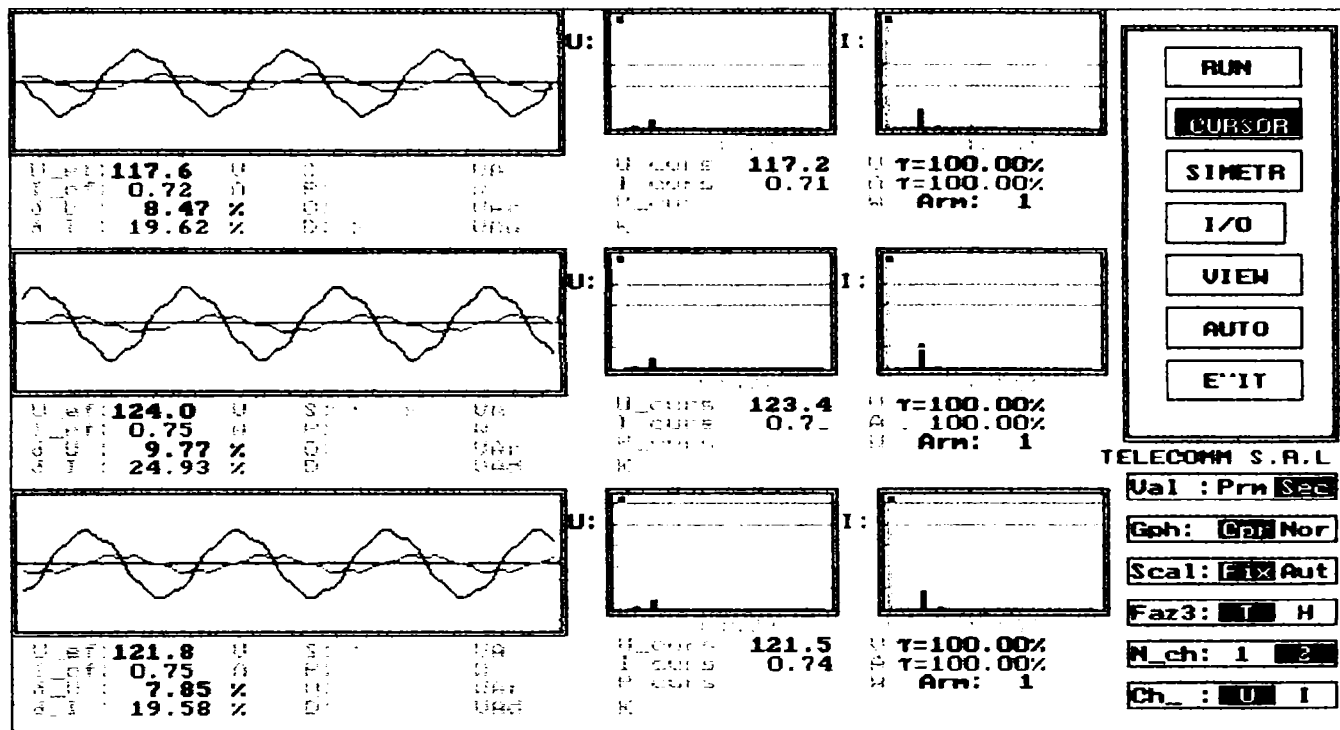


Fig.26 Spectrul armonicilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

b) Linia prevăzută cu compensare, $K_c = 2,1$.

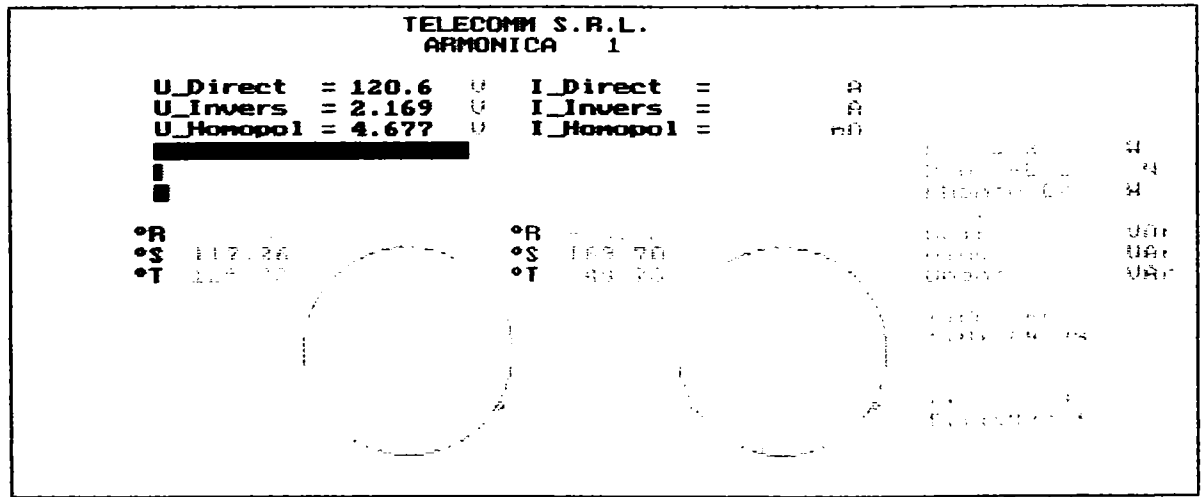
Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



S3: F1:TRINET\uebcc3.trm P3: Id: Q3: Ua3: D3: Ua4: K3: F: 49.93 Dt:31. 8.2004-10: 7

UA	U	A	UA	U	UA	U
UA	U	A	UA	U	UA	U
UA	U	A	UA	U	UA	U
	U	A		U		U
	U	A		U		U
	U	A		U		U

(P1U) (U1R) (D1R) (kdi) (S1R) (P1R) (U1R) (D1R) (kdi) (S1R) (P1R) (U1R) (D1R) (kdi) (S1R)



Coef. nesim. inversa:	kns2(U) = 0.018	kns2(I) = 0.026
Coef. nesim. homop.:	kns0(U) = 0.039	kns0(I) = 0.012
Coef. total de nesim.:	kns(U) = 0.057	kns(I) = 0.039
Raport de nesimetria:	rns(U) = 0.95	rns(I) = 0.96
Rap. dif. de nesim.:	knsd(U) = -0.051	knsd(I) = -0.042

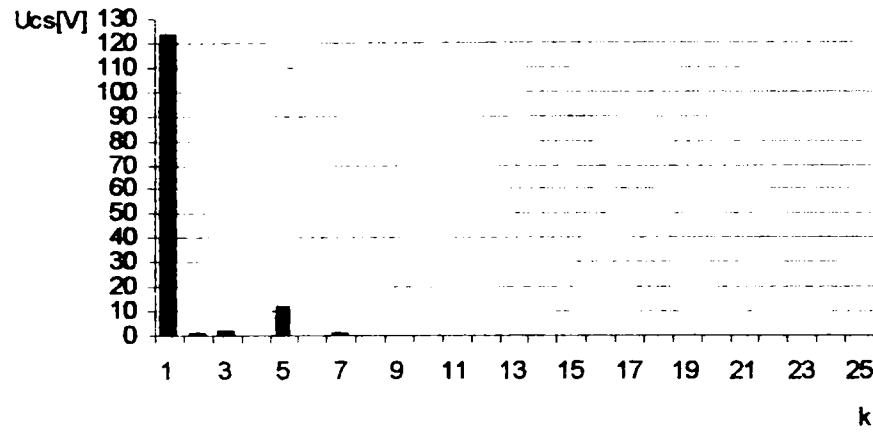


Fig.27 Spectrul armoniilor de tensiune pe faza S la bornele consumatorului.

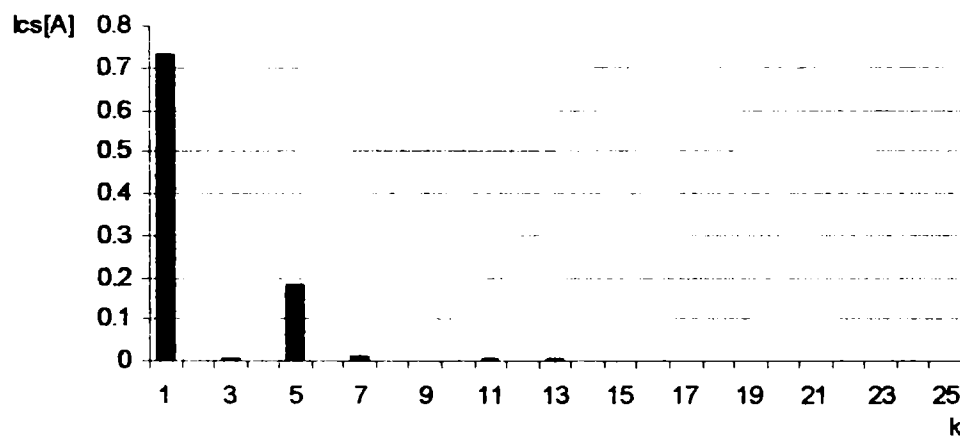
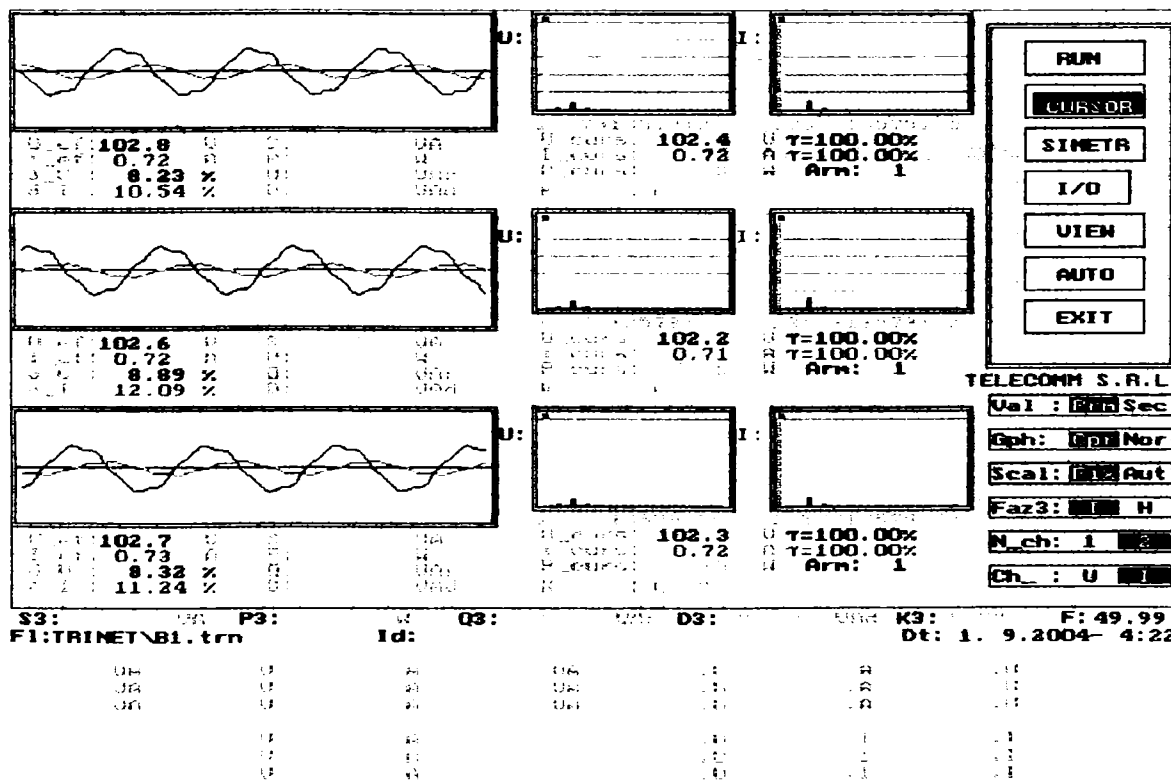


Fig.28 Spectrul armoniilor de curent pe faza S la bornele consumatorului.

