

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"

TIMIȘOARA

BIBLIOTECA CENTRALĂ

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMIȘOARA

Nr. Inv. 28.356

CATEDRA DE ELECTROTEHNICĂ TIMIȘOARA

Dulap 181 Lit. 0

ing. VASILE TOAXEN

## TEZĂ DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

prof. dr. ing. IOAN NOVAC

1999

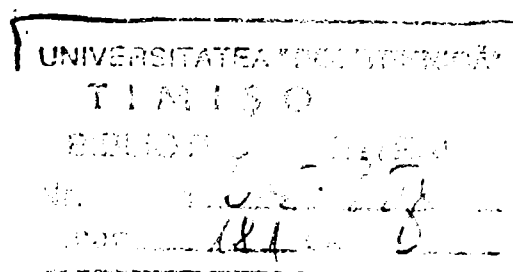
**UNIVERSITATEA „POLITEHNICA“ TIMIȘOARA**

**FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ TIMIȘOARA**

**ing. VASILE TOAXEN**

**TRATAREA NEUTRULUI REȚELELOR DE MEDIE  
TENSIUNE COMUTABIL PRIN BOBINĂ DE  
COMPENSARE ȘI BOBINĂ DE PUNCT NEUTRU**

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA



**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC**

**prof. dr. ing. IOAN NOVAC**

**1999**

## CUPRINS

Introducere .....	6
Capitolul 1. Metode de tratare a neutrilor rețelelor de medie tensiune.....	10
1.1.Considerații generale.....	10
1.2.Metode de tratare a neutrilor care permit funcționarea rețelei cu o simplă punere la pământ .....	12
1.2.1.Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul izolat.....	13
1.2.2. Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de compensare .....	15
1.3. Metode de tratare a neutrilor care permit deconectarea rapidă a liniei de defect.....	19
1.3.1. Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistență.....	19
1.3.2. Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistor și „întreruptor șunt” .....	21
1.3.3. Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu rezistor .....	22
1.3.4. Tratarea neutrilor rețelei de medie tensiune prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru.....	24
1.4. Concluzii .....	26
Capitolul 2. Calculul nesimetriilor în rețele trifazate.....	27
2.1.Expresii generale de calcul.....	27
2.2.Nesimetrii transversale.....	35
2.2.1.Scurtcircuit monofazat.....	35
2.2.2.Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ.....	38
2.3. Nesimetrii multiple.....	39
2.3.1.Stabilirea ecuației generale.....	39
2.3.2.Elementele nesimetrice leagă între ele trei rețele simetrice.....	42
Capitolul 3. Analiza simplurilor puneri la pământ.....	44
3.1.Modelul matematic.....	44
3.2.Rețea cu neutrul izolat.....	50

3.3.Rețea cu neutrul tratat prin rezistor.....	53
3.4.Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare.....	55
3.5.Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu rezistor.....	66
3.6.Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru.....	74
3.7.Concluzii.....	80
Capitolul 4. Analiza regimului tranzitoriu provocat de simplele puneri la pământ.....	82
4.1.Considerații generale.....	82
4.2.Metoda variabilelor de stare.....	83
4.2.1.Elementele de teoria grafurilor.....	83
4.2.2.Formularea ecuațiilor de stare pentru rețele RLC liniare.....	85
4.2.3.Formularea ecuațiilor de stare pentru rețeaua considerată.....	88
4.3.Metoda analizei nodale .....	93
4.3.1.Formularea ecuațiilor nodale.....	93
4.3.2.Adaptarea metodei analizei nodale pentru regimul variabil.....	95
4.3.3.Programul PS pice de analiză a circuitelor electrice.....	97
4.3.4.Analiza PS pice a simplelor puneri la pământ în rețele de medie tensiune.....	97
4.3.5.Rezultate obținute prin simulare numerică PS pice .....	99
4.4.Concluzii.....	116
Capitolul 5. Determinări experimentale în rețeaua reală de medie tensiune.....	118
5.1.Rețea cu neutrul izolat.....	119
5.2.Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare.....	122
5.3.Rețea cu neutrul tratat combinat , bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru.....	125
5.4. Determinarea experimentală a supratensiunilor de comutație în rețeaua de 20 kV cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina trifazată de punct neutru.....	127
5.4.1. Schema circuitului de încercare.....	127
5.4.2. Schema circuitului de comandă și măsurare.....	129
5.4.3. Rezultatele încercărilor și măsurătorilor .....	131
5.5. Concluzii .....	133
Capitolul 6. Concluzii și contribuții originale.....	135

---

Bibliografie.....	138
-------------------	-----

Anexa 1. Standard de firmă pentru bobina trifazată de punct neutru

Anexa 2. Schemă de măsură în sectorul experimental

Anexa 3. Oscilograme obținute din măsurători în sectorul experimental

## INTRODUCERE

Problema tratării neutrlui rețelelor electrice de medie tensiune a constituit și constituie una din preocupările importante ale specialiștilor energeticieni [2, 3, 6, 7, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 34, 36, 38, 51, 52, 53, 63, 64, 65, 111, 112, 113, 121, 123] deoarece are o importanță deosebită în buna funcționare a rețelelor. Această preocupare se datorează, în primul rând, posibilităților de apariție în instalațiile electrice a scurtcircuitelor monofazate, numite la aceste rețele simple puneri la pământ [7, 16, 65, 66, 69, 72, 110, 121, 122], care reprezintă în majoritatea rețelelor peste 80% din numărul total de defecte [16, 17, 34, 63, 113], în unele situații depășind chiar 95% din totalul defectelor. Forma de manifestare a acestui defect, comportarea rețelei în perioada cât durează defectul și consecințele pentru consumatori după dispariția, respectiv eliminarea acestuia, depind în mare măsură de soluția aleasă pentru tratarea neutrlui rețelei în care s-a produs simpla punere la pământ [40, 41, 69, 76].

Prin tratarea neutrlui unei rețele electrice se înțelege modul în care este realizată legătura electrică a nulului rețelei la priza de pământ a stației de transformare. Deoarece transformatoarele de 110 kV/MT au pe partea de MT (medie tensiune) conexiune Y sau  $\Delta$  este necesară realizarea nulului artificial. Aceasta se face fie printr-o bobină specială, construită în acest scop, numită bobină de punct neutru (BPN), fie utilizând nulul transformatorului de servicii proprii (TSP), al stației de transformare.

Soluția aleasă pentru tratarea neutrlui rețelelor electrice constituie o caracteristică a acestora, având repercursiuni importante asupra instalațiilor și a exploatării acestora, în principal prin trei din caracteristicile de funcționare în regim de simplă punere la pământ și anume:

- valorile supratensiunilor în regim tranzitoriu și a tensiunilor în regim stabilizat ;
- valoarea curentului de defect ;
- numărul întreruperilor alimentării consumatorilor ;

Supratensiunile din regim tranzitoriu precum și valorile tensiunilor de fază în regim de simpla punere la pământ stabilizat pot conduce la distrugerea izolației echipamentelor, deci funcționarea rețelei cu un astfel de defect timp îndelungat crează premisele transformării acestuia într-un defect multiplu, ceea ce conduce la pagube extrem de ridicate [16, 91, 76, 106, 122], iar valorile ridicate ale curenților de defect pot conduce, pe lângă solicitările electrodinamice și termice inadmisibile, și la depășirea tensiunilor de atingere și de pas admise prin norme și în consecință la accidente prin electrocutare.

Un element esențial ce contribuie la amplificarea consecințelor asupra instalațiilor a unei simple puneri la pământ îl constituie durata de eliminare a defectului și de separare a elementului

defect [13, 14, 15, 113, 137, 138, 139, 140, 141, 142]. Aceasta depinde de soluția aleasă pentru tratarea neutrului, putând fi de ordinul zecilor de minute la rețelele cu neutrul izolat sau tratat prin bobină de compensare, sau de ordinul fracțiunilor de secundă, respectiv de ordinul secundelor, în cazul rețelelor ce au neutrul tratat prin rezistor sau bobină de impedență scăzută [7, 51, 52, 53, 140, 141, 142]. Durata de eliminare a defectului este cu atât mai importantă cu cât valorile supratensiunilor în rețea sunt mai mari și cu cât izolația echipamentelor are un nivel de ținere mai coborât în raport cu tensiunea nominală sau cu cât această izolație este mai îmbătrânită. Având în vedere vechimea relativ mare a rețelelor electrice de medie tensiune din România izolația acestora este îmbătrânită în mare măsură, motiv pentru care funcționarea cu o simplă punere la pământ conduce foarte probabil la apariția defectelor polifazate. De asemenea supunerea izolației rețelei la supratensiuni și tensiuni stabilizate de valori mari, pe timp îndelungat, conduce și la îmbătrânirea prematură a acestora.

Normele RENEL [112] impun tratarea neutrului rețelelor electrice de medie tensiune în cazul în care curentul capacitiv total al rețelei legată galvanic depășește valoarea de 10 A, dacă la rețea nu sunt racordate galvanic generatoare, respectiv 5 A dacă nu este satisfăcută această condiție. În rețelele de medie tensiune din România, unde curenții capacitivi depășesc valorile admise prin norme, s-au luat măsuri de reducere a valorii acestora prin secționare galvanică a rețelei sau de compensarea lor prin bobine de compensare (bobine Petersen).

Studiile și cercetările efectuate în ultimii 15 ..... 20 ani au pus în evidență o serie de avantaje majore pe care le prezintă soluția de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune prin rezistor [9, 13, 34, 51, 66, 108] . Soluția permite realizarea unor protecții sigure de selectare și eliminare rapidă a defectelor, ceea ce conduce la excluderea unor dezavantaje importante specifice funcționării rețelelor cu neutrul izolat sau tratat prin bobină de compensare. Această soluție s-a impus în special pentru rețele de medie tensiune în cablu sau preponderent în cablu. În cazul rețelelor aeriene și a unor rețele mixte, tratarea prin rezistor a neutrului nu are aceeași eficacitate, datorită numărului mai mare de întreruperi în alimentarea consumatorilor ca urmare a defectelor pasagere, specifice acestor rețele. Protecțiile prin relee la acest tip de rețele provoacă deconectarea liniei și în cazul defectelor pasagere ( trecătoare ). Găsirea unor metode de eliminare a defectelor pasagere, care reprezintă aproximativ 70%..... 90% din totalul defectelor fără a fi afectată alimentarea consumatorilor a constituit o preocupare importantă a specialiștilor în ultimii ani [16, 17, 19, 40, 41, 65, 69, 113] . Aceste preocupări au condus la soluția de tratare combinată a neutrului rețelelor de medie tensiune. Se funcționează în regim normal cu neutrul tratat prin bobină de compensare, iar după aproximativ o secundă de la apariția unei simple puneri la pământ, dacă nu a dispărut defectul, în paralel cu bobina de compensare se conectează

rezistorul ceea ce permite selectarea rapidă a liniei cu defect și deconectarea acesteia de la barele stației de transformare.

Implementarea acestei soluții a condus la rezultate remarcabile [34, 40, 41, 113] confirmând așteptările. Dezavantajul principal constă în aceea că în stația de transformare este necesară montarea suplimentară, față de soluția de tratare a neutrului cu bobină de compensare, a unei bobine de punct neutru ( BPN ), a rezistorului, a transformatoarelor de curent aferente și a unui întreruptor monopolar, ceea ce mărește prețul de cost. Din acest motiv s-au căutat metode de a reduce costurile fără a fi afectate avantajele soluției de tratare combinată a neutrului rețelelor de medie tensiune.

În lucrare se prezintă o soluție de tratare combinată a neutrului rețelelor de medie tensiune, propusă de autor, în care grupul bobină de punct neutru și rezistor s-au înlocuit cu bobină de punct neutru având impedanța homopolară mărită, astfel încât aceasta să limiteze valoarea curentului de defect în cazul unei simple puneri la pământ, la 300 A. Bobina realizată include și transformatorii de curent necesari în realizarea instalațiilor de protecție. Această bobină este notată în lucrare BTPC (bobină trifazată de punct neutru comutabilă). În teza de doctorat se analizează modul în care această soluție de tratare a neutrului conservă avantajele celorlalte soluții de tratare a neutrului și implicațiile ce intervin asupra protecțiilor rețelelor de medie tensiune. Soluția a fost propusă spre brevetare la Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci .

În vederea implementării acestei soluții, în Stația de transformare 110/20 kV I.U.M.- Tg. Jiu s-a realizat un sector experimental, ceea ce a permis efectuarea de măsurători în condițiile unei rețele de medie tensiune reală.

Teza de doctorat este structurată în șase capitole, bibliografie și anexe.

În capitolul 1 se prezintă soluțiile de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune folosite în prezent și anume: neutru izolat; neutru tratat prin bobină de compensare (BC); neutru tratat combinat și anume transformator de servicii proprii înseriat cu bobina de compensare ( TSP + BC ) conectat în paralel cu grupul format din bobina de punct neutru înseriată cu rezistor ( BPN +  $R_n$  ); neutru tratat combinat prin transformator de servicii proprii înseriat cu bobina de compensare ( TSP + BC ) în paralel cu bobina de punct neutru având impedanța homopolară mărită ( BTPC).