5.10. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 2,1$. (Consumator inductiv prevăzut cu compensarea la borne $K_Q=0,259$)

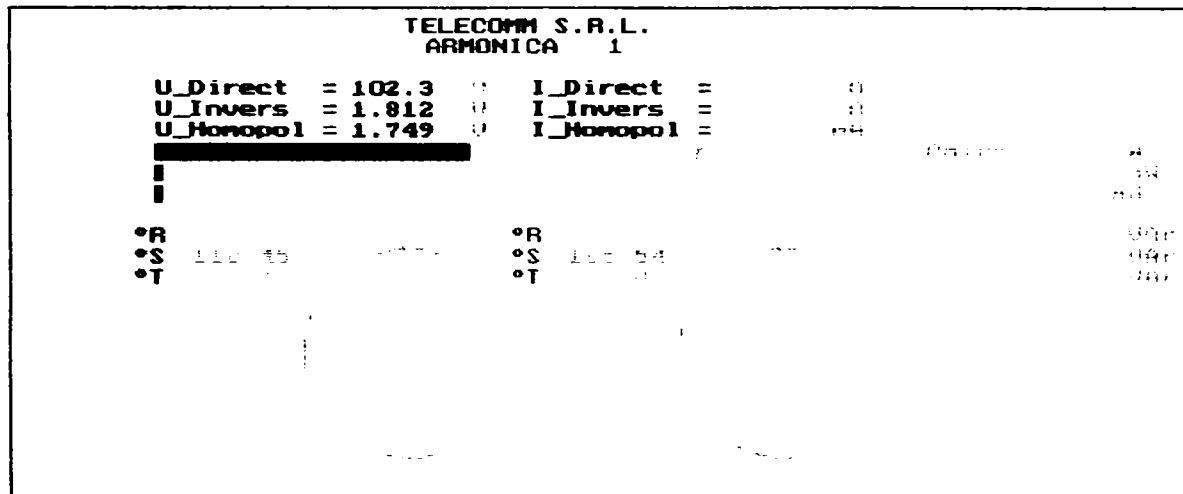
a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



U1=100
U2=100
U3=100
U4=100
U5=100

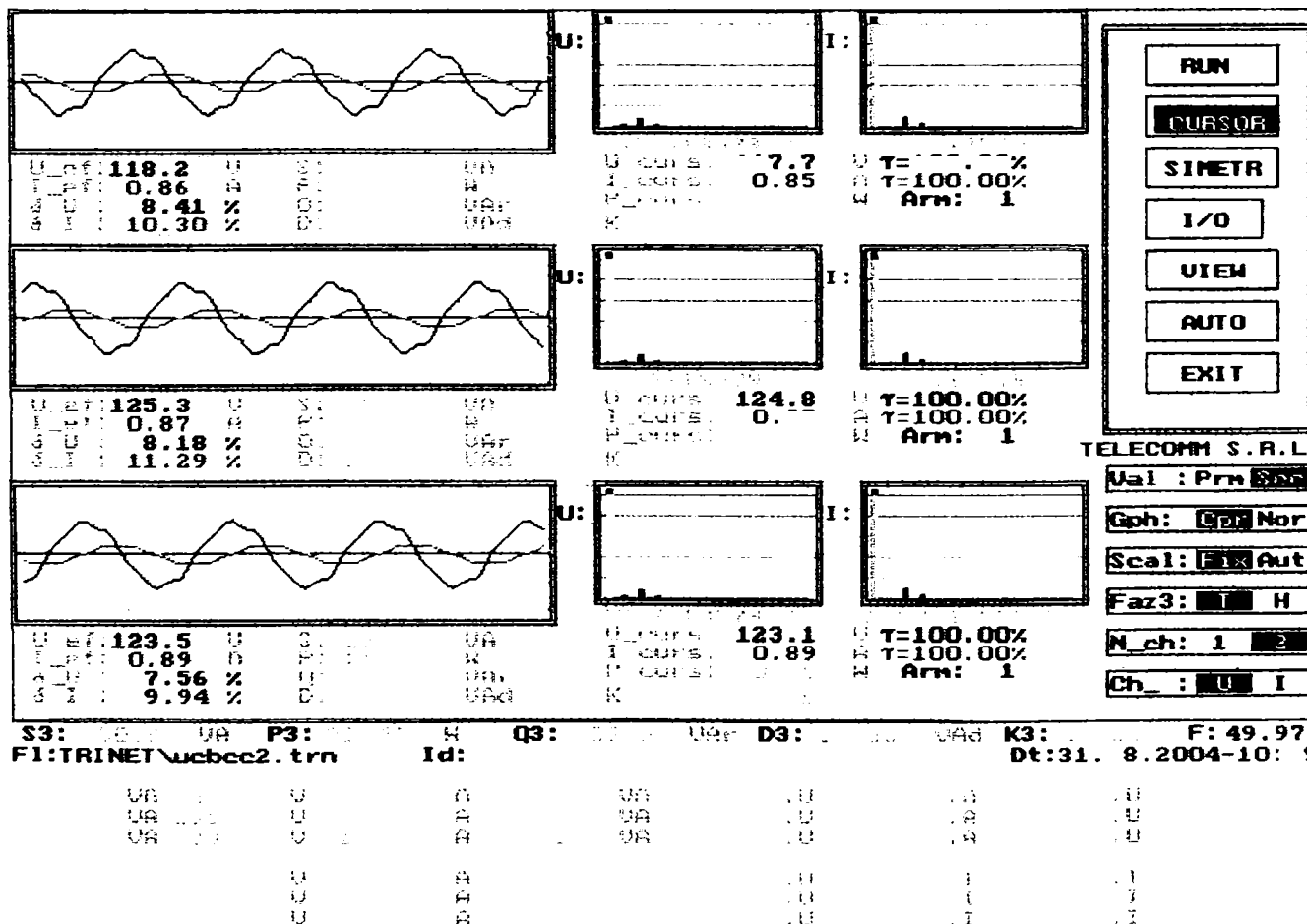
U1=100
U2=100
U3=100
U4=100
U5=100

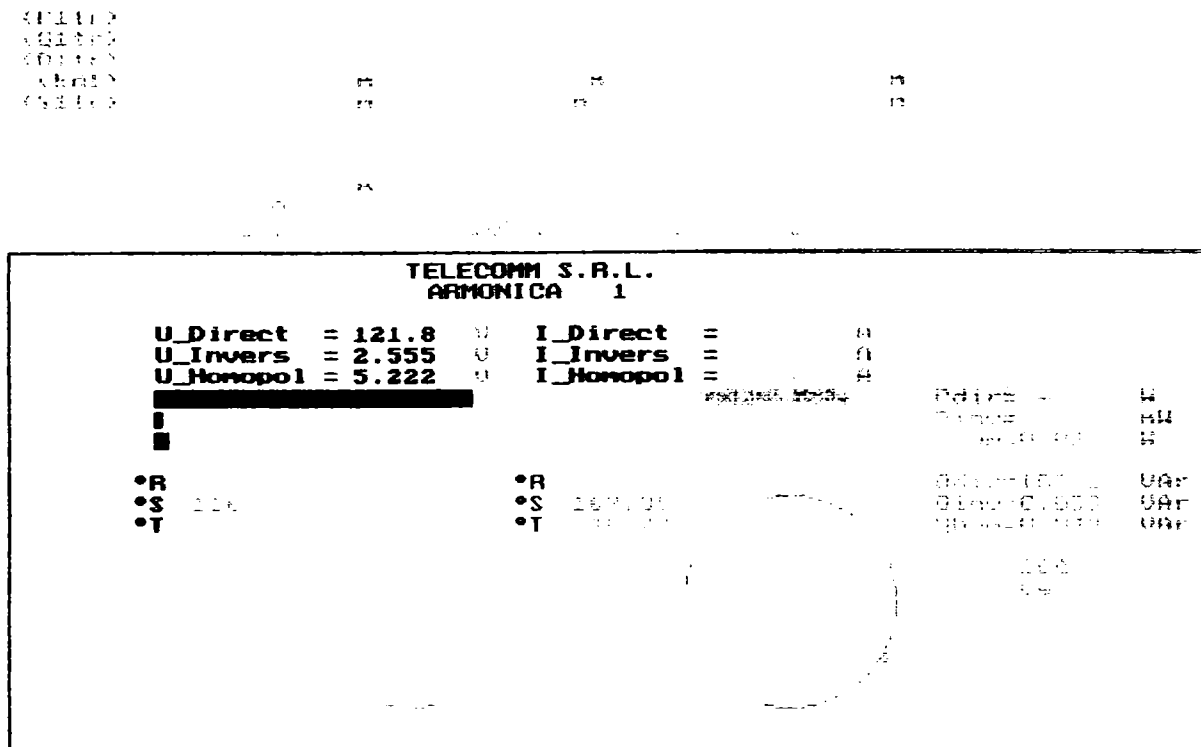


Coef. nesim. inversa:	kn2(I) = 0.018	kn2(U) = 0.018
Coef. nesim. homop.:	kn0(U) = 0.017	kn0(I) = 0.012
Coef. total de nesim.:	kn0(U) = 0.035	kn0(I) = 0.030
Raport de nesim. vol:	kn0(I) = 1.00	kn0(U) = 0.99
Rap. dat. de nesim.:	kn0(U) = 1.7	kn0(I) = 0.012

b) Linia prevăzută cu compensare, Kc = 2,1.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.





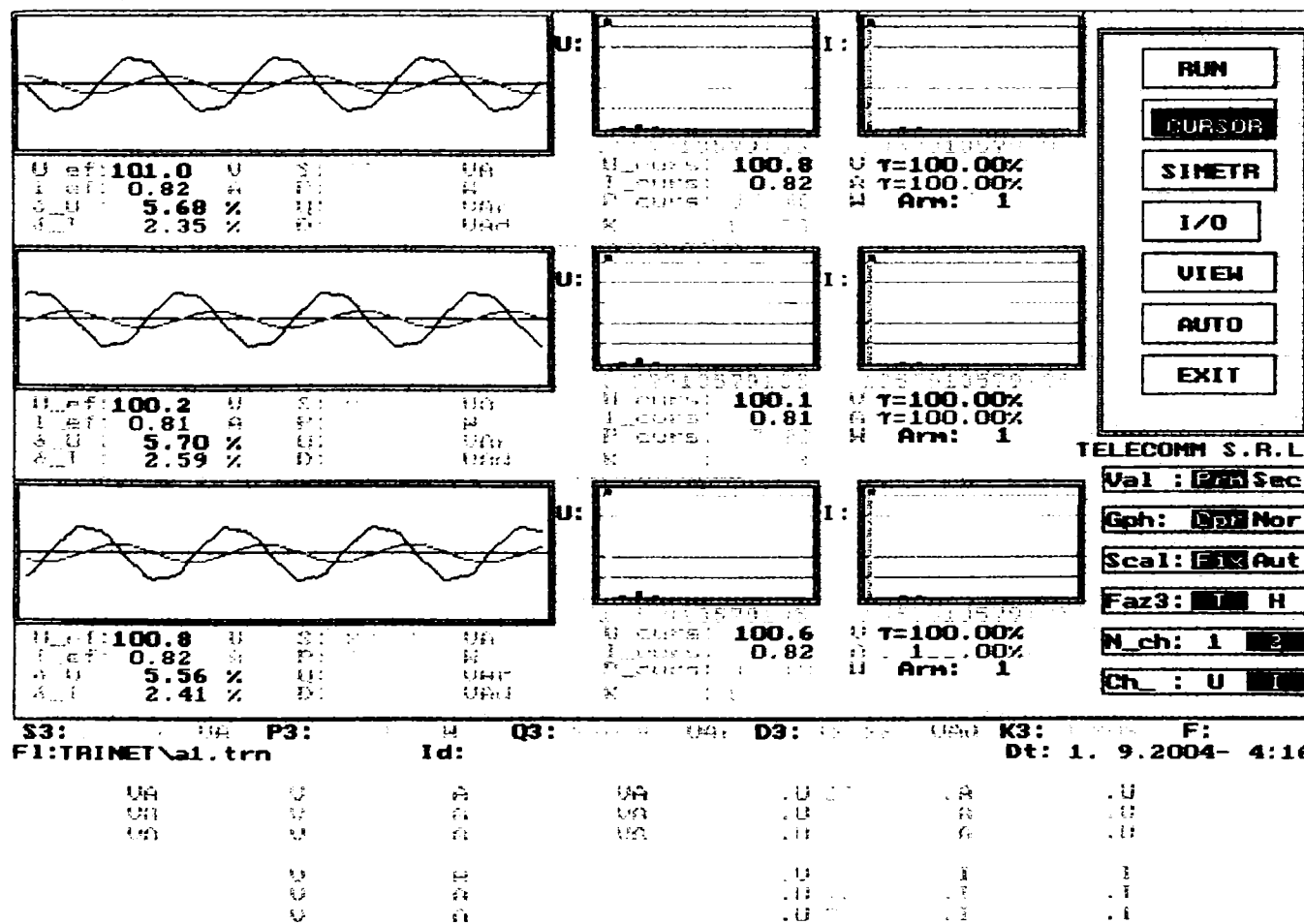
Coef. de nesim. total: kns2(1) = 0.021
 Coef. nesim. homopol.: kns0(1) = 0.043
 Coef. total de nesim: kns1(1) = 0.064
 Regula de compensare: knc(1) = 0.94
 Raport de compensare: kncd(1) = -0.059

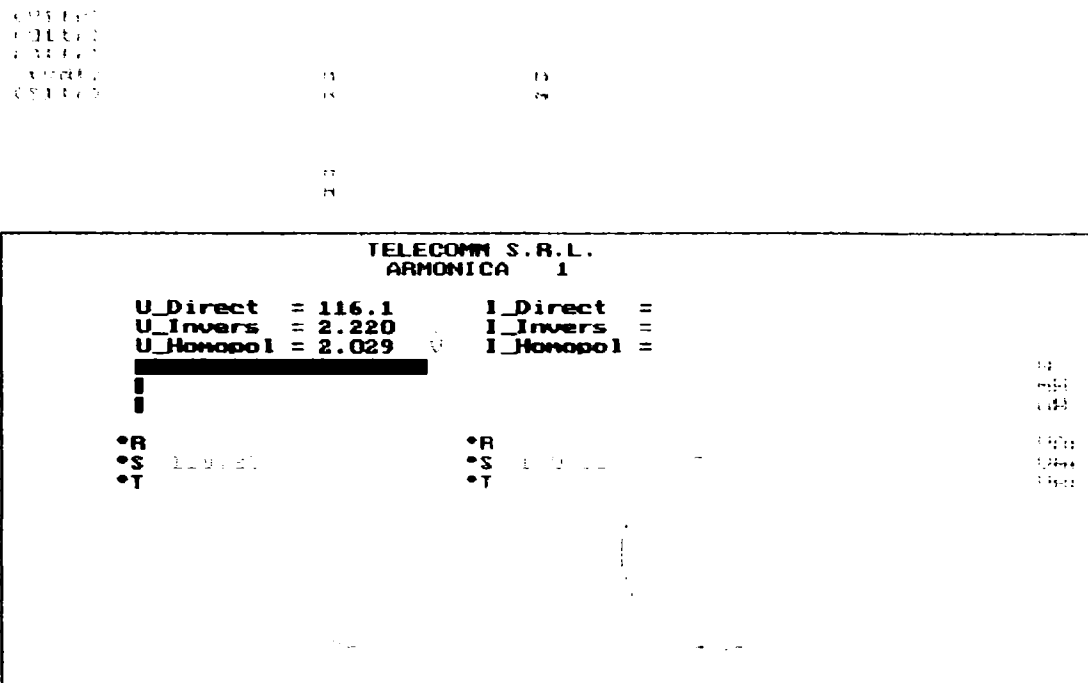
kns2(1) = 0.027
 kns0(1) = 0.012
 kns1(1) = 0.039
 knc(1) = 0.96
 kncd(1) = 0.038

5.11. Alimentarea modelului cu tensiune $U_{RS}=200V$ și înregistrarea tensiunilor și curenților la bornele consumatorului, în cazul liniei fără compensare, respectiv cu compensare capacitivă serie $Kc = 2,1$. (Consumator inductiv prevăzut cu compensarea la borne $K_Q=0,129$)

a) Linia fără compensare

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.

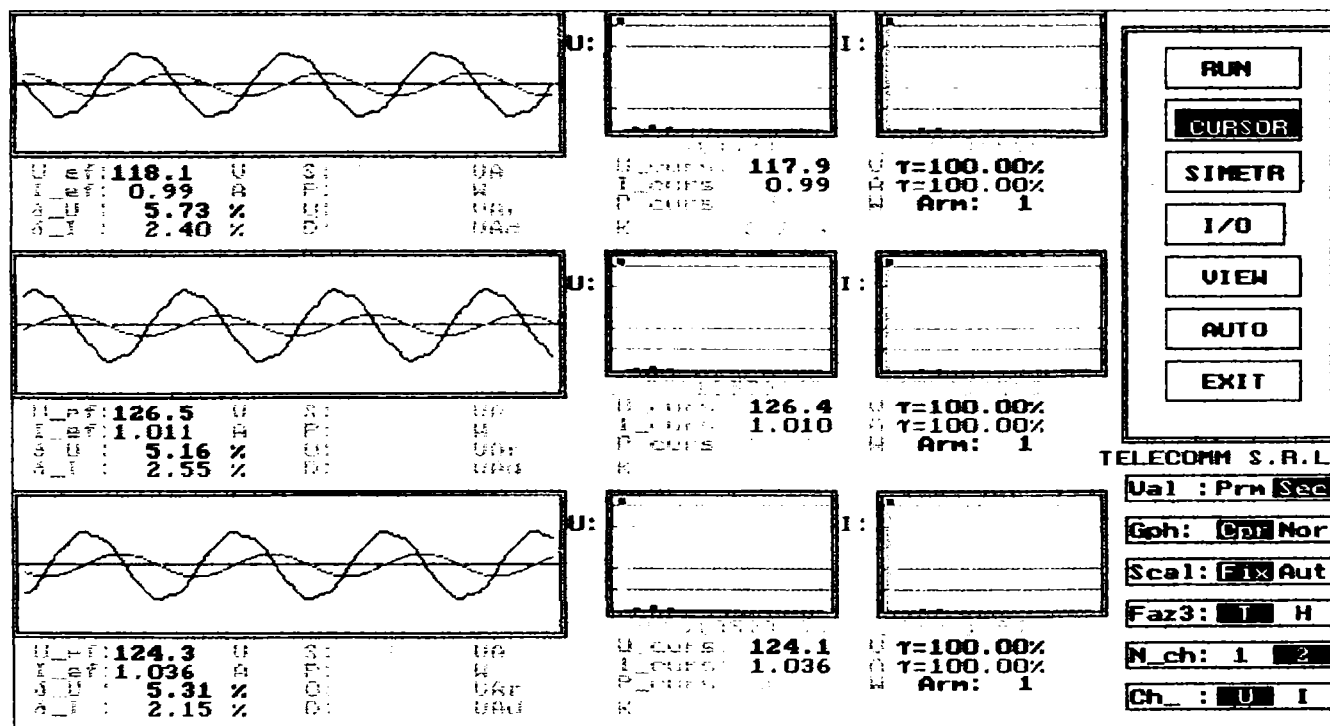




Coef. restanță inversă	0.019	Coef. restanță inversă	0.020
Coef. restanță homopol	0.017	Coef. restanță homopol	0.012
Coef. total de restanță	0.037	Coef. total de restanță	0.033
Raport de nesimetrie	0.98	Raport de nesimetrie	0.98
Dep. de la normă	0.022	Dep. de la normă	0.015

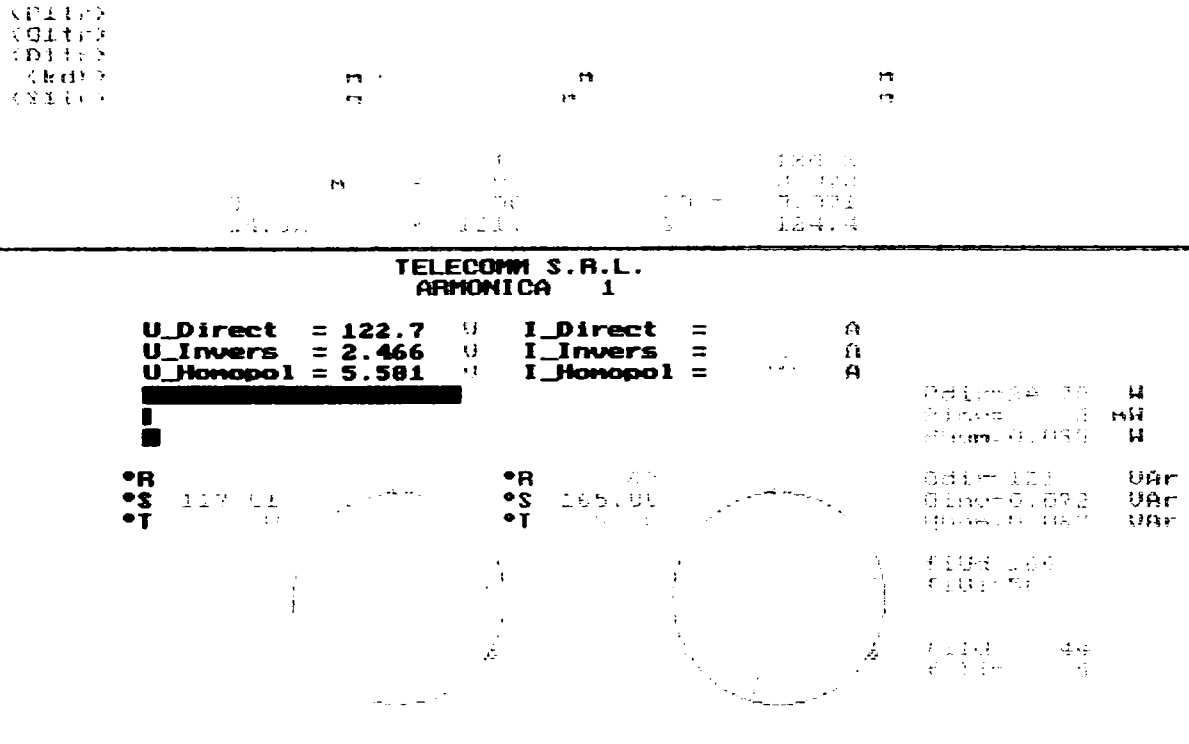
b) Linia prevăzută cu compensare, Kc = 2,1.

Vizualizarea mărimilor achiziționate la bornele consumatorului.



S3: UA P3: W Q3: UAφ D3: UAφ K3: F: 49.93
F1:TRINET\ubcc1.trn Id: Dt:31. 8.2004-10:12

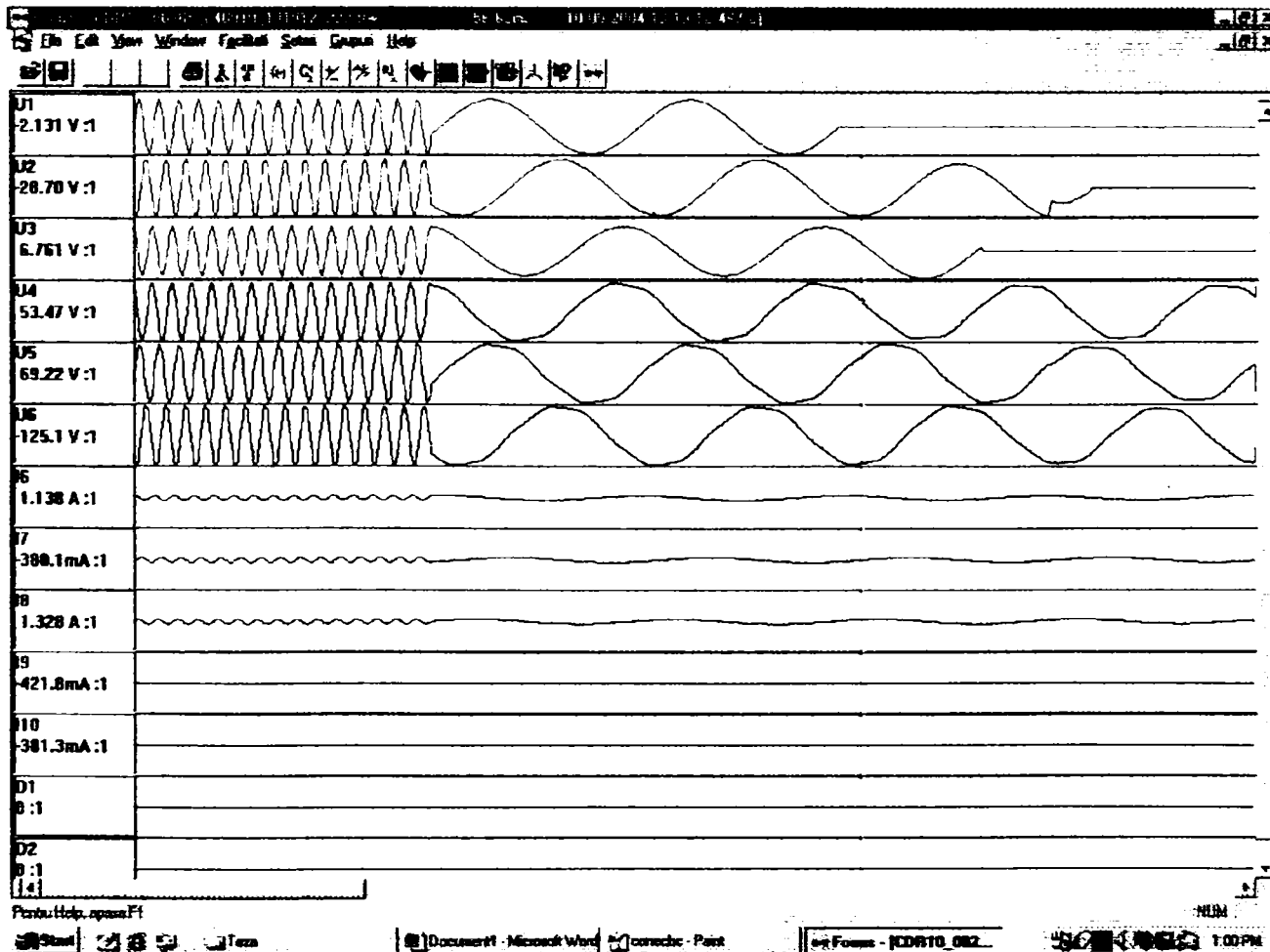
UA	U	A	UA	UA	UA	UA	UA
UB	U	A	UB	UB	UB	UB	UB
UC	U	A	UC	UC	UC	UC	UC
	U	A	U	U	U	U	U
	U	A	U	U	U	U	U
	U	A	U	U	U	U	U



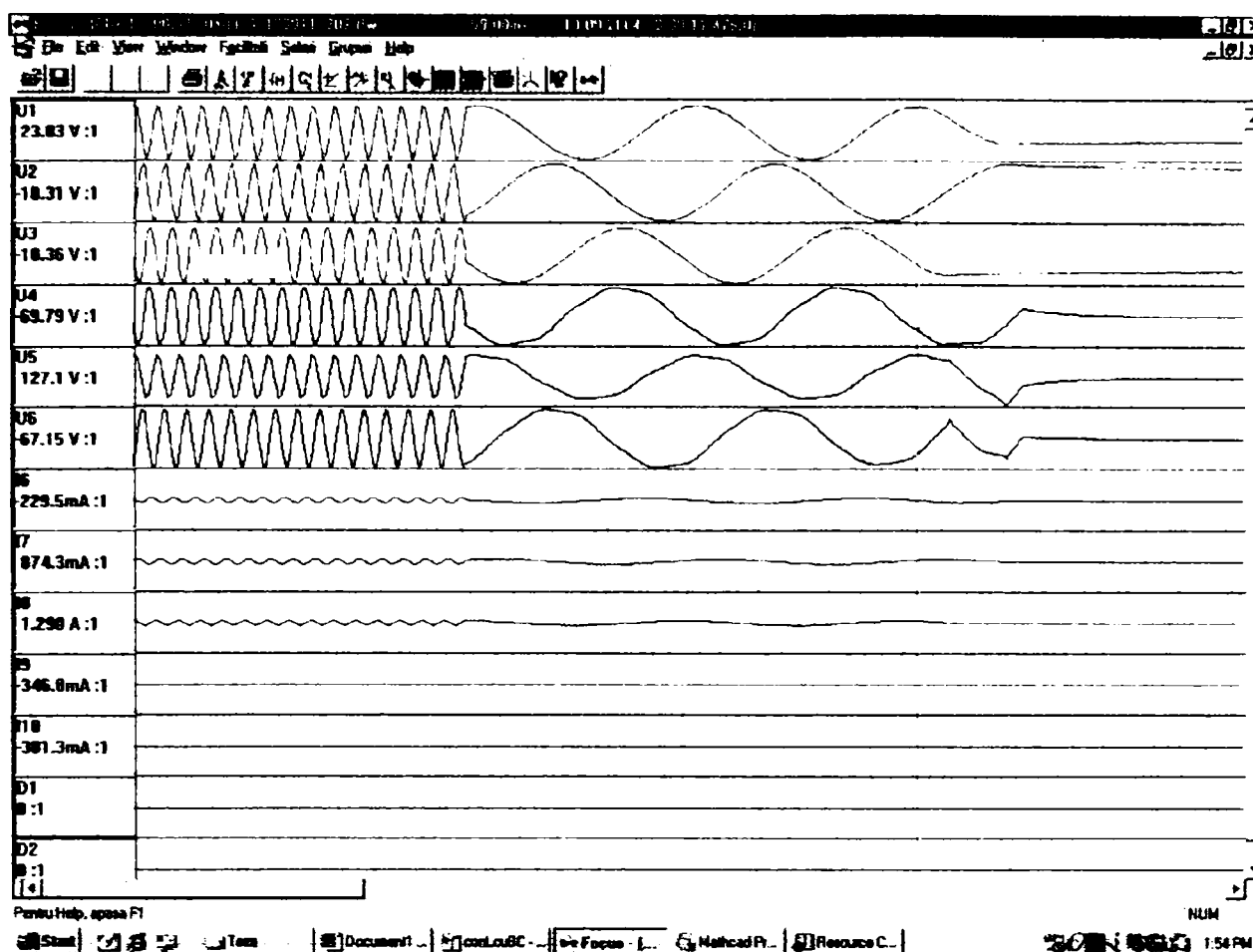
Coef. nesim. inversat:	kns2(I) = 0.020	kns2(U) = 0.029
Coef. nesim. homop.:	kns0(I) = 0.045	kns0(U) = 0.013
Coef. total de nesim:	kns(U) = 0.066	kns(I) = 0.042
Raport de similitudin:	ns(I) = 0.93	ns(U) = 0.96
Raport de similitudin:	nsd(I) = 0.069	nsd(U) = 0.042