Se prezintă avantajele și dezavantajele diverselor variante, insistându-se asupra soluției propuse de autor.

În capitolul 2 se abordează problema mai generală de calcul a defectelor în rețelele electrice, avându-se în vedere și defectele prin rezistență de trecere mare, respectiv nesimetriile sistemului trifazic de tensiuni. Se stabilesc relații de calcul generale care, prin particularizare, conduc la cele folosite în mod curent, și prezentate în literatura de specialitate.



În capitolul 3 se analizează modul în care depinde tensiunea homopolară, curentul de defect și curenții capacitivi ai liniilor fără defect de condițiile în care se produce simpla punere la pământ (structura rețelei de medie tensiune, soluția aleasă pentru tratarea neutrului, rezistența de trecere, regimul de funcționare al rețelei). Se definește coeficientul de modificare al tensiunii homopolare în raport cu elementele precizate prezentându-se nomograme ce permit determinarea rapidă a valorii acestui coeficient.

În capitolul 4 se abordează problema regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ, prezentându-se ca metode de studiu metoda variabilelor de stare și metoda potențialelor la noduri. Se justifică avantajele metodei potențialelor la noduri într-o rezolvare numerică, evidențiindu-se avantajele ce le prezintă simularea numerică PSpice în studiul efectuat. Se stabilesc mărimile ce influențează preponderent evoluția în timp, pe durata regimului tranzitoriu, a tensiunilor și curenților.

În capitolul 5 se prezintă rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate în sectorul experimental conceput de autor și realizat în acest sens, în stația de transformare 110kV/20 kV I.U.M. Tg-Jiu .

Capitolul 6 este dedicat concluziilor finale și contribuțiilor teoretice și practice aduse de autor prin această lucrare.

\* \* \*

Elaborarea lucrării s-a făcut sub îndrumarea permanentă și generoasă a conducătorului științific prof. dr. ing. Ioan Novac, căruia autorul îi aduce și pe această cale respectuoase mulțumiri. Îndrumarea atentă de care a beneficiat autorul în elaborarea tezei, cât și în activitatea de cercetare, a fost deosebit de utilă în formarea sa profesională.

Autorul mulțumește Colectivului Laboratorului de Mare Putere și în special șefului de laborator dr.ing. George Curcanu, a cărui colaborare a fost esențială în efectuarea măsurătorilor în sectorul experimental realizat în acest scop.

Sincere mulțumiri adresează autorul Colectivului Catedrei de Mașini, Acționări și Utilizări a Energiei, respectiv Colectivului Catedrei de Electrotehnică din cadrul "Universității Politehnica Timișoara", pentru sprijinul acordat sub diverse forme la realizarea acestei teze de doctorat.

Tuturor colegilor din S.C. ELECTRICA S.A. Sucursala de Distribuție Tg-Jiu, care l-au sprijinit și încurajat în diferite ocazii, autorul le adresează calde mulțumiri.

## Cap.1. METODE DE TRATARE A NEUTRULUI REȚELOR DE MEDIE TENSIUNE

### 1.1. Considerații generale

Alegerea unei soluții de tratare a neutrului rețelilor de medie tensiune se face pentru o perioadă lungă de timp, implicând un volum mare de investiții și necesitatea fundamentării cu foarte mare atenție a deciziei luate. Soluția care se adoptă în momentul când se pune problema tratării neutrului unei rețele electrice trebuie să corespundă cel mai bine cerințelor și scopului pentru care este construită rețeaua.

Dezvoltările tehnologice asociate unui anumit mod de tratare a neutrului, precum și evoluția și dezvoltarea ulterioară a rețelilor electrice pot fi de natură să modifice la un moment dat termenii alegerii. Astfel o soluție considerată optimă la un moment dat poate ceda teren în favoarea alteia, sau se poate impune cu și mai multă pregnanță.

Principalele elemente care determină alegerea unei soluții de tratare a neutrului rețelilor electrice sunt:

- performanțele cerute în materie de calitatea alimentării consumatorilor și de asigurare a continuității alimentării acestora;
- gradul de rezervare în alimentarea consumatorilor;
- posibilitatea extinderii rețelei;
- caracteristicile rețelei și echipamentelor:
  - natura rețelei în cauză ( rețea aeriană, în cablu sau mixtă);
  - structura rețelei ( lungime, posibilități de buclare );
  - gradul de îmbătrânire a izolației;
  - valoarea curenților de defect admisibili;
  - condițiile de mediu în care funcționează liniile electrice aeriene (gradul de poluare, existența vegetației și a activităților de păsări în zonele LEA etc. care conduc deseori la defecte trecătoare cu punere simplă la pământ);
- siguranța în exploatare;
- valorile supratensiunilor și a curenților de defect care pot apare;
- posibilitatea realizării unor sisteme de protecție selective și rapide sau a unor automatici corespunzătoare;
- tehnologiile utilizabile pentru detectarea și separarea defectelor;

- gradul de pregătire a personalului de întreținere a instalațiilor ( din circuitele primare și secundare );
- posibilitatea realizării unor protecții eficiente împotriva accidentării de persoane și de animale, precum și a unor protecții împotriva extinderii avariilor;
  - reglementările și normele referitoare la securitatea persoanelor și la ținerea echipamentelor electrice;
  - valorile rezistențelor parcului de prize de pământ;
- economicitatea soluției și necesitatea realizării unor tipuri de echipamente noi.

Tratarea neutrului nu are nici o influență asupra curenților și tensiunilor în regim normal de funcționare a rețelelor electrice care au o structură și o sarcină simetrică. În cazul defectelor asimetrice sau a unor sarcini asimetrice, însă, comportarea rețelei este influențată de modul de tratare a neutrului. Curenții de defect, supratensiunile și tensiunile care rezultă sunt influențate de modul de tratare a neutrului rețelei, acestea având implicații mai mici sau mai mari asupra dimensionării echipamentelor și instalațiilor, securității persoanelor și calității alimentării consumatorilor.

Literatura de specialitate [41, 52, 53] menționează o serie de exigențe tehnice pentru realizarea unei tratări optime a neutrului rețelelor electrice de MT, care pot fi împărțite în:

- Exigențe care depind de curent:
  - curenții de defect mici, în cazul unui defect la pământ;
  - efecte reduse ale arcului electric, dacă este posibilă autostingerea arcului;
  - influențe reduse asupra altor rețele, de exemplu, asupra căilor ferate și liniilor de telecomunicații;
  - tensiuni de atingere și de pas mici în apropierea locului de defect, și durată cât mai mică de apariție a unor tensiuni de atingere și de pas de valori mai ridicate.
- Exigențe care depind de tensiune:
  - creștere redusă a tensiunii pe fazele fără defect;
  - utilizarea de descărcătoare cu tensiuni nominale mai scăzute;
  - evitarea defectelor consecutive (duble sau multiple) printr-o izolare corespunzătoare a fazelor;
  - evitarea supratensiunilor ca urmare a producerii arcului electric și a comutațiilor;
  - evitarea de tensiuni homopolare în funcționarea normală;
  - evitarea fenomenelor de ferorezonanță după eliminarea defectului.
- Exigențe care depind de exploatarea rețelei și de consumatori:

- alimentarea fără întrerupere a tuturor consumatorilor;
- rentabilitate ținând seama de evoluția rețelei;
- localizarea automată și selectivă a defectelor și deconectarea acestora fără intervenții din partea personalului de exploatare;
- eliminarea întreruperilor de scurtă durată;
- diagnosticarea automată și rapidă;
- compatibilitate cu alimentarea proceselor industriale.

Depinzând de nivelul de tensiune, dimensiunile, structura și caracteristicile rețelei, aceste exigențe nu pot fi în totalitate îndeplinite. Rețelele cu neutru izolat corespund în ansamblu exigențelor ce depind de curent, pe când exigențele ce depind de tensiune corespund rețelelor cu neutru legat la pământ.

Aceste exigențe trebuie să fie bine echilibrate pentru a se asigura o calitate corespunzătoare alimentării consumatorilor, protecția rețelei și a instalațiilor de legare la pământ, precum și protecția persoanelor și reducerea numărului și costurilor deranjamentelor în rețele.

Companiile de electricitate au în vedere în prezent utilizarea unor soluții de tratare a neutrilor rețelelor electrice și soluții de protecții prin relele și automatizări asociate care să permită atât eliminarea defectelor trecătoare, fără întreruperea în alimentare a consumatorilor, cât și detectarea și deconectarea rapidă și selectivă a elementelor de rețea cu defecte monofazate permanente.

Din punctul de vedere al concepției de eliminare a defectelor monofazate, soluțiile de tratare a neutrilor rețelelor de medie tensiune pot fi grupate în două mari categorii:

- soluții de tratare a neutrilor care permit funcționarea rețelei chiar și în cazul existenței unui defect monofazat la pământ permanent;
- soluții de tratare a neutrilor care permit deconectarea rapidă a defectelor monofazate.

În cele ce urmează se vor analiza avantajele și dezavantajele diferitelor soluții de tratare a neutrilor rețelelor de medie tensiune, ținându-se seama de gruparea acestora în aceste două mari categorii.

## **1.2. Metode de tratare a neutrilor care permit funcționarea rețelei cu o simplă punere la pământ**

În această categorie sunt cuprinse următoarele soluții de tratare a neutrilor:

- funcționarea rețelelor electrice cu neutru izolat;
- legarea neutrilor rețelei la pământ prin bobină de compensare acordată.

Aceste soluții se impun în special în situațiile în care este absolut necesar păstrarea, la un moment dat, a continuității în alimentarea consumatorilor deoarece se poate periclita securitatea persoanelor sau efectele economice ale întreruperilor în alimentare sunt importante. Soluțiile pot fi utilizate cu precădere în cazul rețelelor electrice de medie tensiune aeriene unde majoritatea defectelor monofazate sunt trecătoare.

Dublele puneri monofazate la pământ, denumite pe scurt și defecte duble, sunt scurtcircuite monofazate la pământ produse în locuri (puncte) distincte și pe faze distincte ale unei rețele trifazate. În marea majoritate a cazurilor acestea se produc în rețelele electrice cu neutrul izolat sau legat la pământ printr-o bobină de compensare.

### 1.2.1. Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul izolat

În figura 1.1 este prezentată schema de principiu pentru o rețea care funcționează cu neutrul izolat. La o astfel de rețea impedanța dintre neutrul înfășurării de 20 kV a transformatorului 110/20 kV și pământ este foarte mare, teoretic de valoare infinită.

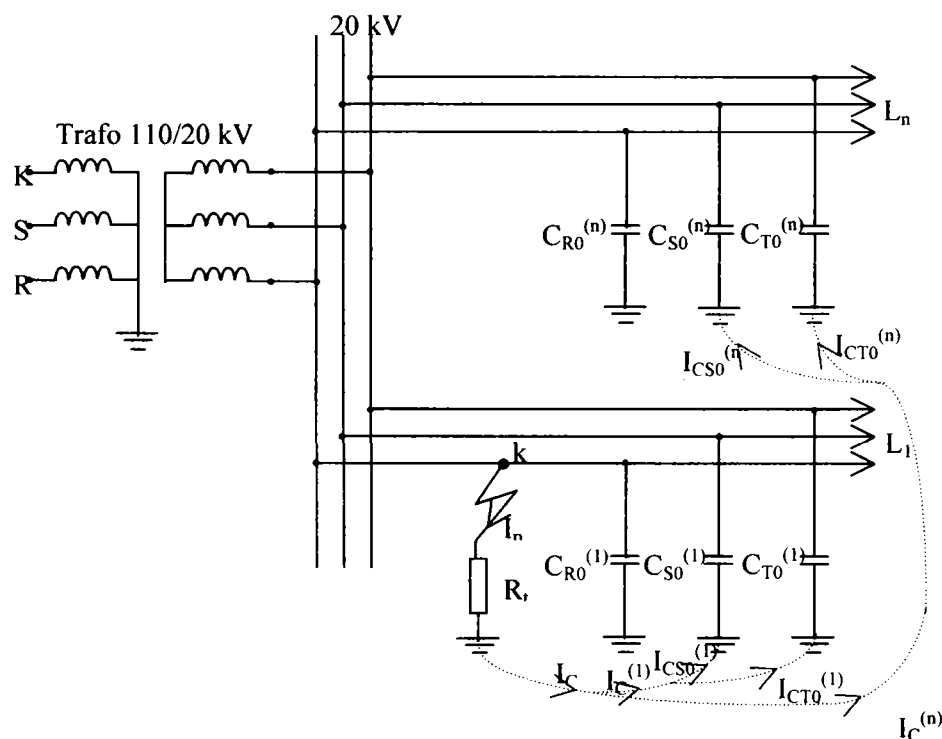


Fig. 1.1. Schema de principiu a unei rețele cu neutrul izolat

Într-o rețea simetrică, fiecare conductor va avea aceeași capacitate față de pământ și pentru un sistem simetric de tensiuni aplicat rețelei, curentii prin capacitățile la pământ vor fi egali și defazați cu 120°. Tensiunile pe fiecare fază vor fi egale și defazate de asemenea cu 120°.