Înregistrări realizate cu CDR la deconectarea bateriei de condensatoare, respectiv la deconectarea liniei compensate $K_c=1,05$, în cazul scurtcircuitelor trifazate. Simulările sunt realizate pe modelul rețelei din laborator.

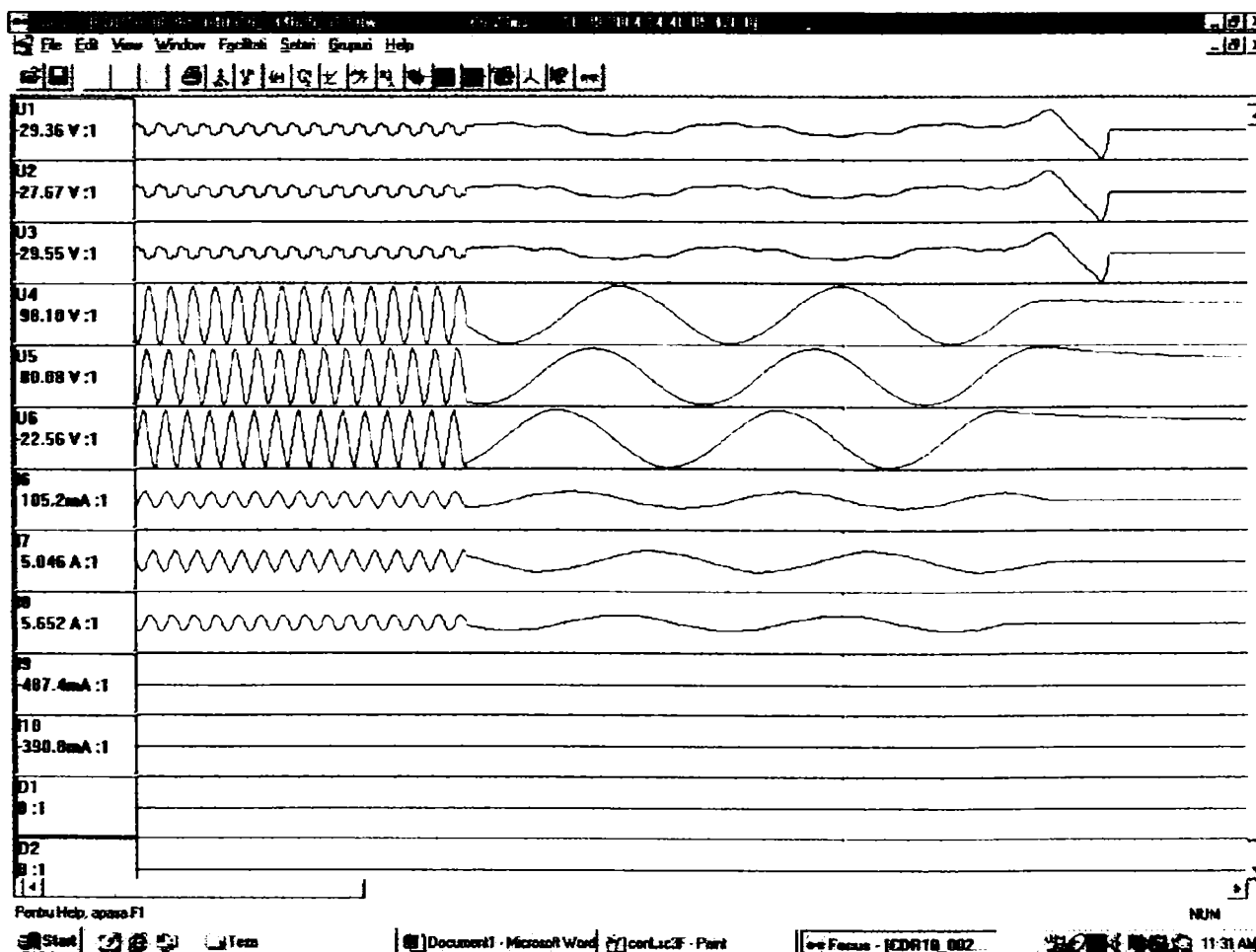
a) Deconectarea bateriei de condensatoare



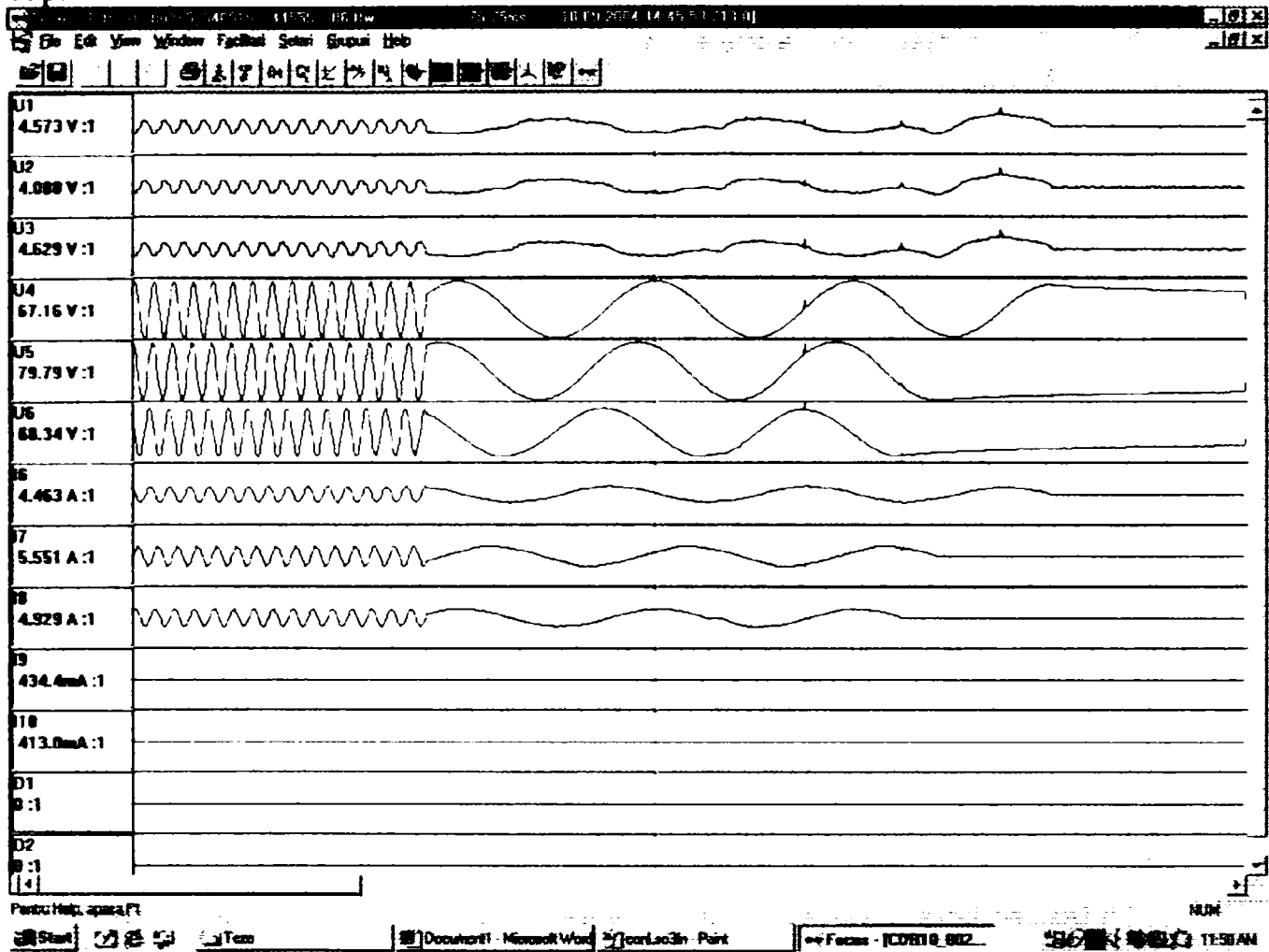
b) Deconectarea liniei prevăzută cu compensarea capacitivă serie.



c) Deconectarea liniei prevăzută cu compensarea capacitivă în cazul unui scurtcircuit 3F după baterie.



d) Deconectarea liniei prevăzută compensare capacitivă serie la un scurtcircuit 3FN după baterie



Anexa 6.1

Tabelul A .6.1. Baza de date folosită pentru calculul tensiunilor și puterilor în noduri

NOD	I_n [A]	I_r [A]	R_L [Ω]	X_L [Ω]
1	2.528	0.595	1.1372	1.28504
2	0.46	0.195	0.2646	0.32046
3	2.521	0.623	0.10395	0.112589
4	2.528	0.593	0.0567	0.06867
5	2.528	0.593	0.108	0.1308
6	0.142	0.106	0.081	0.0981
7	2.528	0.595	0.5238	0.63438
8	2.528	0.593	0.1944	0.23544
9	4.856	1.718	0.0567	0.06867
10	2.528	0.623	0.0756	0.09156
11	0.473	0.162	1.2409	1.278779
12	5.675	2.354	1.66	0.73
13	0.142	0.141	0.1494	0.0657
14	0.359	0.177	2.3897	1.05485
15	0.867	0.974	0.0664	0.0292
16	1.659	0.768	2.2194	0.97601
17	5.076	1.399	0.6972	0.3066
18	1.67	0.944	1.1725	0.62475
19	0.483	0.13	3.4029	1.91702
20	1.43	0.451	0.126	0.071
21	0.966	0.26	2.016	1.1368
22	0.957	0.289	0.0882	0.04976
23	1.44	0.416	0.3024	0.17042
24	0.92	0.39	0.19845	0.11825
25	1.263	0.7186	4.1706	2.35018
26	0.446	0.226	2.0015	1.12786
27	1.896	0.638	1.18062	0.66527
28	2.317	0.932	1.91355	0.8866
29	1.876	0.677	0.083	0.0365
30	0.42	0.24	0.8051	0.35405
31	2.422	0.537	4.3907	1.93085
32	0.462	0.19	0.6796	0.3704
33	0.446	0.226	0.72542	0.31901
34	0.851	0.289	1.90319	0.836945
35	0.466	0.18	0.4233	0.18615
36	0.446	0.226	1.494	0.6572
37	0.997	0.8811	2.10156	0.92418
38	6.433	1.666	2.87512	1.26436
39	1.415	0.475	3.90678	3.06642
40	2.666	0.909	2.7968	2.1956
41	0.483	0.13	0.39767	0.31213
42	0.467	0.1792	1.5747	0.7332
43	0.446	0.226	0.0581	0.02555
44	0.46	0.195	0.2158	0.0949
45	0.48	0.19	0.18675	0.082125

Tabelul A.6.2. Posturile de transformare alimentate prin linii de ramificație de la fiderul principal LEA Urseni-Silagiu-Bacova-Surgani

Nr. crt.	Postul de transformare	S_{nT} [kVA]	I [A]	I_s [A]	I_r [A]	R_{nT} [Ω]	X_{nT} [Ω]	δP [W]	δQ [Var]	ΔP [W]	ΔQ [Var]	ΔP_T [W]	ΔQ_T [Var]
1.	Chisoda com *	160	2.5	2.42	0.61	42.58	100	500	3680	798.39	1875	1298.38	5555
2.	Chisoda CAP	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.94	75	531.94	3755
3.	Chisoda com I	250	2.5	2.40	0.69	20.8	96	650	4750	390	1800	1040	6550
4.	Chisoda com II	100	2.5	2.41	0.66	70	160	320	2500	1312.5	3000	1632.5	5500
5.	Chisoda com IV	100	2.5	2.41	0.66	70	160	320	2500	1312.5	3000	1632.5	5500
6.	Polig Chisoda	100	0.1	0.04	0.09	70	160	320	2500	2.1	4.8	322.1	2504.8
7.	Polig Chisoda	50	0.1	0.08	0.06	246.25	400	185	1200	7.39	12	192.39	1212
8.	Giroc Com IV	160	2.5	2.41	0.66	42.58	100	500	3680	798.39	1875	1298.38	5555
9.	Giroc Com I	160	2.5	2.41	0.66	42.58	100	500	3680	798.39	1875	1298.38	5555
10.	Giroc Com II	160	2.5	2.41	0.66	42.58	100	500	3680	798.39	1875	1298.38	5555
11.	Giroc Timis	250	2.5	2.40	0.69	20.8	96	650	4750	390	1800	1040	6550
12.	Giroc Com III	250	2.5	2.40	0.69	20.8	96	650	4750	390	1800	1040	6550
13.	Rudicica	100	0.5	0.47	0.18	70	160	320	2500	52.5	120	372.5	2620
14.	Urseni Com II	160	1	0.95	0.32	42.58	100	500	3680	127.74	300	627.74	3980
15.	Urseni Com I	250	1	0.94	0.35	20.8	96	650	4750	62.4	288	712.4	5038
16.	Urseni FIV	250	0.25	0.16	0.19	20.8	96	650	4750	3.9	18	653.9	4768
17.	Urseni IAS	250	0.75	0.69	0.29	20.8	96	650	4750	35.1	162	685.1	4912
18.	Urseni IAS	400	0.75	0.65	0.37	11.5	60	930	7600	19.41	101.25	949.41	7701.25
19.	Mosnita CAP	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.94	75	531.94	3755
20.	Mosnita CAP	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.94	75	531.94	3755
21.	Mosnita Nil	160	0.25	0.19	0.16	42.58	100	500	3680	7.98	18.75	507.98	3698.75
22.	Mosnita Avicola	400	1	0.90	0.43	11.5	60	930	7600	34.5	180	964.5	7780
23.	Urseni CAP	160	0.2	0.14	0.15	42.58	100	500	3680	5.11	12	505.11	3692
24.	Unip Com	160	0.4	0.35	0.19	42.58	100	500	3680	20.44	48	520.44	3728
25.	Icloda Com I	100	0.75	0.71	0.23	70	160	320	2500	118.13	270	438.13	2770
26.	Icloda Com II	250	0.75	0.69	0.29	20.8	96	650	4750	35.1	162	685.1	4912
27.	Sacosu Com	250	1.91	1.83	0.55	20.8	96	650	4750	227.47	1049.88	877.47	5799.88
28.	Sacosu CAP	250	1.25	1.18	0.40	20.8	96	650	4750	97.5	450	747.5	5200
29.	Sacosu SMA	160	1.25	1.19	0.37	42.58	100	500	3680	199.59	468.75	699.59	4148.75
30.	Sacosu CRR	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.935	75	531.94	3755
31.	Blajova SAT	40	0.5	0.48	0.14	246.25	400	185	1200	184.69	300	369.69	1500
32.	Vucova CAP	160	0.75	0.70	0.26	42.58	100	500	3680	71.85	168.75	571.85	3848.75
33.	Vucova SAT	100	0.75	0.71	0.23	70	160	320	2500	118.13	270	438.13	2770
34.	Nitchidorf CAP	100	1	0.96	0.29	70	160	320	2500	210	480	530	2980
35.	Nitchidorf moara	160	1	0.95	0.32	42.58	100	500	3680	127.74	300	627.74	3980
36.	Nitchidorf SAT	250	1.5	1.43	0.46	20.8	96	650	4750	140.4	648	790.4	5398
37.	Nitchidorf IAS	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.94	75	531.94	3755
38.	Nitchidorf Pomi	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.94	75	531.94	3755
39.	Silagiu CAP	100	0.1	0.04	0.09	70	160	320	2500	2.1	4.8	322.1	2504.8
40.	Silagiu SAT	160	0.75	0.70	0.26	42.58	100	500	3680	71.85	168.75	571.85	3848.75
41.	Silagiu biserică	63	0.1	0.07	0.07	136	254	250	1827	4.08	7.62	254.08	1834.62
42.	IAS FERMA 4	100	0.15	0.11	0.10	70	160	320	2500	4.73	10.8	324.73	2510.8
43.	IAS FERMA 5	63	0.15	0.12	0.08	136	254	250	1827	9.18	17.15	259.18	1844.15
44.	IAS FERMA 3	100	0.15	0.11	0.10	70	160	320	2500	4.73	10.8	324.73	2510.8
45.	ST Seismica	40	0.1	0.08	0.06	246.25	400	185	1200	7.39	12	192.39	1212
46.	Buzias Complex	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
47.	Buzias IMA	250	1	0.94	0.35	20.8	96	650	4750	62.4	288	712.4	5038
48.	Buzias CRR	250	1	0.94	0.35	20.8	96	650	4750	62.4	288	712.4	5038
49.	Bacova complex	250	0.75	0.69	0.29	20.8	96	650	4750	35.1	162	685.1	4912
50.	Bacova complex	250	0.75	0.69	0.29	20.8	96	650	4750	35.1	162	685.1	4912
51.	Bacova complex I	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
52.	Bacova CAP	100	0.5	0.47	0.18	70	160	320	2500	52.5	120	372.5	2620
53.	Bacova PADURE	100	0.5	0.47	0.18	70	160	320	2500	52.5	120	372.5	2620
54.	Bacova MOARA	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
55.	Bacova SAT	250	0.49	0.42	0.24	20.8	96	650	4750	14.85	68.53	664.85	4818.53
56.	Buzias Epurare	160	1	0.95	0.32	42.58	100	500	3680	127.74	300	627.74	3980
57.	Chevers Com II	100	1	0.96	0.29	70	160	320	2500	210	480	530	2980
58.	Chevers Com	160	1	0.95	0.32	42.58	100	500	3680	127.74	300	627.74	3980
59.	Chevers SMA	100	0.5	0.47	0.18	70	160	320	2500	52.5	120	372.5	2620
60.	Chevers CAP	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
61.	Surgani II	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
62.	Surgani IV	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
63.	Surgani III	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
64.	Surgani I	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
65.	Dragsina SMA	63	0.25	0.23	0.10	136	254	250	1827	25.5	47.63	275.5	1874.62
66.	Dragsina COM	100	0.65	0.62	0.21	70	160	320	2500	88.73	202.8	408.725	2702.8

67.	Abina Com	160	0.94	0.71	0.62	42.58	100	500	3680	113.74	267.11	613.74	3947.11
68.	Bazos	1000	0.7	0.44	0.55	4.2	24	1700	14000	6.174	35.28	1706.17	14035.3
69.	SP IV Bazos	40	0.35	0.33	0.11	246.25	400	185	1200	90.49	147	275.49	1347
70.	Bazos CAP	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
71.	Bazos CoM	63	1	0.96	0.28	136	254	250	1827	408	762	658	2589
72.	Mosnita Com	250	1.5	1.43	0.46	20.8	96	650	4750	140.4	648	790.4	5398
73.	Mosnita Com	160	1.5	1.44	0.43	42.58	100	500	3680	287.42	675	787.42	4355
74.	Mosnita SPPIV	630	2.5	2.35	0.85	6.55	38.1	1300	11340	122.81	714.28	1422.81	12054.3
75.	Ghiroda Prieteniei	250	2.47	2.37	0.69	20.8	96	650	4750	380.08	1754.21	1030.08	6504.21
76.	Mosnita V TCIF	100	0.5	0.47	0.18	70	160	320	2500	52.5	120	372.5	2620
77.	Bazos Com V	100	0.5	0.47	0.18	70	160	320	2500	52.5	120	372.5	2620
78.	Bazos Com II	100	0.7	0.66	0.22	70	160	320	2500	102.9	235.2	422.9	2735.2
79.	Bazos Com III	100	0.7	0.66	0.22	70	160	320	2500	102.9	235.2	422.9	2735.2
80.	Cheveres cabana	160	1.01	0.96	0.32	42.58	100	500	3680	131.19	308.09	631.19	3988.09
81.	Cheveres tabara	50	0.25	0.23	0.09	246.25	400	185	1200	46.17	75	231.17	1275
82.	Bazos CAP V	100	0.1	0.04	0.09	70	160	320	2500	2.1	4.8	322.1	2504.8
83.	SPP VIII	40	0.5	0.48	0.14	246.25	400	185	1200	184.69	300	369.69	1500
84.	Recas IAS II	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
85.	RECas IAS I	250	0.5	0.44	0.24	20.8	96	650	4750	15.6	72	665.6	4822
86.	Recas Pepiniera	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.935	75	531.935	3755
87.	IAS Blocuri Recas	250	0.52	0.48	0.19	20.8	96	650	4750	16.74	77.25	666.74	4827.25
88.	Uliuc Com	100	0.25	0.22	0.12	70	160	320	2500	13.125	30	333.13	2530
89.	Uliuc CAP	160	0.15	0.06	0.14	42.58	100	500	3680	2.87	6.75	502.87	3686.75
90.	Pompe SARES	630	0.6	0.40	0.45	6.55	38.1	1300	11340	7.07	41.14	1307.07	11381.2
91.	Pompe Pescarie	160	0.15	0.06	0.14	42.58	100	500	3680	2.8741	6.75	502.87	3686.75
92.	Pompe Timis	160	0.5	0.45	0.21	42.58	100	500	3680	31.935	75	531.94	3755
93.	Stamora Com	100	0.4	0.37	0.16	70	160	320	2500	33.6	76.8	353.6	2576.8
94.	Otvessii Com II	100	0.3	0.27	0.13	70	160	320	2500	18.9	43.2	338.9	2543.2
95.	Otvessii Com I	100	0.4	0.37	0.16	70	160	320	2500	33.6	76.8	353.6	2576.8
96.	Cerna COM	250	0.4	0.33	0.22	20.8	96	650	4750	9.984	46.08	659.98	4796.08
97.	Berini Com	160	0.25	0.19	0.16	42.58	100	500	3680	7.9837	18.75	507.98	3698.75
98.	Berini CAP	250	0.2	0.09	0.18	20.8	96	650	4750	2.496	11.52	652.49	4761.52

Tabelul A6.3. Caracteristicile transformatoarelor din posturile de transformare [C8].

Nr. crt.	S_n [kVA]	$U_{n,t}$ [kV]	$U_{n,t}$ [kV]	P_{scn} [kW]	P_{gn} [kW]	U_{scn} [%]	i_{gn} [%]	lim.regl. [%]
1	40	20	0,4	0,985	0,185	4	3	± 5
2	63	20	0,4	1,35	0,25	4	2,9	± 5
3	100	20	0,4	1,75	0,32	4	2,5	± 5
4	160	20	0,4	2,85	0,45	4	2,3	± 5
5	250	20	0,4	3,25	0,65	6	1,9	± 5
6	400	20	0,4	4,6	0,93	6	1,9	± 5
7	630	20	0,4	6,5	1,3	6	1,8	± 5
8	1000	20	0,4	10,5	1,7	6	1,4	± 5

Prelucrarea datelor obținute din măsurători în cele patru posturi de transformare

Postul de transformare Sacosu Com.

P_{JT} [W]	Q_{JT} [VAR]	R [Ω]	X [Ω]	G [S]	B [S]	U_{jt} [V]	U_k [V]	ΔU [V]	δU [V]	U_k [V]	ΔP [W]	ΔQ [VAR]	P [W]	Q [VAR]	δP [W]	δQ [VAR]	U_{MT} [V]	P_{MT} [W]	Q_{MT} [VAR]	coef _{PMT}	I_{MT} [A]	I_a [A]	I_r [A]
51620.03	20855.85	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	206.20	357.15	3.58	4.48	360.75	255.15	856.82	51875.18	21712.67	760.86	3863.95	18037.67	52856.04	25576.61	0.9995	1.87	1.69	0.82
54802.26	18889.93	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	210.00	363.73	3.41	4.77	367.17	266.82	895.32	55068.87	19765.25	808.90	4002.68	18358.64	55877.77	23767.94	0.9202	1.91	1.76	0.75
53534.29	19484.89	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	211.00	365.46	3.42	4.61	368.91	255.15	856.82	53789.44	20341.71	816.57	4040.64	18445.47	54806.00	24382.34	0.9131	1.87	1.71	0.76
52840.80	19232.48	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	213.00	368.93	3.34	4.50	372.30	243.94	819.16	53084.73	20051.64	831.63	4115.16	18614.80	53916.36	24166.80	0.9125	1.83	1.67	0.75
54561.09	14624.86	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	216.50	374.99	2.90	4.72	377.92	238.42	800.65	54819.51	15425.61	856.95	4240.48	18896.10	55876.46	19866.08	0.9429	1.80	1.70	0.80
55814.27	18135.16	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	219.80	380.70	3.22	4.67	383.95	249.51	837.88	56063.78	18973.04	864.52	4376.88	19197.61	56948.30	23349.92	0.9252	1.85	1.71	0.70
62197.59	28401.31	0.0105	0.0353	0.006	0.0297	223.00	386.25	4.10	4.96	390.38	321.33	1079.06	62518.92	27480.37	914.38	4524.85	19518.99	63433.30	32005.02	0.8928	2.10	1.88	0.85