În consecință nu va exista nici o diferență de potențial între punctul neutru al transformatorului de alimentare și potențialul pământului.

În cazul punerii nete la pământ a unei faze într-un punct (punctul K din fig.1.1 și  $R_t = 0$ ), potențialul neutrului transformatorului față de pământ devine practic egal cu tensiunea fazei legate la pământ iar tensiunile în raport cu pământul pe fazele sănătoase vor deveni egale cu tensiunea între faze a rețelei, (tensiunea de linie). Componenta capacitivă a curentului la locul de defect este defazată cu  $90^\circ$  față de tensiunea neutrului [7, 9, 11, 19, 24, 47].

Intensitatea curentului la locul de defect este cu atât mai mare cu cât capacitatea homopolară este mai mare, adică cu cât rețeaua legată galvanic este mai extinsă. Deoarece curenții capacitivi au valori mult mai mici în comparație cu cei de sarcină, se poate considera că tensiunile pe fazele sănătoase, măsurate față de punctul neutru al transformatorului, nu se dezechilibrează în mod sensibil. Ca urmare, rețeaua va putea să funcționeze cu un defect monofazat, alimentând în continuare consumatorii cu energie electrică în condiții satisfăcătoare, cu toate că una dintre faze este pusă la pământ. Acest lucru este important în special pentru o serie de consumatori industriali, ale căror procese tehnologice nu permit întreruperi intempestive în alimentarea cu energie electrică deoarece pot avea loc perturbații și daune importante.

Printre avantajele rețelilor cu neutrul izolat se pot enumera:

- poate asigura, pe timp limitat, continuitatea în alimentarea consumatorilor în majoritatea defectelor monofazate;
- valoarea redusă a curentului de defect la pământ;
- gradient scăzut de potențial la locul de defect, cu excepția dublelor puneri monofazate la pământ.

Printre dezavantajele rețelilor cu neutrul izolat se pot enumera:

- necesitatea izolării neutrului echipamentelor la valoarea tensiunii de fază a rețelei și necesitatea izolării fazelor tuturor instalațiilor la tensiunea între faze a rețelei;
- posibilitatea apariției unor supratensiuni de comutație și de rezonanță de valori mari, riscul apariției acestor supratensiuni fiind maxim;
- posibilitatea apariției dublelor puneri la pământ, în care caz curenții de defect devin foarte mari; în cazul defectelor duble, gradientul de potențial la locul de defect are valori foarte ridicate, conducând la creșterea peste limitele admisibile a tensiunilor de atingere și de pas;
- posibilitatea distrugerii întrerupătoarelor în cazul deconectării dublelor puneri la pământ;
- selectarea defectului monofazat nu se poate face cu ușurință prin protecția prin relee și astfel detectarea și izolarea defectului poate dura mult timp;
- funcționarea neselectivă a protecțiilor în anumite cazuri de puneri duble la pământ sau defecte polifazate;

- îmbătrânirea rapidă a izolației datorită apariției unor supratensiuni tranzitorii de valori mari și funcționării de durată a rețelei la supratensiuni temporare ridicate;
- necesitatea existenței unui personal calificat de întreținere pentru menținerea în permanență a unui foarte bun nivel de izolație și pentru a interveni rapid în caz de defect pentru depistarea și eliminarea acestuia.

Datorită acestor dezavantaje, regimul cu neutrul izolat nu se recomandă a se utiliza decât pentru rețele de cabluri puțin extinse cu un foarte bun nivel de izolație (menținut în permanență) și la care sunt conectați consumatori foarte pretențioși din punctul de vedere al continuității în alimentare.

În prezent în România normele [142] impun compensarea curentului capacitiv de defect, sau alegerea altei soluții de tratare a neutrului începând cu valoarea de 10 A în rețelele de MT legate galvanic cu generatoarele din centralele electrice.

### 1.2.2. Comportarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de compensare

Acest mod de tratare a neutrului rețelelor electrice se întâlnește frecvent, fiind considerat până nu demult ca soluția optimă pentru rețele de medie tensiune.

În figura 1.2 este prezentată schema principială a unei rețele cu neutrul legat la pământ prin bobină de compensare.

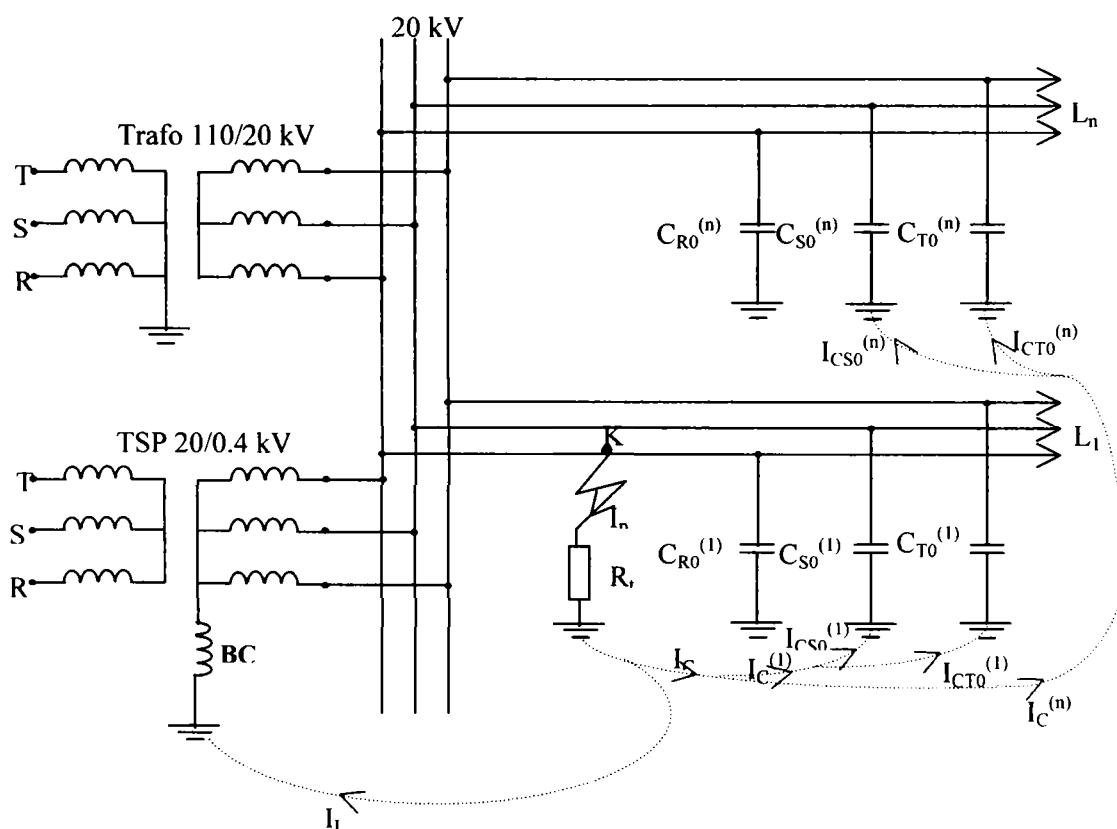


Fig. 1.2. Schema de principiu a rețelei cu neutrul tratat prin bobină de compensare

Printr-o alegere convenabilă a reactanței bobinei de stingere, cei doi curenți la locul de defect ( $I_L$  și  $I_C$ ) pot fi considerați aproximativ egali, diferența dintre ei fiind practic zero. În aceste condiții curentul total prin locul de defect va avea o valoare foarte mică, arcul electric având condiții de stingere la prima trecere prin zero a curentului. Astfel defectele trecătoare se elimină practic instantaneu. Deci rolul fizic al bobinei de compensare este să permită circulația unui curent reactiv  $I_L$  la locul cu defect, care să compenseze curentul capacitiv  $I_C$  rezultat din compunerea curenților capacitivi ai fazelor sănătoase.

Tensiunea punctului neutru al rețelei va fi aproximativ egală cu tensiunea de fază, iar tensiunea pe fazele sănătoase va fi egală cu tensiunea între faze a rețelei.

Ca și în cazul rețelei cu neutrul izolat, rețeaua va putea continua să funcționeze alimentând consumatorii în condiții satisfăcătoare până la localizarea defectului monofazat, cu toate că una din faze este pusă la pământ. Ca și în cazul rețelelor cu neutrul izolat nu este recomandabilă funcționarea de durată în regim de punere la pământ a unei faze, defectul permanent trebuie depistat și deconectată linia cu defect.

În mod practic nu este necesară îndeplinirea riguroasă a condiției de rezonanță, ci se poate merge cu un dezacord de 10% [1] și chiar de 15% - 25% [134], dictat și de valorile admisibile ale tensiunilor de atingere și de pas de la locul defectului. În Germania, conform VDE, dezacordul maxim acceptat este de 10 - 15% [8, 55], dar nedepășindu-se 20 - 25 A.

Dezacordul bobinei trebuie să se realizeze totdeauna în sensul unei supracompensări astfel încă curentul rezultat de defect să rămână inductiv, pentru a nu se produce fenomene de rezonanță. Trebuie menționat însă că de fapt, curentul de defect nu devine niciodată nul, chiar dacă bobina este perfect acordată, deoarece există întotdeauna un curent remanent, determinat de componentele active ale curentului de scurtcircuit și de armonici.

De asemenea prin bobină va circula un curent rezidual mic datorat nesimetriilor chiar în regim normal de funcționare fără defect.

Manevrele de conectare și deconectare a unor elemente de rețea pot modifica în limite sensibile valoarea curenților capacitivi, fapt care necesită adoptarea permanentă a inductivității bobinei la condițiile rețelei. În acest scop este necesar ca bobinele să fie prevăzute cu reglaj automat care, în funcție de valoarea curenților capacitivi, asigură în permanență condițiile de compensare necesare. Cu toate măsurile care se iau, există un risc permanent de supratensiuni de comutație și de rezonanță de valori mari în cazul defectelor cu arc intermitent sau a unor reanclanșări, sau de supratensiuni temporare de ferorezonanță. Solicitarea îndelungată a izolației rețelei la tensiunile în regim staționar (de la 30 minute până la două ore, pentru detectarea și separarea defectului permanent) sau/și apariția unor supratensiuni tranzitorii de valori mari, conduce la îmbătrânirea izolației și la străpungerea acesteia în alte puncte mai slabe,



transformând, ca și în cazul rețelelor cu neutrul izolat, simpla punere la pământ în dublă punere la pământ, pe care protecția prin relee trebuie să o sesizeze și să comande deconectarea liniei, întrerupând astfel alimentarea consumatorilor. Aceste protecții sunt dificil de realizat și reglat, și până în prezent nu au dat rezultate satisfăcătoare.

Racordarea bobinelor de compensare se face pe neutrul accesibil al transformatorului de servicii proprii (TSP). În cazul în care acesta nu există este necesară montarea unui transformator special pentru acest lucru sau să se creeze un punct neutru artificial prin instalarea unei bobine trifazate având conexiune zig-zag.

Avantajele sistemului de tratare a neutrului prin bobină de compensare sunt:

- poate asigura, pe timp limitat, continuitatea în alimentare a consumatorilor în majoritatea defectelor la pământ monofazate;
- valoarea redusă a curentului de defect la pământ;
- gradient scăzut de potențial la locul de defect în cazul acordării corespunzătoare a bobinei de compensare și în cazul netransformării simplelor puneri la pământ în defecte duble și multiple sau în scurtcircuite polifazate.

Printre dezavantajele rețelelor cu neutrul tratat cu bobină de compensare se pot enumera:

- necesitatea izolării neutrului echipamentelor la valoarea tensiunii de fază a rețelei și necesitatea izolării fazelor tuturor instalațiilor la tensiunea între faze a rețelei;
- exploatarea dificilă în cazul bobinelor fără reglaj automat; în acest caz este necesar un reglaj manual urmărit în permanență și un personal calificat pentru a urmări permanent acordarea bobinei la starea rețelei;
- posibilitatea apariției unor supratensiuni de comutație și de rezonanță de valori mari mai ales în cazul rearmării repetate a arcului electric;
- posibilitatea apariției defectelor duble sau multiple sau a scurtcircuitelor polifazate, în care caz curenții de defect au valori foarte mari; în astfel de cazuri gradientul de potențial la locul de defect are valori ridicate, conducând la creșterea peste limitele admisibile a tensiunilor de atingere și de pas;
- necesitatea realizării unor prize de pământ de valori mici pentru reducerea riscului apariției unor tensiuni de atingere și de pas foarte periculoase, mult peste valorile admisibile, în cazul unor defecte duble (conform statisticilor germane, peste 25% din simplele puneri la pământ se transformă în defecte duble sau multiple sau scurtcircuite polifazate);
- posibilitatea distrugerii întrerupătoarelor în cazul deconectării defectelor duble sau multiple;

- funcționarea neselectivă a protecției în anumite cazuri de puneri duble la pământ sau defecte polifazate;
- selectarea simplelor puneri la pământ se face cu dificultate astfel încât detectarea și izolarea defectului monofazat poate dura mult timp;
- îmbătrânirea rapidă a izolației datorită apariției unor supratensiuni tranzitorii de valori mari și funcționării de durată a rețelei la supratensiuni temporare ridicate;
- necesitatea existenței unui personal calificat de întreținere pentru menținerea în permanență a unui foarte bun nivel de izolație și pentru a interveni rapid în caz de defect pentru depistarea și eliminarea acestuia;
- dificultatea extinderii rețelei;
- costurile mai ridicate impuse de instalarea și exploatarea bobinelor de compensare, care nu există în cazul rețelelor de medie tensiune cu neutru izolat.