Postul de transformare Bacova Sat

P_{JT} [W]	Q_{JT} [VAR]	R [Ω]	X [Ω]	G [S]	B [S]	U_{jt} [V]	U_k [V]	ΔU [V]	δU [V]	U_k [V]	ΔP [W]	ΔQ [VAR]	P [W]	Q [VAR]	δP [W]	δQ [VAR]	U_{MT} [V]	P_{MT} [W]	Q_{MT} [VAR]	coef _{PMT}	I_{MT} [A]	I_a [A]	I_r [A]
12558.76	3935.68	0.0081	0.029	0.0045	0.03	205.00	355.07	0.61	0.94	355.88	11.13	39.84	12569.89	3975.52	589.29	3795.24	17783.98	13139.17	7770.76	0.8607	0.50	0.43	0.25
12503.87	3703.84	0.0081	0.029	0.0045	0.03	207.00	359.53	0.58	0.93	359.12	10.72	38.37	12514.68	3742.21	590.35	3868.97	17965.89	13095.03	7611.18	0.8646	0.49	0.42	0.24
14425.10	6152.83	0.0081	0.029	0.0045	0.03	209.10	362.17	0.82	1.02	362.99	15.19	54.38	14440.29	6207.20	592.92	3952.82	18149.43	15033.21	10160.02	0.8285	0.58	0.48	0.32
15514.19	6585.38	0.0081	0.029	0.0045	0.03	212.00	367.19	0.86	1.08	366.06	17.06	61.10	15531.25	6646.46	609.60	4064.02	18402.93	16140.86	10710.49	0.8332	0.61	0.51	0.34
14928.21	7058.53	0.0081	0.029	0.0045	0.03	215.00	372.39	0.87	1.01	373.27	15.93	57.02	14944.14	7113.55	628.98	4179.84	18663.33	15571.11	11293.39	0.8095	0.60	0.48	0.35
14942.21	6497.06	0.0081	0.029	0.0045	0.03	219.00	379.32	0.82	1.00	380.14	14.95	53.51	14957.16	6550.57	650.27	4335.11	19006.81	15607.42	10886.67	0.8202	0.58	0.47	0.33
15936.37	6601.06	0.0081	0.029	0.0045	0.03	222.00	384.52	0.83	1.06	385.35	16.30	58.36	15952.67	6859.42	688.23	4454.85	19267.52	16620.90	11114.27	0.8313	0.60	0.50	0.33

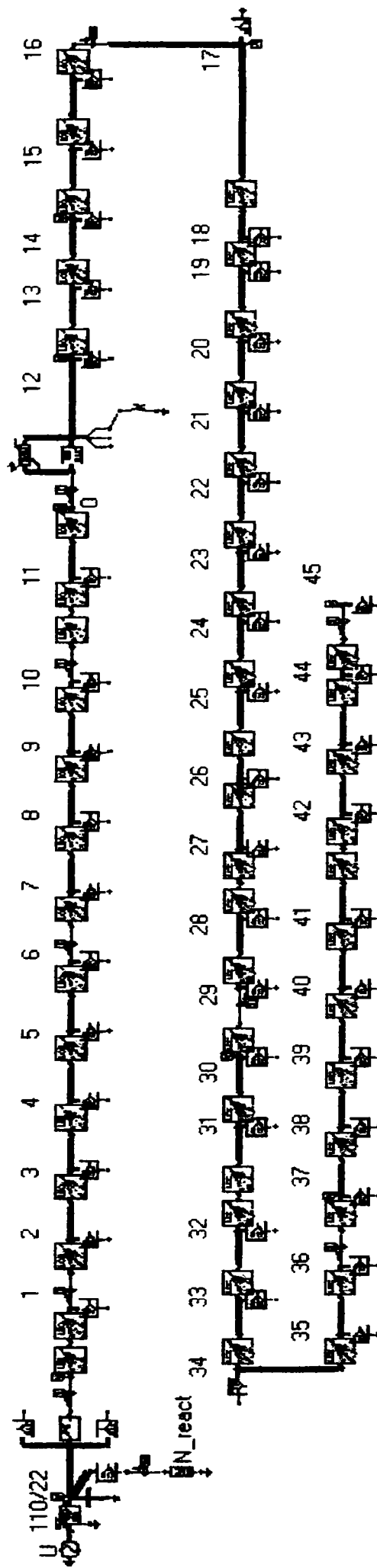
Postul de transformare IAS Blocuri Recas

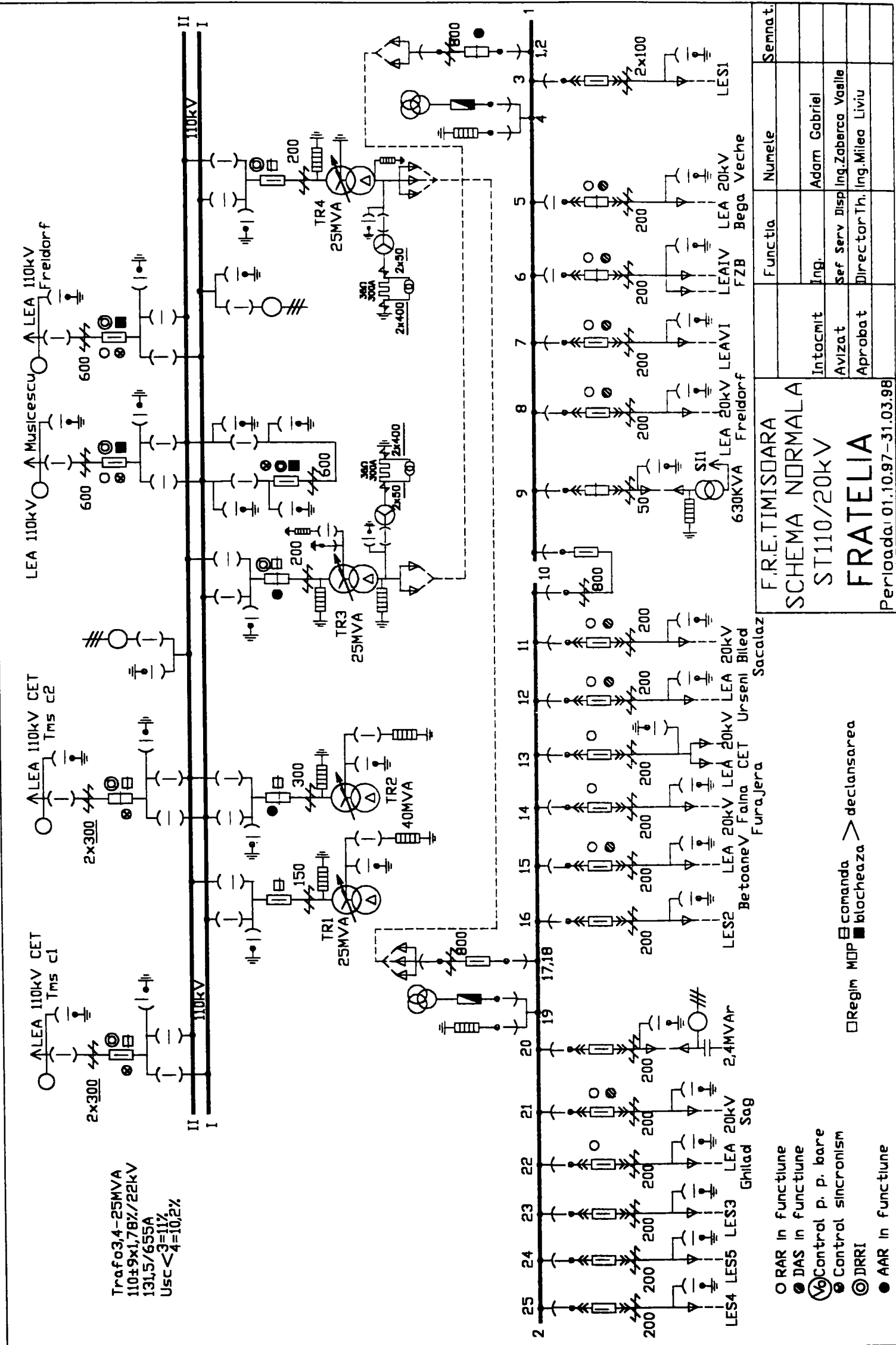
P_{JT} [W]	Q_{JT} [VAR]	R [Ω]	X [Ω]	G [S]	B [S]	U_H [V]	U_k [V]	ΔU [V]	δU [V]	U_f [V]	ΔP [W]	ΔQ [Var]	P [W]	Q [Var]	δP [W]	δQ [Var]	U_{MT} [V]	P_{MT} [W]	Q_{MT} [VAR]	cos ϕ_{MT}	I_{MT} [A]	I_a [A]	I_r [A]
12479.08	1842.75	0.01	0.04	0.01	0.03	192.00	332.55	0.59	1.26	333.15	15.11	50.73	12494.18	1893.48	591.00	3294.06	16707.25	13085.18	5187.55	0.9296	0.49	0.45	0.18
13489.05	2186.37	0.01	0.04	0.01	0.03	194.80	337.40	0.65	1.34	338.05	17.25	57.92	13516.30	2244.29	608.55	3391.86	16953.45	14124.84	5636.15	0.9288	0.52	0.48	0.19
14916.42	5194.45	0.01	0.04	0.01	0.03	195.00	337.75	1.01	1.40	338.76	22.96	77.11	14939.39	5271.56	611.08	3406.00	16988.75	15550.47	8677.57	0.8732	0.61	0.53	0.29
14769.49	4713.55	0.01	0.04	0.01	0.03	198.00	342.95	0.94	1.37	343.89	21.46	72.08	14790.95	4785.60	629.72	3509.88	17245.86	15420.67	8295.48	0.8807	0.59	0.52	0.28
15013.15	4078.98	0.01	0.04	0.01	0.03	201.00	348.14	0.87	1.40	349.01	20.97	70.41	15034.12	4149.39	648.63	3615.28	17502.90	15882.75	7764.67	0.8862	0.58	0.52	0.26
14917.13	2523.04	0.01	0.04	0.01	0.03	205.00	355.07	0.69	1.41	355.76	19.08	64.01	14936.20	2567.08	673.98	3756.56	17841.61	15610.17	6343.62	0.9284	0.55	0.51	0.21
14666.36	2323.24	0.01	0.04	0.01	0.03	208.00	360.27	0.65	1.37	360.92	17.84	69.92	14696.20	2363.16	693.67	3866.30	18100.34	15379.67	6249.46	0.9284	0.93	1.88	0.95

Postul de transformare com. Albina

P_{JT} [W]	Q_{JT} [VAR]	R [Ω]	X [Ω]	G [S]	B [S]	U_H [V]	U_k [V]	ΔU [V]	δU [V]	U_f [V]	ΔP [W]	ΔQ [Var]	P [W]	Q [Var]	δP [W]	δQ [Var]	U_{MT} [V]	P_{MT} [W]	Q_{MT} [VAR]	cos ϕ_{MT}	I_{MT} [A]	I_a [A]	I_r [A]
16680.00	7059.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	202.00	349.87	1.62	1.56	351.50	45.55	106.98	16705.55	7165.98	386.09	2841.63	17574.79	17091.64	10007.61	0.86	0.65	0.56	0.33
21470.00	15960.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	203.50	352.47	2.84	1.67	355.31	97.67	229.40	21567.67	16089.40	394.52	2803.70	17765.68	21962.20	18993.10	0.76	0.94	0.71	0.62
18220.00	14820.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	205.60	356.11	2.54	1.34	358.65	74.08	173.99	18294.08	14993.99	401.96	2958.46	17932.41	18696.04	17952.44	0.72	0.83	0.60	0.58
17710.00	5806.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	208.50	361.13	1.48	1.69	362.61	45.36	106.54	17755.36	5912.54	410.90	3024.26	18130.74	18186.27	8936.80	0.90	0.64	0.58	0.28
37750.00	19380.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	210.50	364.60	3.89	3.24	368.50	230.70	541.83	37980.70	19921.83	424.35	3123.23	18425.02	38405.05	23045.06	0.86	1.40	1.20	0.72
16680.00	8115.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	215.50	373.26	1.63	1.42	374.89	41.98	98.60	16701.98	8213.60	439.19	3232.47	18744.47	17141.17	11448.06	0.83	0.63	0.53	0.35
21550.00	9308.00	0.017	0.04	3.125E-03	0.023	217.60	376.89	1.96	1.67	378.86	66.07	155.17	21616.07	9463.17	448.55	3301.31	18943.03	22064.61	12764.46	0.87	0.78	0.67	0.39

Schema rețelei de 20kV modelată în ATP



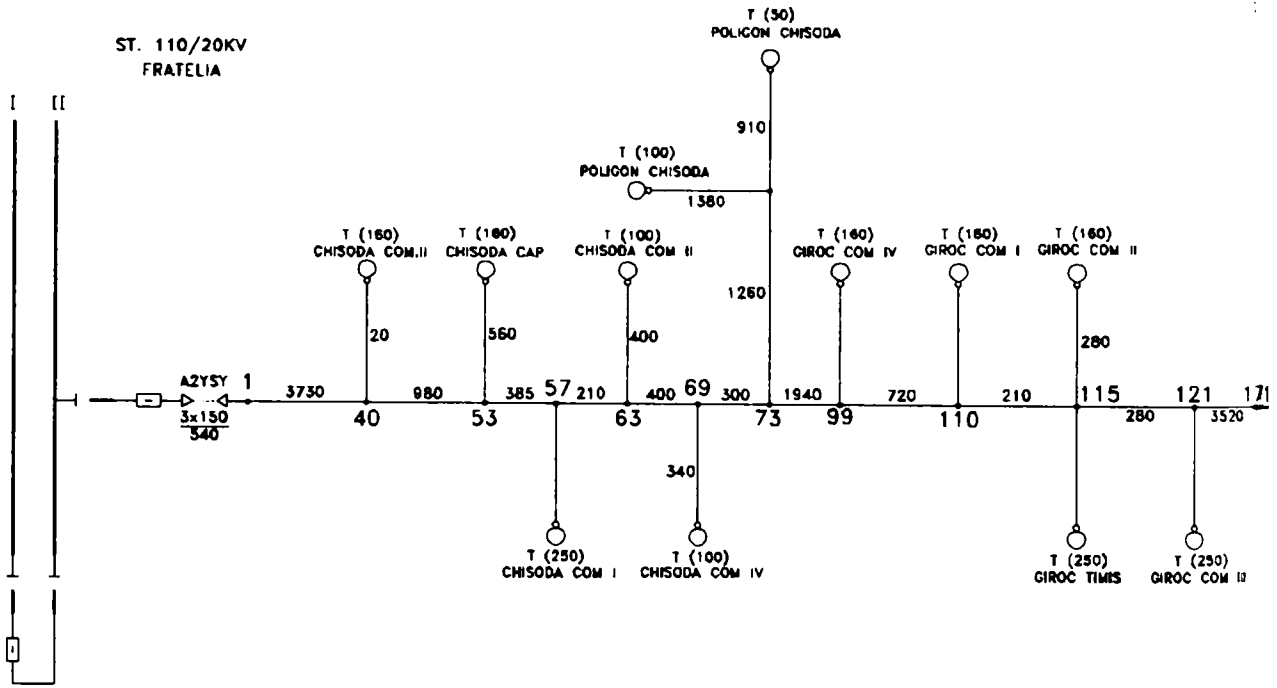


Trafo 3,4-25MVA
 110±9x1,78%/22kV
 131,5/655A
 Usc < 3=1%,
 4=10,2%

F.R.E.TIMISOARA		Funcția	Numele	Semnat.
SCHEMA NORMALA		Intocmit	Adam Gabriel	
ST110/20kV		Avizată	Ing. Zaberca Vasile	
FRATELIA		Aprobat	Director Th. Ing. Milea Liviu	
Perioada: 01.10.97 - 31.03.98				

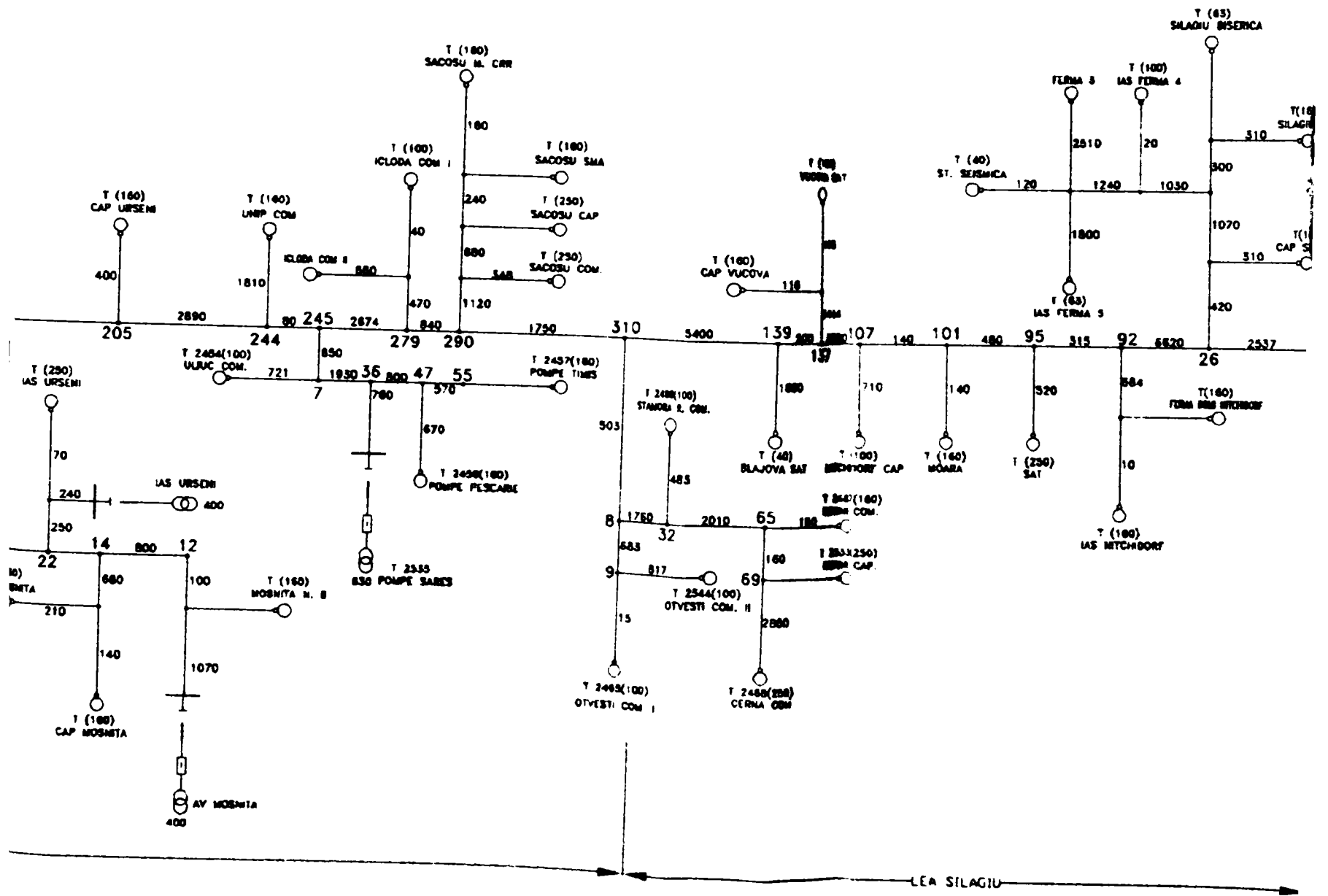
- RAR in functiune
 - DAS in functiune
 - Control p. p. bare
 - Control sincronism
 - DRRI
 - AAR in functiune
- Regim MDP comanda blocheaza > declansarea

ANEXA 6.1

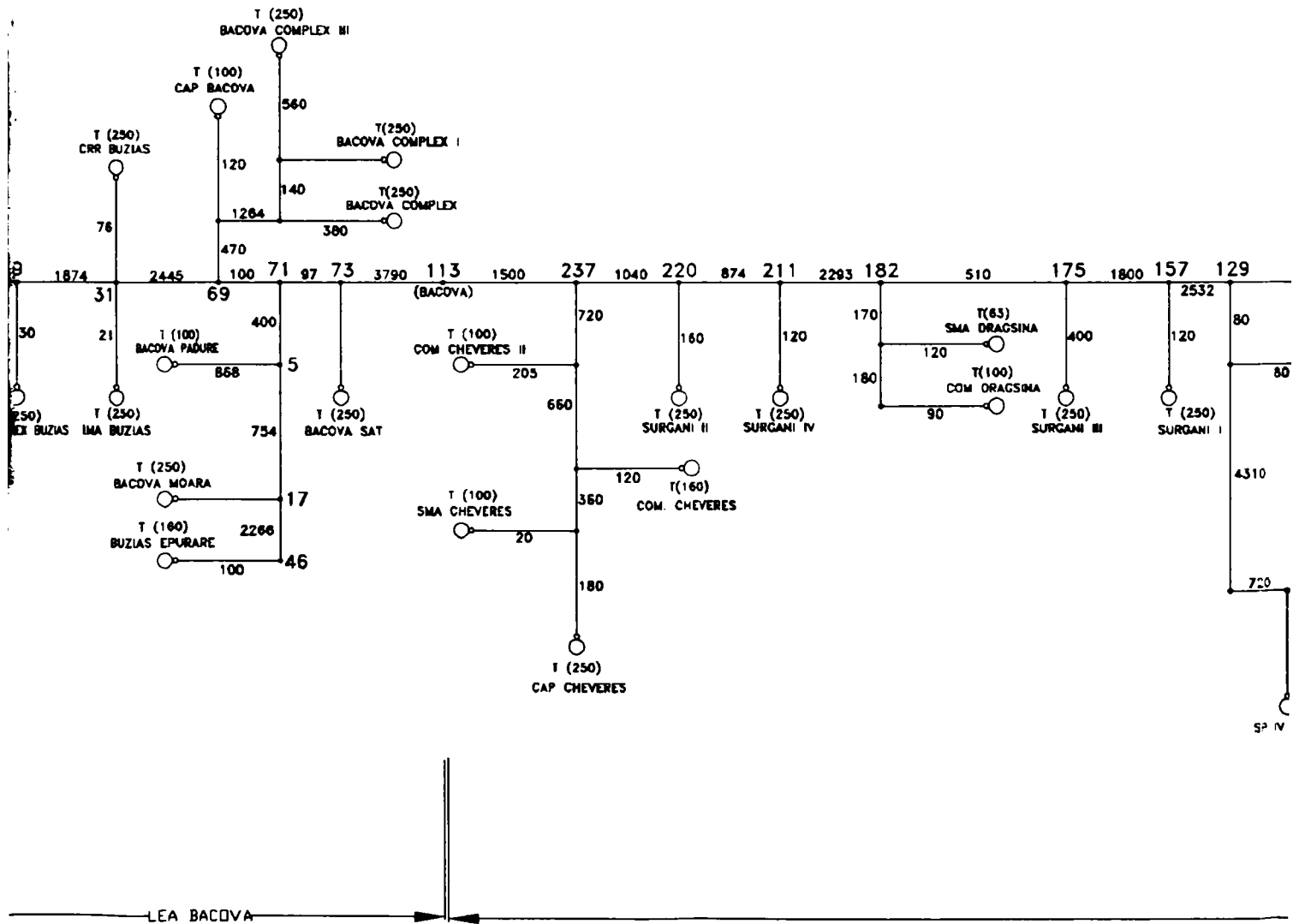


LEA URSE

1-171 AI-01 1
 171-294 AI-01
 294-310 AI-01

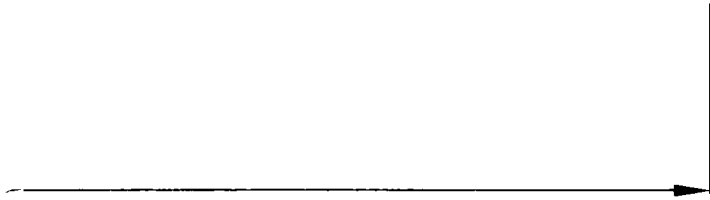
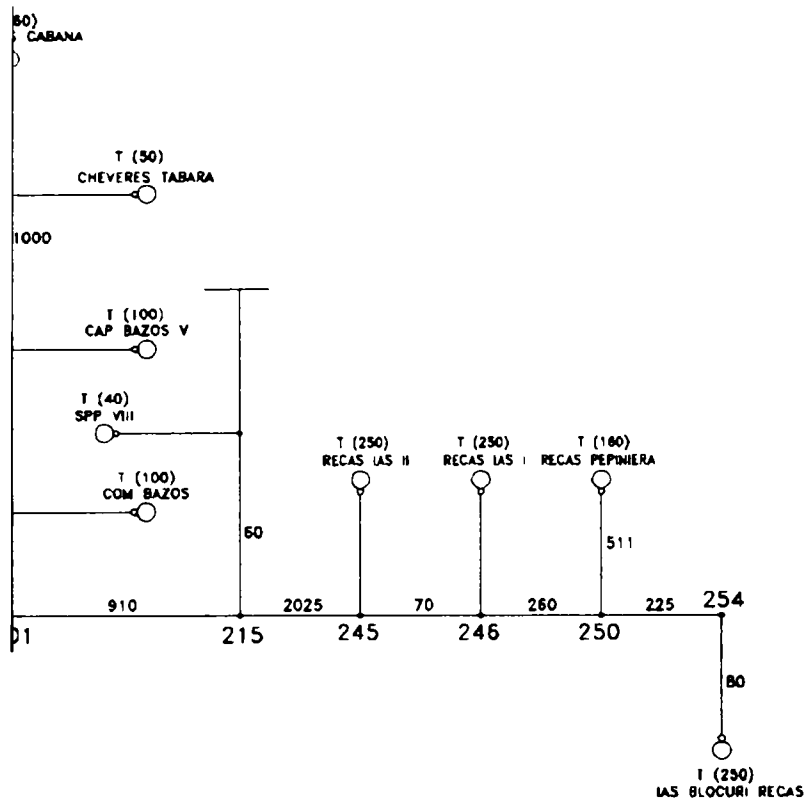


1-310 Al-Oi 30mm



1- 40 AI-DI 50mmp
 40-113 AI-OI 35mmp

Fig.1



Anexa 6.2

Programul de calcul al tensiunilor și al puterilor în nodurile rețelei, necesare pentru determinarea locului de amplasare și a valorii reactanței bateriei de condensatoare serie, precum și calculul acestora în condițiile compensării.

```

program tensiuni;
uses varib,crt;
var Ia,Pl,DU,Pc,DP1,R,U:M2;
    Ir,Ql,deltaU,Qc,DQl,X:M2;
    U1,DU1,Pl1,Ql1,deltaU1,DP11,DQ11,dUp:M2;
    sumP, SumQ, Un, X1,SUM, A,B,C1,K1, X2,R1, Xc, sumUp: real;
    Ub,Pb,Qb:real;
    n,i,m,z,j:integer;
    c,key,k,v,ml:char;
    s:string;

procedure procl; {incarca baza de date}
var f:text;
    numefis:string[10];
begin
clrscr;writeln;writeln;writeln;
write('Introduceti numele fisierului:');readln(numefis);
assign(f,numefis);
reset(f);
while not EOF(f) do
begin
for i:=1 to n do
begin
read(f,Ia[i], Ir[i], R[i], X[i]);
readln(f);
end;
end;
writeln;writeln;
writeln('Fisierul a fost incarcat !');
writeln; writeln;writeln('Apasati o tasta!');
readkey;
end;
procedure proc2;{salveaza baza de date}
var f:text;
    numefis:string[10];
begin
clrscr;writeln;writeln;writeln;
write('Introduceti numele fisierului:');readln(numefis);
assign(f,numefis);
rewrite(f);
for i:=1 to n do
begin
write(f,Ia[i], Ir[i], R[i], X[i]);
writeln(f);
end;
close(f);
writeln;
writeln('Fisierul a fost salvat!');
writeln; writeln;writeln('Apasati o tasta!');
readkey;
end;
procedure proc3;{crearea bazei de date}
begin
clrscr;writeln;
for i:=1 to n do