Comparând avantajele și dezavantajele acestei soluții cu cea în care neutru este izolat se constată superioritatea acesteia prin gama mult mai mare a situațiilor în care curentul la locul de defect este sub 5 A, creându-se astfel condițiile stingerii arcului electric la trecerea prin zero a curentului. Micșorarea valorii curentului la locul de defect se realizează prin compensarea curentului capacitiv al rețelei cu ajutorul celui inductiv ce se închide prin bobina de compensare.

Stingerea naturală a arcului electric la locul de defect nu impune deconectarea liniei, deci întreruperea alimentării consumatorilor.

Localizarea defectului permanent se face în marea majoritate a cazurilor prin căutare, declanșând și reanclanșând pe rând plecările din stație, iar după găsirea defectului, deconectarea plecării și eventual la trecerea pe o alimentare de rezervă a unora din consumatori. Aceste comutații repetate conduc la goluri de tensiuni și întreruperi de scurtă durată a consumatorilor și la cele mai ridicate valori de supratensiuni tranzitorii și temporare ( în unele cazuri chiar de rezonanță ).

Soluția de tratare a neutrului prin bobină de compensare se consideră a fi mai adecvată rețelelor electrice aeriene unde numeroase defecte monofazate sunt pasagere.

În rețelele în cabluri subterane, deteriorarea dielectricului constituie, în majoritatea cazurilor, defecte permanente și cablul avariat trebuie să fie deconectat de la rețea cât mai repede posibil [38], deoarece datorită faptului că pe fazele sănătoase tensiunile vor fi în acest caz egale cu tensiunea între faze a rețelei, crește probabilitatea de avariere a unei alte faze.

De asemenea în [ 38 ] se subliniază și faptul că instalarea de bobine de compensare în rețelele în cablu este foarte costisitoare, deoarece aceste bobine trebuie dimensionate pentru anularea curentului capacitiv al rețelei în cablu care este de valoare mare în acest caz.

### 1.3. Metoda de tratare a neutrului care permite deconectarea rapidă a liniei cu defect

În această categorie sunt cuprinse următoarele soluții de tratare a neutrului rețelilor electrice de medie tensiune:

- legarea la pământ prin rezistență sau reactanță de valoare corespunzătoare pentru limitarea curentului de defect monofazat la o valoare prestabilită (uzual cuprinsă între 300 și 1000 A );
- legarea la pământ comutabilă;
- legarea la pământ prin rezistor și „întreruptor șunt “.

#### 1.3.1. Comportarea rețelilor de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistor

În figura 1.3 este prezentată schema de principiu a unei rețele de medie tensiune având neutrul tratat prin rezistor și căile de închidere a curenților în timpul unei simple puneri la pământ.

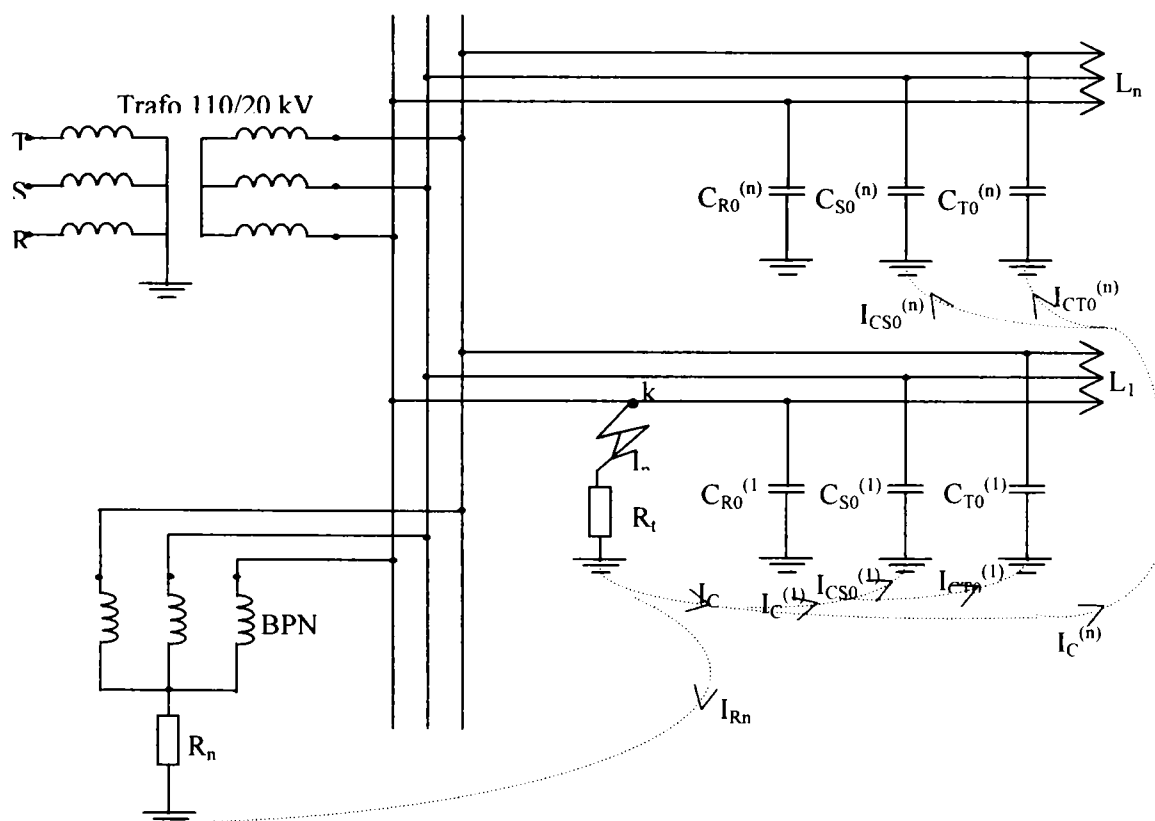


Fig. 1.3. Schema de principiu a unei rețele de medie tensiune având neutrul tratat prin rezistor

Prezența rezistenței în neutrul rețelei reduce valoarea supratensiunilor tranzitorii, amortizându-le foarte rapid, anulând în același timp condițiile de apariție a unor supratensiuni temporare de rezonanță pe armonica fundamentală sau pe armonicile superioare [10, 91, 125, 134] . Conform practicii folosite în Franța [133], pentru reducerea valorilor supratensiunilor trebuie respectată condiția:

$$I_{Rn} \geq 2 \cdot I_c \quad ,$$

iar conform practicii din Anglia și SUA [132] se respectă condiția :

$$I_{Rn} \geq I_C \quad ,$$

unde  $I_C$  este curentul capacitiv homopolar în timpul unui defect monofazat .

În cazul rețelelor care alimentează motoare sau conțin generatoare care debitează la tensiunea acestor rețele, este necesar, conform practicii franceze [133], să se limiteze curentul de defect la pământ la o valoare cuprinsă între 20 și 50 A timp de o secundă pentru a se evita defecțiuni în circuitul magnetic al acestora. În România, ICSITEE [129] precizează că este necesară limitarea curentului de defect prin generatoare la 100 A timp de o secundă.

Pentru durate ale defectului mai mici de o secundă se poate utiliza relația empirică [133] :

$$I^2 \cdot t = \text{const} \quad ,$$

unde  $I$  se exprimă în Amperi, iar  $t$  în secunde.

În cazul în care la rețea nu sunt racordate direct motoare, valoarea maximă a curentului de defect se fixează în funcție de curentul maxim ce poate trece prin mantaua cablurilor și de costul rezistenței de punere la pământ, cost care crește rapid în funcție de valoarea curentului.

În România valoarea rezistenței rezistorului utilizat pentru tratarea neutrului rețelelor de medie tensiune se alege astfel ca la o simplă punere la pământ netă ( $R_z = 0$ ) curentul de defect să fie 300 A pentru rețele electrice aeriene și mixte, respectiv 600 A sau 1000 A pentru rețele electrice subterane ( în cablu ) [137, 138, 139, 140, 141] .

Avantajele sistemului de tratare a neutrului prin rezistor sunt:

- posibilitatea realizării unor protecții sigure și selective ce permit deconectarea rapidă a liniilor cu defect;
- posibilitatea sesizării selective a defectelor slabe ( punere la pământ prin rezistență de trecere mare; conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator, etc.) și deconectarea liniei cu defect;
- supratensiuni de valori mult mai scăzute comparativ cu rețelele ce au neutrul izolat sau tratat prin bobină de compensare;
- simplificarea condițiilor de dimensionare a instalațiilor de legare la pământ.

Dezavantajele cele mai importante ale tratării neutrului rețelelor de medie tensiune prin rezistor sunt: ..

- numărul mare de întreruperi în alimentarea consumatorilor, în special în cazul liniilor aeriene sau mixte, deoarece nu se pot selecta defectele trecătoare;
- solicitarea mecanică mare a întreruptoarelor datorită numărului mare de acționări;
- numărul mare de reanclanșări automate rapide reușite.

Datorită principalelor dezavantaje ale tratării neutrului rețelilor de medie tensiune prin rezistor această soluție s-a impus în special pentru rețelele în cablu, rețele la care defectele trecătoare sunt ne semnificative.

### 1.3.2. Comportarea rețelilor de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistor și „întreruptor șunt“

Găsirea unor metode care să permită selectarea defectelor trecătoare de cele permanente au condus la creșterea performanțelor tratării neutrului prin rezistor. După statisticile prezentate în literatură [83, 84, 92, 101] defectele trecătoare reprezintă între 70% și 90% din totalul defectelor, deci selectarea acestora conduce la micșorarea pronunțată a numărului întreruperilor alimentării consumatorilor. În figura 1.4 este prezentată schema principială a rețelei de medie tensiune ce are neutrul tratat prin rezistor și prevăzută cu „întreruptor șunt“.

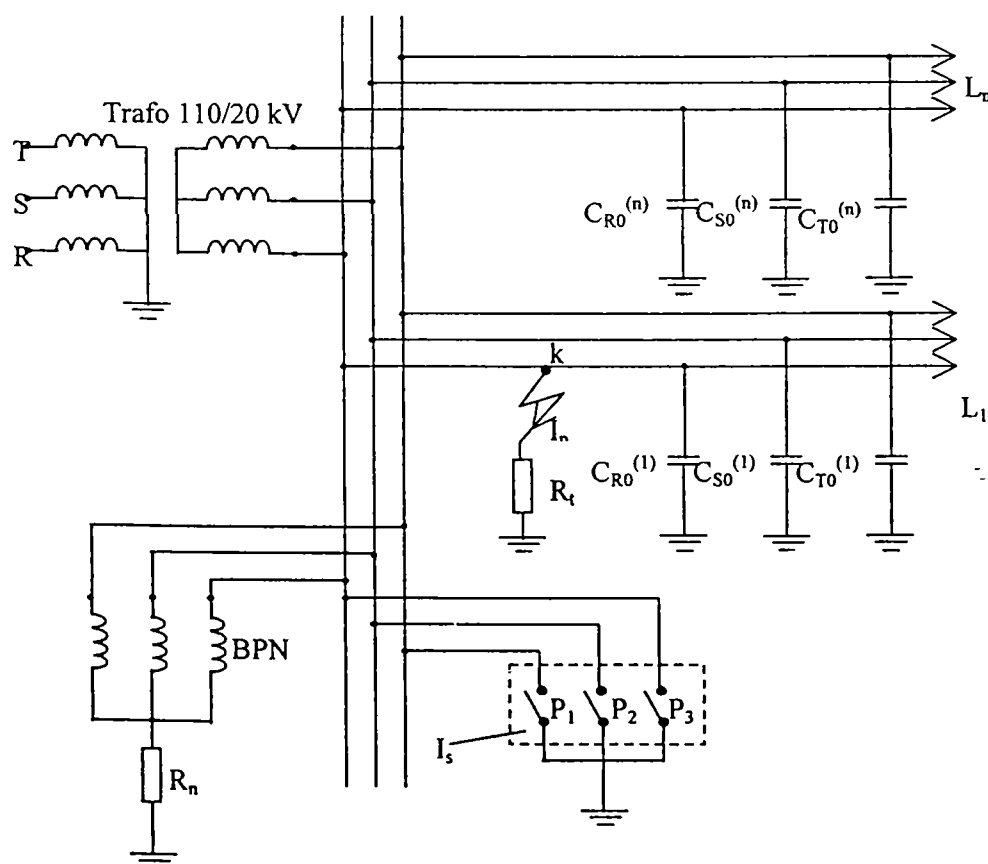


Fig. 1.4. Schema de principiu a unei rețele de medie tensiune având neutrul tratat prin rezistor și cu „întreruptor șunt“

Întreruptorul șunt, notat cu  $I_s$  în figura 1.4, trebuie să fie prevăzut cu posibilitatea de a fi acționat separat pe fiecare fază.