```

```

begin
gotoxy(1,i+3);write('Ia[' ,i, ']=');read(Ia[i]);
str((Ia[i]):4:3,s);
gotoxy(6,i+3);write(s);
m:=length(s);
gotoxy(6+m,i+3);write('A');
gotoxy(40,i+3);write('Ir[' ,i, ']=');read(Ir[i]);
str((Ir[i]):4:3,s);
gotoxy(46,i+3);write(s);
m:=length(s);
gotoxy(6+m,i+3);write('A');
end;
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
clrscr;writeln;
for i:=1 to n do
begin
gotoxy(1,i+3);write('R[' ,i, ']=');read(R[i]);
str((R[i]):4:3,s);
gotoxy(6,i+3);write(s);
m:=length(s);
gotoxy(6+m,i+3);write('ohmi');
gotoxy(40,i+3);write('X[' ,i, ']=');read(X[i]);
str((X[i]):4:3,s);
gotoxy(46,i+3);write(s);
m:=length(s);
gotoxy(6+m,i+3);write('ohmi');
end;
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end;

procedure proc4;{Calculul tensiunilor si puterilor in noduri}
begin
i:=0;
U[i]:=Ub;
Pl[i+1]:=Pb;
Ql[i+1]:=Qb;
DU[i+1]:=(Pl[i+1]*R[i+1]+Ql[i+1]*X[i+1])/U[i];
deltaU[i+1]:=(Pl[i+1]*X[i+1]-Ql[i+1]*R[i+1])/U[i];
DPl[i+1]:=(Pl[i+1]*Pl[i+1]+Ql[i+1]*Ql[i+1])*R[i+1]/(U[i]*U[i]);
DQl[i+1]:=(Pl[i+1]*Pl[i+1]+Ql[i+1]*Ql[i+1])*X[i+1]/(U[i]*U[i]);
for i:=1 to n-1 do
begin
U[i]:=sqrt(sqr(U[i-1]-DU[i])+sqr(deltaU[i]));
Pc[i]:=sqrt(3)*U[i]*Ia[i]/1000;
Qc[i]:=sqrt(3)*U[i]*Ir[i]/1000;
Pl[i+1]:=Pl[i]-Pc[i]-DPl[i];
Ql[i+1]:=Ql[i]-Qc[i]-DQl[i];
DU[i+1]:=(Pl[i+1]*R[i+1]+Ql[i+1]*X[i+1])/U[i];
deltaU[i+1]:=(Pl[i+1]*X[i+1]-Ql[i+1]*R[i+1])/U[i];
DPl[i+1]:=(Pl[i+1]*Pl[i+1]+Ql[i+1]*Ql[i+1])*R[i+1]/(U[i]*U[i]);
DQl[i+1]:=(Pl[i+1]*Pl[i+1]+Ql[i+1]*Ql[i+1])*X[i+1]/(U[i]*U[i]);
end;
i:=n;
U[i]:=sqrt(sqr(U[i-1]-DU[i])+sqr(deltaU[i]));
Pc[i]:=sqrt(3)*U[i]*Ia[i]/1000;
Qc[i]:=sqrt(3)*U[i]*Ir[i]/1000;
clrscr;
for i:=1 to n do
begin
if i <= 15 then
begin
gotoxy(1,i+2);write('U[' ,i, ']=' ,U[i]:4:3);
gotoxy(20,i+2);write('Pc[' ,i, ']=' ,Pc[i]:4:3);

```

```

gotoxy(40,i+2);write('Qc[' ,i, ']=' ,Qc[i]:4:3);
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end
else
if (i > 15) and (i <= 30) then
begin
gotoxy(1,i-13);write('U[' ,i, ']=' ,U[i]:4:3);
gotoxy(20,i-13);write('Pc[' ,i, ']=' ,Pc[i]:4:3);
gotoxy(40,i-13);write('Qc[' ,i, ']=' ,Qc[i]:4:3);
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end
else
if i > 30 then
begin
gotoxy(1,i-28);write('U[' ,i, ']=' ,U[i]:4:3);
gotoxy(20,i-28);write('Pc[' ,i, ']=' ,Pc[i]:4:3);
gotoxy(40,i-28);write('Qc[' ,i, ']=' ,Qc[i]:4:3);
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end;
end;
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end;

procedure proc5;{stabilirea locului de amplasare si a valorii reactantei
baterie}

begin
sumP:=0; sumQ:=0; Un:=20{kV};SUM:=0;K1:=0.8;
for i:=1 to n do
begin
sumP:=sumP+Pc[i];
sumQ:=sumQ+Qc[i];
SUM:=SUM+((U[i]-Un)/Un)*((U[i]-Un)/Un);
end;
A:=(sumP*sumP*K1*K1+sumQ*sumQ+2*sumP*sumQ*K1)/(Un*Un*Un*Un);
B:=( (Ub-Un)/Un)*(sumP*k1+sumQ)/(Un*Un);
C1:=((Ub-Un)*(Ub-Un)/Un)-(1/n)*SUM;
X1:=((Ub-Un)*Un+Un*Un*sqrt(SUM/n))/(sumP*k1+sumQ);
X2:=((Ub-Un)*Un-Un*Un*sqrt(SUM/n))/(sumP*k1+sumQ);
clrscr;
Gotoxy(1,2);write('Locul de amplasarea a bateriei de condensatoare');
Gotoxy(1,4);write('& valoarea reactantei acesteia ');
gotoxy(10,6);write('X1=' ,X1:4:3);
gotoxy(10,8);write('X2=' ,X2:4:3);
R1:=K1*X1;
Xc:=(-Ub*Un+sumP*k1*X1-sumQ*X1+Un*Un)/sumQ;
gotoxy(10,10);write('Xc=' ,Xc:4:3);
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end;

procedure bat;{calculul tensiunilor in noduri in cazul compensarii}
begin
clrscr;
gotoxy(10,10);write('Introduceti nr postului in care este bateria
j=');read(j);
i:=1;
P11[i]:=Pb; Q11[i]:=Qb;
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*X[i])/Ub;
deltaU1[i]:=(P11[i]*X[i]-Q11[i]*R[i])/Ub;
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(Ub*Ub);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*X[i]/(Ub*Ub);
U1[i]:=sqrt(sqr(Ub-DU1[i])+sqr(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
for i:=2 to n do

```

```

begin
if j<>i then
begin
P11[i]:=P11[i-1]-Pc[i-1]-DP11[i-1];
Q11[i]:=Q11[i-1]-Qc[i-1]-DQ11[i-1];
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*X[i])/U1[i-1];
deltaU1[i]:=(P11[i]*X[i]-Q11[i]*R[i])/U1[i-1];
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*X[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
U1[i]:=sqrt(sqrt(U1[i-1]-DU1[i])+sqrt(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
end
else
if j=i then
begin
P11[i]:=P11[i-1]-Pc[i-1]-DP11[i-1];
Q11[i]:=Q11[i-1]-Qc[i-1]-DQ11[i-1];
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*(X[i]-Xc))/U1[i-1];
deltaU1[i]:=(P11[i]*(X[i]-Xc)-Q11[i]*R[i])/U1[i-1];
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*(X[i]-Xc)/(U1[i-1]*U1[i-1]);
U1[i]:=sqrt(sqrt(U1[i-1]-DU1[i])+sqrt(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
end
end;
clrscr;
gotoxy(2,1);write('Tensiunile in nodurile de consum cand bateria de
condensatoare ');
gotoxy(2,2);write(' este amplasata in postul j=',j);
sumUp:=0;
for i:=1 to n do
begin
if i <= 15 then
begin
gotoxy(1,i+4);write('U1['',i,']=',U1[i]:4:3);
end
else
if (i > 15) and (i <= 30) then
begin
gotoxy(20,i-11);write('U1['',i,']=',U1[i]:4:3);
end
else
if i > 30 then
begin
gotoxy(40,i-26);write('U1['',i,']=',U1[i]:4:3);
end;
sumUp:=sumUp+dUp[i];
gotoxy(1,22);write('sumUp=', sumUp:3:6);
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end;
end;

procedure bat1;
begin
clrscr;
gotoxy(10,20);write('introduceti nr posturilor in care sunt bateriile');
gotoxy(10,21);Write('bateria 1: j=');read(j);
gotoxy(10,22);Write('bateria 1: al=');read(al);
gotoxy(10,23);Write('reactanta bateriei 1: Xc1=');read(Xc1);
gotoxy(10,24);Write('reactanta bateriei 2: Xc2=');read(Xc2);
i:=1;
P11[i]:=Pb; Q11[i]:=Qb;
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*X[i])/Ub;

```

```

deltaU1[i]:=(P11[i]*X[i]-Q11[i]*R[i])/Ub;
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(Ub*Ub);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*X[i]/(Ub*Ub);
U1[i]:=sqrt(sqr(Ub-DU1[i])+sqr(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
for i:=2 to n do
begin
if (i<j) or ((i>j) and (i<a1)) or (i>a1) then
begin
P11[i]:=P11[i-1]-Pc[i-1]-DP11[i-1];
Q11[i]:=Q11[i-1]-Qc[i-1]-DQ11[i-1];
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*X[i])/U1[i-1];
deltaU1[i]:=(P11[i]*X[i]-Q11[i]*R[i])/U1[i-1];
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*X[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
U1[i]:=sqrt(sqr(U1[i-1]-DU1[i])+sqr(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
end
else
if (i=j) and (i<a1) then
begin
P11[i]:=P11[i-1]-Pc[i-1]-DP11[i-1];
Q11[i]:=Q11[i-1]-Qc[i-1]-DQ11[i-1];
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*(X[i]-Xc1))/U1[i-1];
deltaU1[i]:=(P11[i]*(X[i]-Xc1)-Q11[i]*R[i])/U1[i-1];
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*(X[i]-Xc1)/(U1[i-1]*U1[i-1]);
U1[i]:=sqrt(sqr(U1[i-1]-DU1[i])+sqr(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
end
else
if i=a1 then
begin
P11[i]:=P11[i-1]-Pc[i-1]-DP11[i-1];
Q11[i]:=Q11[i-1]-Qc[i-1]-DQ11[i-1];
DU1[i]:=(P11[i]*R[i]+Q11[i]*(X[i]-Xc2))/U1[i-1];
deltaU1[i]:=(P11[i]*(X[i]-Xc2)-Q11[i]*R[i])/U1[i-1];
DP11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*R[i]/(U1[i-1]*U1[i-1]);
DQ11[i]:=(P11[i]*P11[i]+Q11[i]*Q11[i])*(X[i]-Xc2)/(U1[i-1]*U1[i-1]);
U1[i]:=sqrt(sqr(U1[i-1]-DU1[i])+sqr(deltaU1[i]));
dUp[i]:=(U1[i]-Un)*(U1[i]-Un);
end
end;
gotoxy(2,1);write('pentru bat in postul j=',j);
gotoxy(2,3);write('si bat in postul a1=',a1);
gotoxy(2,4);write('Avand reactantele Xc1=',Xc1);
gotoxy(2,4);write('si Xc2=',Xc2);
sumUp:=0;
for i:=1 to n do
begin
gotoxy(20,i+4);write('U1[' ,i, ']=' ,U1[i]:4:3);
sumUp:=sumUp+dUp[i];
gotoxy(1,22);write('sumUp=', sumUp:3:6);
gotoxy(20,24);write('Apasti o tasta pentru a continua !');readkey;
end;
end;

procedure proc8;{Salveaza rezultatele intr-un fisier de tip text}
var
g:text;
numefis:string[10];
begin
clrscr;writeln;writeln;writeln;

```

```
write('  Introduceți numele fișierului:');readln(numefis);
assign(g,numefis);
reset(g);
while not EOF(g) do
begin
for i:=1 to n do
begin
read(g, U[i], Pc[i], Qc[i]);
readln(g);
end;
close(g);
writeln;writeln;
writeln('Fișierul a fost încărcat !');
writeln; writeln;writeln('Apăsati o tasta!');
readkey;
end;

BEGIN
clrscr;
gotoxy(10,10);write('Introduceți nr. de date n= ');readln(n);
gotoxy(10,12);write('Introduceți tensiunea bara Ub= ');readln(Ub);
gotoxy(10,14);write('Introduceți puterea activă pe plecare Pb=
');readln(Pb);
gotoxy(10,16);write('Introduceți puterea reactivă pe plecare Qb=
');readln(Qb);
gotoxy(20,18);write('Apăsati o tasta pentru a continua !');readkey;
repeat
clrscr;
writeln;writeln;writeln;
writeln('MENIU GENERAL');
writeln('*****');
writeln;writeln;
writeln('1.Incarca fisier');writeln;
writeln('2.Salveaza date');writeln;
writeln('3.Introduce date');writeln;
writeln('4.Calcul rețelei');writeln;
writeln('5.Locul de amplasare a bateriei');writeln;
writeln('6.Tensiuni în nodurile rețelei compensate'); writeln;
writeln('7.Tensiuni în nodurile rețelei compensate 2 baterii'); writeln;
writeln('8.Salveaza rezultate');writeln;
writeln('9.EXIT');
writeln;writeln;
writeln('TASTATI UN NR: INTRE 1-7');
repeat
readln(m1);
until (m1 in['1','2','3','4','5','6','7','8','9']);
case m1 of
'1':proc1;
'2':proc2;
'3':proc3;
'4':proc4;
'5':proc5;
'6':bat;
'7':bat1;
'8':proc8;
'9':exit
end
until m1='9';
readln;
END.
```