La apariția unei puneri la pământ se închide pentru un interval de timp de maxim 0,1 s polul întreruptorului șunt care corespunde fazei pe care s-a produs defectul. În acest fel tensiunea ce se aplică arcului electric scade foarte mult creându-se posibilitatea ca la trecerea prin zero a curentului arcul să se stingă, deci defectul să dispară fără a fi necesară deconectarea liniei, respectiv fără a întrerupe alimentarea consumatorilor.

Principalul avantaj al acestei metode de tratare a neutrilor rețelei de medie tensiune constă în aceea că se micșorează semnificativ numărul întreruperilor în alimentarea consumatorilor și atunci când aceștia sunt alimentați prin linii aeriene sau mixte, astfel încât situația devine similară cu cea în care liniile electrice sunt în cablu.

Principalul dezavantaj al acestei metode constă în faptul că este necesară realizarea unei instalații care să permită comanda separată a fiecărei faze a întreruptorului șunt, care să permită conectarea acestuia o singură dată pentru un defect. Comanda greșită a fazei întreruptorului șunt conduce la o dublă punere la pământ, care poate avea consecințe extrem de grave asupra instalațiilor. De asemenea blocarea întreruptorului șunt în poziția conectat este extrem de periculoasă, deci acestui întreruptor i se cere o fiabilitate foarte bună. Din aceste motive modul de tratare al neutrilor rețelelor de medie tensiune cu rezistor și “întreruptor șunt” nu s-a impus în rețelele de medie tensiune din România.

### **1.3.3. Comportarea rețelelor de medie tensiune având neutrul tratat cu bobină de compensare în paralel cu rezistor**

O altă metodă de a separa defectele trecătoare de cele permanente constă în tratarea neutrilor rețelei de medie tensiune cu bobină de compensare în regim normal de funcționare, iar la apariția unei simple puneri la pământ se funcționează în acest mod de tratare a neutrilor un interval de timp mai mic de o secundă. Dacă în acest interval de timp defectul nu a dispărut natural în paralel cu grupul TSP + BC ( transformator servicii proprii înseriat cu bobina de compensare ) se conectează grupul BPN +  $R_n$  (bobină de punct neutru înseriată cu rezistorul ). În acest fel se asigură posibilitatea sesizării selective a liniei cu defect și deconectarea acesteia într-un interval de timp foarte scurt.

Această metodă de tratare a neutrilor are în principal următoarele avantaje:

- nu impune întreruperea alimentării consumatorilor în cazul defectelor trecătoare;
- nu permite transformarea simplilor puneri la pământ în defecte multiple, deoarece rețeaua funcționează un timp foarte scurt ( sub două secunde ) cu punere la pământ;
- permite sesizarea selectivă a defectelor, inclusiv a celor slabe ( puneri la pământ prin rezistență de trecere mare, conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator);
- simplifică condițiile impuse în dimensionarea instalațiilor de legare la pământ

Principalele dezavantaje provin din faptul că la apariția unei simple puneri la pământ se funcționează inițial cu neutrul tratat prin bobină de compensare, deci rămân valabile dezavantajele prezentate la acest mod de tratare a neutrilor ( paragraful 1.2.3. ).

În figura 1.5 se prezintă schema de principiu a unei rețele de medie tensiune la care tratarea neutrilor este comutabilă.

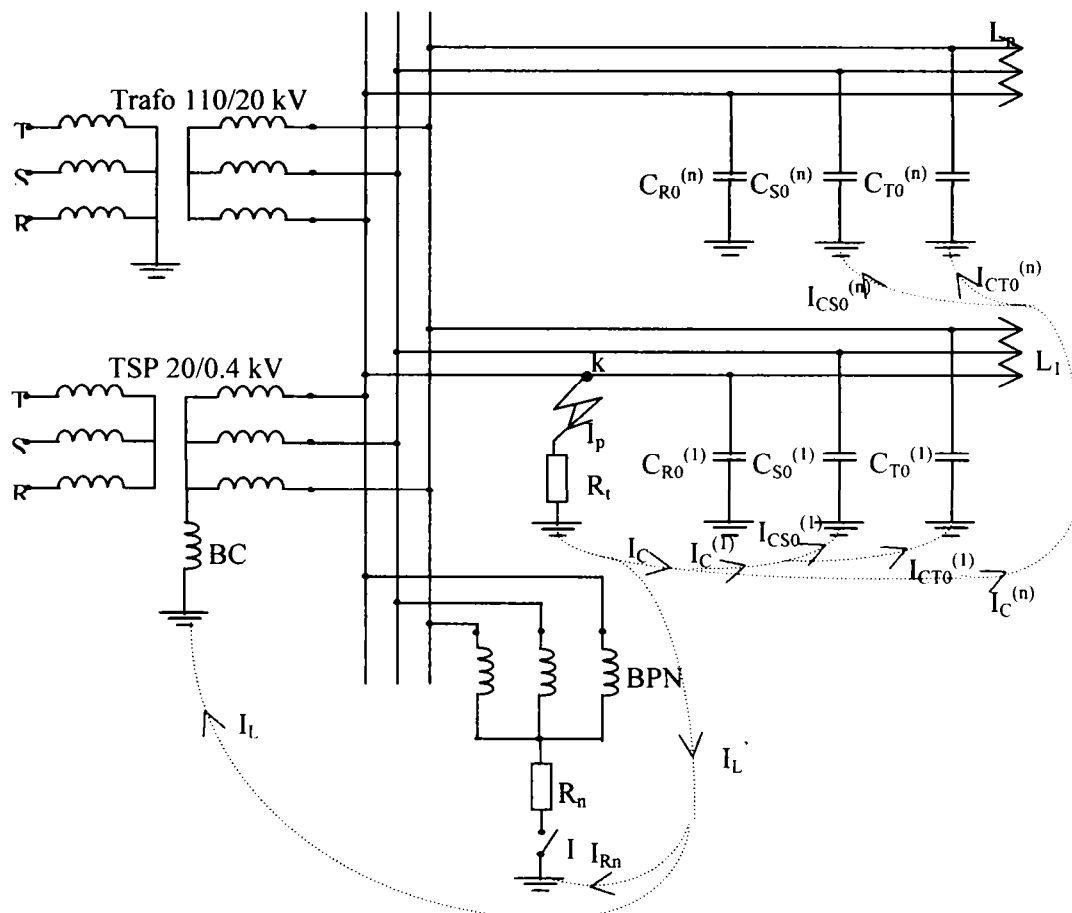


Fig. 1.5. Schema de principiu a unei rețele de medie tensiune având neutrul tratat prin (TSP + BC) în paralel cu (BPN + R<sub>n</sub>)

La conectarea întreruptorului I se leagă în paralel grupul TSP + BC cu grupul BPN + R<sub>n</sub>. Se prezintă de asemenea căile de închidere a curenților în cazul unei simple puneri la pământ.

Acest mod de tratare a neutrului s-a experimentat în rețelele de medie tensiune din țară obținându-se rezultate foarte bune [66, 101, 109, 121].

Funcționarea cu acest mod de tratare a neutrului a impus realizarea unei instalații automate care să asigure conectarea întreruptorului ( I ) la un anumit interval de timp după apariția simplei puneri la pământ, respectiv deconectarea acestuia după deconectarea de la barele stației de transformare a liniei cu defect. Această instalație trebuie să țină seama și de existența sistemelor de reanclanșare automată rapidă (RAR ) a liniilor de medie tensiune, respectiv de timpul de reglaj al acestora.

Comparativ cu situația în care se utilizează „întreruptorul șunt “ pentru eliminarea defectelor trecătoare, o funcționare greșită a instalației ce comandă întreruptorul ( I ) are consecințe mult mai puțin grave asupra rețelei de medie tensiune, deoarece în cazul că nu se închide acest întreruptor rețeaua rămâne cu neutrul tratat prin bobină de compensare, iar dacă nu se deschide rețeaua se comportă ca și cum are neutrul tratat prin rezistență.

#### **1.3.4. Tratarea neutrului rețelei de medie tensiune prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru ( BTPC )**

Soluția de tratare a neutrului cu bobină de compensare în paralel cu rezistor (figura 1.5) implică montarea în stația de transformare suplimentar a bobinei de punct neutru (BPN ) a rezistorului (  $R_n$  ) și a întreruptorului ( I ). Autorul a conceput o schemă de tratare a neutrului prin care se elimină rezistorul, concepându-se o bobină de punct neutru cu impedanță homopolară mărită, astfel încât să se limiteze valoarea curentului de defect (în cazul când rezistența de trecere la locul de defect este nulă) la 300 A . Soluția a fost propusă spre brevetare la Oficiul de Standarde și Mărci din România [111]. Prin această soluție, pe lângă creșterea fiabilității instalației ( eliminându-se un element ) se reduc și cheltuielile de investiție, deoarece costul unui rezistor este practic același cu al bobinei de punct neutru.

Bobina de punct neutru, simbolizată BTPC, are conexiune zig-zag cu nul pentru a asigura o impedanță de secvență directă, respectiv inversă de valoare ridicată (  $Z_d = Z_i = 28887 \Omega$  ) astfel că pierderile de putere activă la mersul în gol ( întreruptorul I din figura 1.6. deschis ) sunt 350W [ Anexa nr.1 ]. Caracteristicile bobinei sunt precizate în standardul de firmă prezentat în anexa nr.1. Schema de principiu a unei rețele de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru este prezentată în figura 1.6.

În aceeași figură sunt prezentate și căile de închidere a curenților în timpul unei simple puneri la pământ.



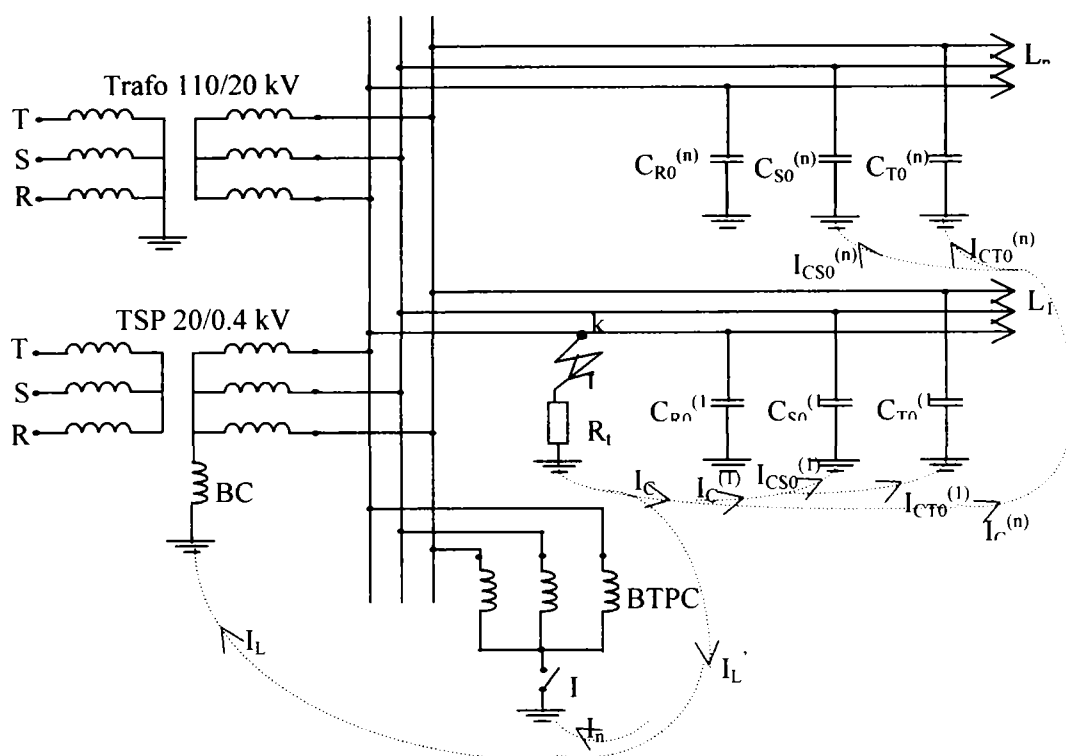


Fig. 1.6. Schema de principiu a unei rețele de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru

Impedanța homopolară a bobinei de punct neutru este  $Z_{hBTPC} = (8 + j114,7) \Omega$  [ Anexa nr. 1]. Această soluție de tratare a neutrului a fost implementată în stația de transformare 110kV/20 kV I.U.M. Tg-Jiu. Prin realizarea acestei instalații experimentale s-au putut verifica rezultatele teoretice cu cele obținute din măsurători. De asemenea, s-a putut verifica comportarea în exploatare a acestei soluții de tratare a neutrului.

Principalul avantaj al acestei soluții de tratare a neutrului constă în faptul că se reduc practic cu aproximativ 30% cheltuielile de investiții comparativ cu varianta în care neutrul este tratat prin bobină de compensare în paralel cu rezistor ( TSP + BC ) II ( BPN +  $R_n$  ), păstrându-se avantajele tehnice. Și pentru această variantă este necesară realizarea unei instalații automate care să asigure conectarea întreruptorului ( I ) din figura 1.6, la un interval de timp prescris ( sub o secundă ), din momentul apariției defectului. Eliminarea rezistorului în soluția propusă de autor are avantaje și din punct de vedere al fiabilității instalațiilor aferente rețelelor de medie tensiune. Exploatarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistor a evidențiat faptul că în timp este posibilă întreruperea acestuia. Ca urmare rețeaua de medie tensiune se transformă în una cu neutrul izolat, ceea ce poate conduce, în cazul unor simple puneri la pământ, la defecte multiple, deci la deteriorări de echipamente ce implică cheltuieli foarte mari atât pentru consumatori cât și pentru distribuitorul de energie electrică. Metoda de tratare a neutrului

propusă de autor menține avantajele soluțiilor de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune prin rezistor și combinat bobină de compensare în paralel cu rezistorul și aduce suplimentar avantajele menționate anterior.

## 1.4 Concluzii

Comparând diversele metode de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune se constată că fiecare din acestea prezintă avantaje și dezavantaje. Alegerea uneia din metodele prezentate depinde esențial de rețeaua de medie tensiune concretă în care se implementează. Soluția propusă de autor are avantaje certe în cazul rețelelor de medie tensiune aeriene sau mixte, deoarece în aceste rețele există multe defecte trecătoare. Această soluție asigură selectarea defectelor trecătoare de cele permanente, deci nu provoacă deconectarea liniei cu defect dacă acesta este trecător. În cazul defectelor permanente se asigură deconectarea liniei cu defect într-un timp foarte scurt ceea ce are implicații mari și asupra condițiilor impuse în proiectarea și realizarea instalațiilor de pământare. Aceste avantaje mai sunt conferite doar de soluția de tratare a neutrului combinat prin bobină de compensare în paralel cu rezistor. Suplimentar soluția propusă de autor reduce atât cheltuielile de investiții cât și cele de execuție prin eliminarea rezistorului.

De asemenea prin eliminarea rezistorului sporește gradul de fiabilitate al echipamentelor ce intervin în realizarea tratării neutrului și implicit a rețelelor de medie tensiune.

Dacă se are în vedere faptul că în România rețelele de medie tensiune au în mare măsură o vechime de peste 15 ani, izolația acestora este îmbătrânită, simplele puneri la pământ nedeconectate într-un timp scurt pot degenera în defecte multiple. Soluția propusă de autor asigurând deconectarea într-un timp scurt (1...3 sec.) a liniei cu simplă punere la pământ este avantajoasă pentru rețelele aeriene și mixte din țara noastră.

## Cap.2. CALCULUL NESIMETRIILOR ÎN REȚELE TRIFAZATE

### 2.1. Expresii generale de calcul

Nesimetriile într-o rețea trifazată pot fi provocate de elemente nesimetrice conectate în laturile rețelei trifazate, când se numesc nesimetrii longitudinale, sau de elemente nesimetrice conectate în nodurile rețelei (față de pământ) trifazate, când se numesc nesimetrii transversale [24, 60, 61, 62].

Modelul matematic cel mai des folosit pentru descrierea rețelelor electrice este [34, 92]:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \underline{Y}_{n1} & \underline{Y}_{n2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{2n} \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}'_1 \\ \underline{U}'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{U}'_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

în care:

$[\underline{I}] = [\underline{I}_1 \quad \underline{I}_2 \quad \dots \quad \underline{I}_n]_t$  - este matricea coloana a curenților injectați de surse (sau absorbiți de consumatori) în nodurile rețelei;

$[\underline{U}'] = [\underline{U}'_1 \quad \underline{U}'_2 \quad \dots \quad \underline{U}'_n]_t$  - este matricea coloană a tensiunilor nodurilor rețelei, față de un nod de referință care de regulă se consideră pământul ;

$[\underline{Y}]$  - este matricea pătratică a admitanțelor, conținând admitanțele legăturilor dintre noduri în termeni nediagonali, respectiv suma admitanțelor cu semn schimbat ce leagă nodul respectiv cu celelalte noduri.

Aceste ecuații sunt cunoscute sub numele de ecuații nodale.

În [30] se arată că analiza stărilor unui nod se poate face ușor aplicând schemele REI (rețea echivalentă independentă). În aceste scheme se elimină nodurile care nu sunt generatoare, păstrându-se numai cele generatoare.

Echivalând consumatorii cu impedanțe, se face o aproximație care este larg utilizată în sistemele electrice, servind în acest caz numai pentru reducerea schemei și a se putea scrie relații de forma [21, 24, 90]:

$$\underline{I}_s = \underline{Y}_s \times \underline{U}_s \quad (2.2)$$

pentru nodul s.

Dacă în relațiile (2.1) se grupează nodurile în noduri generatoare plus nodul analizat (r astfel de noduri) și noduri consumatoare pentru care se pot scrie relații de forma (2.2) (c astfel de noduri), introducând relațiile (2.2) în (2.1) se obține:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{rr} & \underline{Y}_{rc} \\ \underline{Y}_{cr} & \underline{Y}_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_r \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Aplicând eliminarea Gauss se reduc toate nodurile c, obținând o ecuație de forma:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_g \\ \underline{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{gg} & \underline{Y}_{gj} \\ \underline{Y}_{jg} & \underline{Y}_{jj} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_g \\ \underline{U}_j \end{bmatrix} , \quad (2.4)$$

în care g este numărul total de noduri generatoare, iar j este nodul analizat. Din această ecuație se obține ecuația nodului j :

$$\underline{I}_j = \underline{Y}_{j1} \cdot \underline{U}_1 + \underline{Y}_{j2} \cdot \underline{U}_2 + \dots + \underline{Y}_{jj} \cdot \underline{U}_j , \quad (2.5)$$

relație care permite asocierea unei scheme radiale.

Dacă din ecuația ( 2.4 ) se elimină și nodurile generatoare, după aceeași metodă, se obține o schemă ce conține un singur nod. Deoarece rețeaua se consideră simetrică, în ecuația (2.1 ) s-a operat cu o singură fază [6, 30, 56].

Reducând rețelele simetrice care sunt legate între ele prin elementul nesimetric la câte un singur nod se obține schema simplificată din figura 2.1.

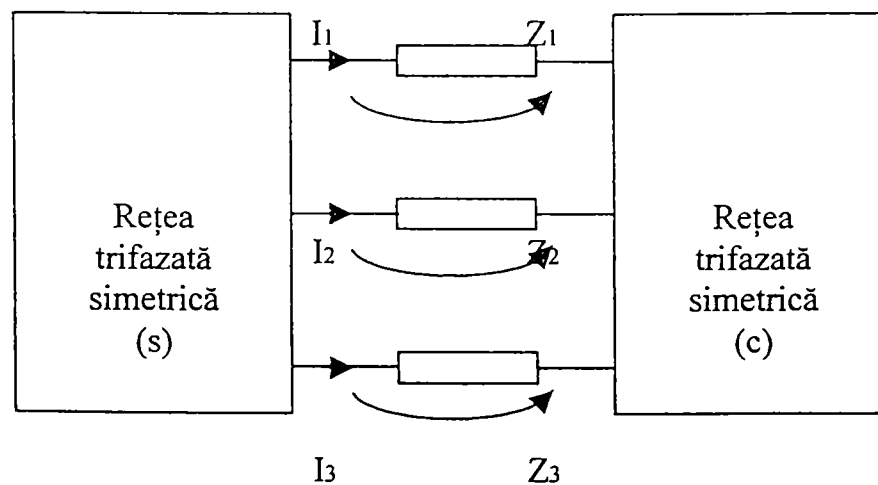


Fig.2.1.Schemă simplificată de calcul a unei nesimetrii

Acceptând că rețeaua trifazată simetrică ( s ) este activă, iar rețeaua trifazată simetrică ( c ) este pasivă, se poate scrie ecuația matricială [25]:

$$\underline{U}_e = \{ \underline{Z}_i \} + \{ \underline{Z}_c \} \{ \underline{I} \} + \underline{U} , \quad (2.6)$$

unde:

$$[\underline{U}_e]_t = [\underline{U}_{e1} \quad \underline{U}_{e2} \quad \underline{U}_{e3}]; [\underline{I}]_t = [\underline{I}_1 \quad \underline{I}_2 \quad \underline{I}_3]; [\underline{U}]_t = [\underline{U}_1 \quad \underline{U}_2 \quad \underline{U}_3] \quad , \quad (2.7)$$

$$[\underline{Z}_i] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} & \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i14} & \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43} \\ \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41} & \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24} & \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23} \\ \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31} & \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42} & \underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43} \end{bmatrix} \quad , \quad (2.8)$$

$$[\underline{Z}_c] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{c1} + \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c14} + \underline{Z}_{c41} & \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c14} + \underline{Z}_{c42} + \underline{Z}_{c12} & \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c14} + \underline{Z}_{c13} + \underline{Z}_{c43} \\ \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c21} + \underline{Z}_{c24} + \underline{Z}_{c41} & \underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c42} + \underline{Z}_{c24} & \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c24} + \underline{Z}_{c43} + \underline{Z}_{c23} \\ \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c31} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{c41} & \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c32} + \underline{Z}_{c34} + \underline{Z}_{c42} & \underline{Z}_{c3} + \underline{Z}_{c4} + \underline{Z}_{c34} + \underline{Z}_{c43} \end{bmatrix} \quad . \quad (2.9)$$

Semnificația mărimilor din relațiile (2.7), (2.8), (2.9) este următoarea:

$U_{e1}, U_{e2}, U_{e3}$  -tensiunile electromotoare ale surselor echivalente din rețeaua simetrică (s);

$U_1, U_2, U_3$  -căderile de fază de tensiune pe elementul nesimetric;

$I_1, I_2, I_3$  -curenții de fază prin elementul nesimetric;

$\underline{Z}_i$  -matricea impedanță a rețelei simetrice (s);

$\underline{Z}_c$  -matricea impedanță a rețelei simetrice (s).

Cu indicii 1, 2, 3 s-au notat fazele rețelei trifazate, iar cu 4 s-a notat nulul rețelei trifazate.

În calculul nesimetriei folosim metoda componentelor simetrice. Elementul nesimetric se înlocuiește cu surse a căror tensiuni la borne sunt  $U_1, U_2, U_3$ , conform teoremei substituției.

Componentele simetrice ale tensiunilor și curenților se determină din tensiunile și curenții de fază cu relațiile (2.10) și (2.11):

$$[\underline{U}]_s = [T]^{-1} \cdot [\underline{U}] \quad , \quad (2.10)$$

$$[\underline{I}]_s = [T]^{-1} \cdot [\underline{I}] \quad . \quad (2.11)$$

Matricea de transformare, respectiv inversa acesteia este [4, 56, 59, 60, 97]

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad , \quad [T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad , \quad (2.12)$$

unde  $a = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}$  reprezintă operatorul de rotație [21, 24, 97].

Relația de legătură între componentele simetrice ale tensiunilor și curenților din schema prezentată în figura 2.1 este:

$$[\underline{U}_c]_S = \{[\underline{Z}_i]_S + [\underline{Z}_c]_S\} \cdot [I]_S + [\underline{U}]_S \quad (2.13)$$

Matricile componentelor de secvență ale impedanțelor au expresiile:

$$[\underline{Z}_i]_S = [T]^{-1} \cdot [\underline{Z}_i] \cdot [T] \quad , \quad [\underline{Z}_c]_S = [T]^{-1} \cdot [\underline{Z}_c] \cdot [T] \quad (2.14)$$

Considerând matricile de secvență a impedanțelor ca având următoarea structură [4, 6, 10, 11, 12, 24]:

$$[\underline{Z}]_S = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{hd} & \underline{Z}_{hi} \\ \underline{Z}_{dh} & \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{di} \\ \underline{Z}_{ih} & \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_{ii} \end{bmatrix} \quad , \quad (2.15)$$

termenii matricelor de secvență  $[\underline{Z}_i]_S$  au expresiile date prin relațiile (2.16)

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ihh} = & \frac{1}{3} [ (\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i3} + 3\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43} ) + \\ & + (3\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i23} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i31} ) + \\ & + (3\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42} ) ] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ihd} = & \frac{1}{3} [ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24}) + a(\underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \\ & + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i14}) + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31} + \underline{Z}_{i4} + \\ & + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41} + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42}) + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43}) ] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ihl} = & \frac{1}{3} [ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24}) + a^2(\underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \\ & + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i12}) + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31} + \underline{Z}_{i4} + \\ & + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41} + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42}) + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43}) ] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{idh} = & \frac{1}{3} [ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + a(\underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24}) + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \\ & + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i14} + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23}) + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31}) + \\ & + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41}) + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43} ] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{idd} = & \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43} + \right. \\ & + a^2(\underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31}) + \\ & + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42}) + \\ & \left. + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43}) \right] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{idi} = & \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + a^2(\underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24}) + a(\underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \right. \\ & + a(\underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23} + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31}) + \\ & \left. + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42} + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43}) \right] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{iih} = & \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + a^2(\underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24}) + a(\underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \right. \\ & + \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23}) + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31}) + \\ & \left. + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41}) + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43} \right] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{iid} = & \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i41} + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24}) + a^2(\underline{Z}_{i3} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \right. \\ & + a^2(\underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23} + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31}) + \\ & \left. + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41}) + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42} + a(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43}) \right] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{iii} = & \frac{1}{3} \left[ (\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i3} + 3\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i43}) + \right. \\ & + a(\underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i43} + \underline{Z}_{i23} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i31}) \\ & \left. + a^2(\underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i21} + \underline{Z}_{i24} + \underline{Z}_{i41} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i32} + \underline{Z}_{i42} + \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i14} + \underline{Z}_{i13} + \underline{Z}_{i43}) \right] \cdot \quad (2.16) \end{aligned}$$

Termenii matricii de secvență  $[\underline{Z}_c]_S$  au aceeași formă cu ai matricii  $[\underline{Z}_i]_S$ .

Dacă impedanțele mutuale satisfac condiția de reciprocitate, adică:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} ; \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} ; \underline{Z}_{14} = \underline{Z}_{41} ; \underline{Z}_{24} = \underline{Z}_{42} ; \underline{Z}_{34} = \underline{Z}_{43} ; \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32},$$

expresiile termenilor matricii de secvență se exprimă prin relațiile :

$$\underline{Z}_{i hh} = \frac{1}{3} [\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i3} + 9\underline{Z}_{i4} + 6\underline{Z}_{i14} + 6\underline{Z}_{i24} + 2(\underline{Z}_{i34} + \underline{Z}_{i22} + \underline{Z}_{i23} + \underline{Z}_{i31})];$$

$$\underline{Z}_{i hd} = \frac{1}{3} [(\underline{Z}_{i1} + a^2 \underline{Z}_{i2} + a \underline{Z}_{i3} + 3\underline{Z}_{i14} + 3a^2 \underline{Z}_{i24} + 3a \underline{Z}_{i34} - a \underline{Z}_{i12} - \underline{Z}_{i23} - a^2 \underline{Z}_{i31})];$$

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{ihl} &= \frac{1}{3} \left[ \left( \underline{Z}_{i1} + a^2 \underline{Z}_{i2} + a \underline{Z}_{i3} + 3 \underline{Z}_{i14} + 3a \underline{Z}_{i24} + 3a^2 \underline{Z}_{i34} - a^2 \underline{Z}_{i12} - \underline{Z}_{i23} - a \underline{Z}_{i31} \right) \right]; \\
\underline{Z}_{idh} &= \frac{1}{3} \left[ \left( \underline{Z}_{i1} + a \underline{Z}_{i2} + a^2 \underline{Z}_{i3} + 3 \underline{Z}_{i14} + 3a \underline{Z}_{i24} + 3a^2 \underline{Z}_{i34} - a^2 \underline{Z}_{i12} - \underline{Z}_{i23} - a \underline{Z}_{i31} \right) \right]; \\
\underline{Z}_{idd} &= \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i3} - \underline{Z}_{i12} - \underline{Z}_{i23} - \underline{Z}_{i31} \right]; \\
\underline{Z}_{idi} &= \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + a^2 \underline{Z}_{i2} + a \underline{Z}_{i3} + 2 \left( a \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i23} + a^2 \underline{Z}_{i31} \right) \right]; \\
\underline{Z}_{iih} &= \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + a^2 \underline{Z}_{i2} + a \underline{Z}_{i3} + 3 \underline{Z}_{i14} + 3a^2 \underline{Z}_{i24} + 3a \underline{Z}_{i34} - \underline{Z}_{i22} - \underline{Z}_{i23} - a^2 \underline{Z}_{i31} \right]; \\
\underline{Z}_{iid} &= \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + a \underline{Z}_{i2} + a^2 \underline{Z}_{i3} + 2 \left( a^2 \underline{Z}_{i12} + \underline{Z}_{i23} + a \underline{Z}_{i31} \right) \right]; \\
\underline{Z}_{iii} &= \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{i2} + \underline{Z}_{i3} - \underline{Z}_{i12} - \underline{Z}_{i23} - \underline{Z}_{i31} \right].
\end{aligned} \tag{2.17}$$

În situația în care impedanțele matricii  $[\underline{Z}_i]$  respectiv  $[\underline{Z}_c]$  prezintă o simetrie ciclică, adică:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{i12} = \underline{Z}_{i23} = \underline{Z}_{i31} = \underline{Z}_i' ; \quad \underline{Z}_{i14} = \underline{Z}_{i24} = \underline{Z}_{i34} = \underline{Z}_{i4}' , \\
\underline{Z}_{i21} = \underline{Z}_{i32} = \underline{Z}_{i13} = \underline{Z}_i'' ; \quad \underline{Z}_{i41} = \underline{Z}_{i42} = \underline{Z}_{i43} = \underline{Z}_{i4}'' ,
\end{aligned}$$

elementele matricii de simetrie  $[\underline{Z}_i]_S$  vor avea următoarele expresii:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{ihh} &= \underline{Z}_i + \underline{Z}_i' + \underline{Z}_i'' + 3 \left( \underline{Z}_{i4} + \underline{Z}_{i4}' + \underline{Z}_{i4}'' \right); \quad \underline{Z}_{ihd} = 0; \quad \underline{Z}_{ihi} = 0; \quad \underline{Z}_{idh} = 0; \\
\underline{Z}_{idd} &= \underline{Z}_i + a^2 \underline{Z}_i' + a \underline{Z}_i''; \quad \underline{Z}_{idi} = 0; \quad \underline{Z}_{iih} = 0; \quad \underline{Z}_{iid} = 0; \quad \underline{Z}_{iii} = \underline{Z}_i + a \underline{Z}_i' + a^2 \underline{Z}_i'' .
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Dacă simetria devine totală, deci  $\underline{Z}_i' = \underline{Z}_i''$ ;  $\underline{Z}_{i4}' = \underline{Z}_{i4}''$  atunci elementele matricii  $[\underline{Z}_i]_S$  devin:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{ihh} &= \underline{Z}_i + 2 \underline{Z}_i' + 3 \left( \underline{Z}_{i4} + 2 \underline{Z}_{i4}' \right); \quad \underline{Z}_{idd} = \underline{Z}_i - \underline{Z}_i' = \underline{Z}_{iii} ; \\
\underline{Z}_{ihd} &= \underline{Z}_{ihi} = \underline{Z}_{idh} = \underline{Z}_{idi} = \underline{Z}_{iih} = \underline{Z}_{iid} = 0 .
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Elementele pasive (statice) de circuit satisfac condiția de reciprocitate, deci relațiile (2.17) exprimă termenii matricii  $[\underline{Z}_i]_S$  în forma lor cea mai generală pentru astfel de elemente.

Elementele dinamice din sistemul energetic satisfac de regulă condițiile impuse unei simetrii ciclice, deci pentru astfel de elemente se pot folosi relațiile (2.18) în exprimarea termenilor matricii  $[\underline{Z}_i]_S$ . La liniile electrice, pentru a se asigura o simetrizare a acestora, se fac transpuneri de fază astfel încât în majoritatea cazurilor pentru termenii matricii  $[\underline{Z}_i]_S$  pot fi folosite relațiile (2.19). La liniile de medie tensiune în cablu, de asemenea, condiția de simetrie



totală este în mare măsură satisfăcută (pentru cabluri trifazate), dar la liniile aeriene, care au coronamentul orizontal și fără transpuneri de fază, condițiile de simetrie totală nu sunt satisfăcute. Avându-se în vedere faptul că aceste linii au o lungime mică în calculul regimurilor de avarie se admite și în aceste cazuri că simetria este totală [11, 37, 90].

Matricea  $[\underline{U}]_s$  din ecuația (2.13) nu satisface condiția de simetrie, motiv pentru care termenii acestei matrici sunt dependenți de cele trei componente de secvență ale curenților.

Funcție de curenții și impedanțele de secvență această matrice se exprimă prin relația:

$$[\underline{U}]_s = [\underline{T}]^{-1} \cdot [\underline{Z}] \cdot [\underline{T}] \cdot [\underline{I}]_s = [\underline{Z}]_s \cdot [\underline{I}]_s . \quad (2.20)$$

Matricea  $[\underline{Z}]$  funcție de impedanțele corespunzătoare elementului nesimetric din schema prezentată în fig.2.1 devine:

$$[\underline{Z}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_3 \end{bmatrix} , \quad (2.21)$$

respectiv matricea impedanțelor de secvență:

$$\begin{aligned} [\underline{Z}]_s &= [\underline{T}]^{-1} \cdot [\underline{Z}] \cdot [\underline{T}] = \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3 & \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 \end{bmatrix} . \end{aligned} \quad (2.22)$$

Din relația (2.20) și (2.22) se obțin componentele simetrice ale tensiunii funcție de componentele simetrice ale curenților

$$\begin{aligned} \underline{U}_h &= \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_h + \frac{\underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_d + \frac{\underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_i ; \\ \underline{U}_d &= \frac{\underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_h + \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_d + \frac{\underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_i ; \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\underline{U}_i = \frac{\underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_h + \frac{\underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_d + \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{3} \underline{I}_i .$$

Utilizând următoarele notații:

$$\underline{Z}_{hh} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{3} , \quad \underline{Z}_{dd} = \frac{\underline{Z}_1 + a \underline{Z}_2 + a^2 \underline{Z}_3}{3} , \quad \underline{Z}_{ii} = \frac{\underline{Z}_1 + a^2 \underline{Z}_2 + a \underline{Z}_3}{3} \quad (2.24)$$

și introducând relațiile (2.23) în ecuația (2.13), aceasta devine:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{eh} \\ \underline{U}_{ed} \\ \underline{U}_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{ihh} + \underline{Z}_{chh} + \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{ihd} + \underline{Z}_{chd} + \underline{Z}_{ii} & \underline{Z}_{ihu} + \underline{Z}_{chu} + \underline{Z}_{dd} \\ \underline{Z}_{idh} + \underline{Z}_{cdh} + \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{idd} + \underline{Z}_{cdd} + \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{idi} + \underline{Z}_{cdi} + \underline{Z}_{ii} \\ \underline{Z}_{iuh} + \underline{Z}_{cuh} + \underline{Z}_{ii} & \underline{Z}_{iud} + \underline{Z}_{cud} + \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{iui} + \underline{Z}_{cui} + \underline{Z}_{hh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{23} \\ \underline{Z}_{31} & \underline{Z}_{32} & \underline{Z}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

iar curenții de secvență se exprimă prin:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{ihh} + \underline{Z}_{chh} + \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{ihd} + \underline{Z}_{chd} + \underline{Z}_{ii} & \underline{Z}_{ihu} + \underline{Z}_{chu} + \underline{Z}_{dd} \\ \underline{Z}_{idh} + \underline{Z}_{cdh} + \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{idd} + \underline{Z}_{cdd} + \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{idi} + \underline{Z}_{cdi} + \underline{Z}_{ii} \\ \underline{Z}_{iuh} + \underline{Z}_{cuh} + \underline{Z}_{ii} & \underline{Z}_{iud} + \underline{Z}_{cud} + \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{iui} + \underline{Z}_{cui} + \underline{Z}_{hh} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{eh} \\ \underline{U}_{ed} \\ \underline{U}_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{eh} \\ \underline{U}_{ed} \\ \underline{U}_{ei} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Cunoscând componentele de secvență ale curenților se determină curenții prin elementul nesimetric  $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$  cu relația:

$$[\underline{I}] = [\underline{T}] \cdot [\underline{I}]_s, \quad (2.27)$$

respectiv tensiunile elementului nesimetric  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$  prin relația:

$$[\underline{U}] = [\underline{Z}] \cdot [\underline{I}]. \quad (2.28)$$

Notând determinantul matricii impedanțelor cu D, acesta se exprimă funcție de impedanțe astfel:

$$\underline{D} = \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{22}\underline{Z}_{33} - \underline{Z}_{32}\underline{Z}_{23}) - \underline{Z}_{21}(\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{33} - \underline{Z}_{32}\underline{Z}_{13}) + \underline{Z}_{31}(\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{23} - \underline{Z}_{22}\underline{Z}_{13}); \quad (2.29)$$

termenii matricii admitanță devin:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{22}\underline{Z}_{33} - \underline{Z}_{32}\underline{Z}_{23}), Y_{12} = \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{32}\underline{Z}_{13} - \underline{Z}_{12}\underline{Z}_{33}), Y_{13} = \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{23} - \underline{Z}_{22}\underline{Z}_{13}), \\ Y_{21} &= \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{31} - \underline{Z}_{31}\underline{Z}_{23}), Y_{22} = \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{33} - \underline{Z}_{31}\underline{Z}_{13}), Y_{23} = \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{21}\underline{Z}_{13} - \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{23}), \\ Y_{31} &= \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{31}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21}\underline{Z}_{32}), Y_{32} = \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{31}\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{32}), Y_{33} = \frac{1}{\underline{D}}(\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21}\underline{Z}_{12}). \end{aligned} \quad (2.30)$$

Funcție de admitanțe, curenții de secvență se exprimă astfel:

$$\begin{aligned} \underline{I}_h &= \underline{Y}_{11}\underline{U}_{eh} + \underline{Y}_{12}\underline{U}_{ed} + \underline{Y}_{13}\underline{U}_{ei}, \\ \underline{I}_d &= \underline{Y}_{21}\underline{U}_{eh} + \underline{Y}_{22}\underline{U}_{ed} + \underline{Y}_{23}\underline{U}_{ei}, \\ \underline{I}_i &= \underline{Y}_{31}\underline{U}_{eh} + \underline{Y}_{32}\underline{U}_{ed} + \underline{Y}_{33}\underline{U}_{ei}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Termenii matricii admitanță se modifică funcție de tipul și locul în care apare defectul.

## 2.2. Nesimetrii transversale (scurtcircuite)

În cazul nesimetriilor transversale (scurtcircuite) impedanțele  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$  leagă un sistem simetric cu rețeaua de nul, care poate fi considerată un sistem simetric cu impedanțe și surse nule. Dacă defectele sunt nete sau printr-o impedanță de trecere de valoare scăzută, nesimetria impedanțelor transversale ale rețelei se poate neglija fără a face erori mai mari decât limitele în care de regulă pot fi apreciați ceilalți parametri ai rețelelor care se introduc în calcule. Atunci când defectul are loc printr-o impedanță de trecere mare, neglijarea nesimetriei impedanțelor transversale a fazelor sănătoase la locul de defect - ceea ce se acceptă de obicei [6,12, 24, 37, 60, 61] - poate conduce la erori mari, motiv pentru care s-au luat în considerare și aceste elemente.

### 2.2.1. Scurtcircuit monofazat prin rezistență de trecere

Pentru un astfel de defect transversal (elementul nesimetric leagă o rețea simetrică cu rețeaua simetrică nulă echivalentă pământului), impedanțele cu indicele "c" din figura 2.1 se anulează. Impedanțele cu indicele "i" reprezintă impedanțele echivalente a întregii rețele văzute de la locul de defect în lipsa defectului, iar tensiunile  $\underline{U}_e$  sunt tensiunile de la locul de defect, înaintea apariției acestuia. Considerând elementele transversale ale întregii rețele legate galvanic, concentrate la locul de defect, defectul pe faza 1 și impedanța de trecere la locul de defect ca fiind o rezistență  $R_t$  impedanțele  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$  din figura 2.1 devin:

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \underline{Z}; \quad \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z} \cdot R_t}{\underline{Z} + R_t}, \quad (2.32)$$

unde  $\underline{Z}$  reprezintă imedanța transversală de fază (față de pământ) a întregii rețele legate galvanic. Înlocuindu-se impedanțele  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$  în relațiile (2.24), pentru impedanțele de secvență se obțin valorile:

$$\underline{Z}_{hh} = \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3}, \quad \underline{Z}_{dd} = \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} = \underline{Z}_{ii}. \quad (2.33)$$

Admițându-se pentru restul elementelor din rețea o simetrie totală și ținând seama de relația (2.35), relația (2.26) devine:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{i_h} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} \\ \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \underline{Z}_{i_{dd}} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} \\ \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \underline{Z}_{i_{ii}} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{eh} \\ \underline{U}_{ed} \\ \underline{U}_{ei} \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

Impedanțele din relația (2.25) au expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} &= \underline{Z}_i + 2\underline{Z}'_{i4} + 3\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3}, \\ \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_{32} &= \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3}, \\ \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{33} &= \underline{Z}_i - \underline{Z}'_{i4} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} = \underline{Z}_{33}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

iar termenii matricii admitanță sunt:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \frac{\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}, \\ \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} &= -\frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}, \\ \underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32} &= -\frac{\underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11})}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) \cdot \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}, \\ \underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{33} &= -\frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}^2}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) \cdot \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Dacă se înlocuiesc expresiile admitanțelor în ecuațiile (2.31), pentru componentele de secvență ale curentului se obțin expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_h &= \frac{(\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} - \underline{Z}_{12}(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}, \\ \underline{I}_d &= \frac{(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{22})\underline{Z}_{12}\underline{U}_{eh} + \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11})\underline{U}_{ei} + (\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}^2)\underline{U}_{ed}}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) \cdot \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}, \\ \underline{I}_i &= \frac{(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{22})\underline{Z}_{12}\underline{U}_{eh} + \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11})\underline{U}_{ed} + (\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}^2)\underline{U}_{ei}}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) \cdot \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Din relația (2.26) se obține expresia curentului pe faza cu defect ( $\underline{I}_1$ ).

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = \frac{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} + (\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12})(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2}, \quad (2.38)$$

respectiv după înlocuirea impedanțelor cu expresiile lor,

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{Z}_i - \underline{Z}'_i + \underline{Z})\underline{U}_{eh} + \underline{Z}_i + 2\underline{Z}'_i + 3(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4}) + \underline{Z}(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_i + 2\underline{Z}'_i + 3(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4}) + \frac{\underline{Z}_i + 2\underline{Z}}{3} \left( \underline{Z}_i - \underline{Z}'_i + \frac{2\underline{Z}_i + \underline{Z}}{3} \right) - 2 \left( \frac{\underline{Z}_i - \underline{Z}}{3} \right)^2} \quad (2.39)$$

Considerându-se impedanțele transversale la locul de defect ca fiind infinite ( $Z \rightarrow \infty$ ) înainte de apariția defectului, ceea ce se acceptă în literatura de specialitate [21, 24, 37], la apariția defectului impedanța  $\underline{Z}_i$  devine  $R_i$  (rezistența de trecere la locul de defect). Înlocuind în relația (2.41) impedanța  $\underline{Z}_i$  cu  $R_i$  și trecându-se la limită ( $Z \rightarrow \infty$ ) se obține expresia curentului de scurtcircuit monofazat utilizată de regulă în literatura de specialitate [11, 21, 24, 59, 60, 61, 90].

De regulă tensiunile rețelei la locul de defect, înaintea apariției defectului, constituie un sistem trifazat aproximativ simetric, deci tensiunile  $\underline{U}_{eh}$  și  $\underline{U}_{ei}$  se pot neglija față de tensiunea de secvență directă  $\underline{U}_{ed}$ . Cu ajutorul relației (2.26) se obțin și expresiile curenților de pe celelalte două faze. Curentul care se închide prin nulul rețelei ( $\underline{I}_4$ ) are expresia :

$$\underline{I}_4 = 3(\underline{Y}_{11}\underline{U}_{eh} + \underline{Y}_{12}\underline{U}_{ed} + \underline{Y}_{13}\underline{U}_{ei}) \quad , \quad (2.40)$$

în care, dacă se înlocuiesc admitanțele funcție de impedanțe, devine :

$$\underline{I}_4 = 3 \frac{(\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} - \underline{Z}_{12}(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2} \quad . \quad (2.41)$$

Având în vedere relațiile (2.35) și faptul că  $\underline{U}_{ei} \ll \underline{U}_{ed}$  pentru curentul ( $\underline{I}_4$ ) se obține expresia:

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{ed}}{R_i \cdot \underline{k}} + \frac{3 \left[ \frac{R_i}{\underline{Z}} + \frac{\underline{Z} + R_i}{\underline{Z}^2} (\underline{Z}_i - \underline{Z}'_i) \right]}{R_i \cdot \underline{k}} \cdot \underline{U}_{eh} \quad , \quad (2.42)$$

unde  $\underline{k}$  se exprimă prin:

$$\underline{k} = 1 + \frac{2\underline{Z}'_i + \underline{Z}_i + 3(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4})}{\underline{Z}} + \frac{(\underline{Z}_i - \underline{Z}'_i) \left[ \underline{Z}_i + 2\underline{Z}'_i + 3(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4}) \right]}{\underline{Z}^2} \quad . \quad (2.43)$$

Dacă impedanțele  $\underline{Z}_i, \underline{Z}'_i, \underline{Z}_{i4}$  și  $\underline{Z}'_{i4}$  sunt mult mai mici decât impedanța  $\underline{Z}$  atunci  $\underline{k} \ll 1$ , relația (2.42) devenind

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{ed}}{R_i \cdot \underline{k}} + \frac{k_1 \underline{U}_{eh}}{R_i} \quad , \quad (2.44)$$

unde  $\underline{k}_1$  are expresia

$$\underline{k}_1 = \frac{3}{\underline{Z}} \left[ R_i \left( 1 + \frac{\underline{Z}_i - \underline{Z}'_i}{\underline{Z}} \right) + \underline{Z}_i - \underline{Z}'_i \right] \cong \frac{3R_i}{\underline{Z}} \quad . \quad (2.45)$$

Se observă că în cazul în care  $R_t$  este mare, coeficientul  $k_1$  poate atinge valori semnificative; în acest caz tensiunea  $\underline{U}_{eh}$  nu se mai poate neglija în calculul curentului  $\underline{I}_4$ .

Tensiunea  $\underline{U}_{ed}$  modifică puțin valoarea curentului  $\underline{I}_4$ , deoarece aceasta este mult mai mică decât tensiunea  $\underline{U}_{eh}$ , spre deosebire de  $\underline{U}_{eh}$  care poate determina modificări importante ale curentului  $\underline{I}_4$ .

### 2.2.2. Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ prin rezistență de trecere mare

Determinarea curenților în acest caz se face considerându-se în schema din figura 2.1 impedanțele cu indicele "c" nule, iar dacă considerăm fazele 2 și 3 puse la pământ, impedanțele  $\underline{Z}_1$ ,  $\underline{Z}_2$  și  $\underline{Z}_3$  devin

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z} \text{ și } \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z} \cdot R_t}{\underline{Z} + R_t}, \quad (2.46)$$

unde  $R_t$  este rezistența de trecere la locul de defect, iar  $\underline{Z}$  impedanța transversală (față de pământ) a rețelei la locul de defect.

Înlocuind aceste impedanțe în relațiile (2.24), pentru impedanțele de secvență se obțin expresiile:

$$\underline{Z}_{hh} = \frac{2\underline{Z}_2 + \underline{Z}}{3}, \quad \underline{Z}_{dd} = \frac{(\underline{Z} - \underline{Z}_2)}{3}, \quad \underline{Z}_{ii} = \frac{(\underline{Z} - \underline{Z}_2)}{3}. \quad (2.47)$$

Admițându-se simetrie totală pentru sistemul simetric, termenii matricii admitanță, și în acest caz, se exprimă cu ajutorul relațiilor (2.36), deci pentru curenții de secvență se obțin expresiile (2.37). Cu ajutorul relației (2.27) se determină curenții de pe cele trei faze.

Cunoscându-se curenții de pe cele trei faze, se obține și curentul din conductorul de nul ( $\underline{I}_4$ ).

Pentru curenții pe cele trei faze și din nul se obțin expresiile:

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} + (\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12})(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2},$$

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12})[\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2]} \left\{ (\underline{Z}_{22} + 2\underline{Z}_{12})(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} + \right.$$

$$+ [a\underline{Z}_{11}(a\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) - \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{22} + 2a^2\underline{Z}_{12})]\underline{U}_{ed} +$$

$$\left. + [a\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{22} - a\underline{Z}_{12}) - \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{22} + 2a\underline{Z}_{12})]\underline{U}_{ei} \right\},$$

$$\begin{aligned}
\underline{I}_3 = & \frac{1}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12})[\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2]} \left\{ (\underline{Z}_{22} + 2\underline{Z}_{12})(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} + \right. \\
& + [a\underline{Z}_{11}(a\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) - \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{22} + 2a\underline{Z}_{12})]\underline{U}_{ed} + \\
& \left. + [a\underline{Z}_{11}(a\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) - \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{22} + 2a^2\underline{Z}_{12})]\underline{U}_{ei} \right\} \\
\underline{I}_4 = & 3 \cdot \frac{(\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{12})\underline{U}_{eh} - \underline{Z}_{12}(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2} \tag{2.48}
\end{aligned}$$

Ținând seama de relațiile (2.47) și (2.35), curentul  $\underline{I}_4$  devine:

$$\underline{I}_4 = \frac{3(\underline{Z}_i - \underline{Z}'_i) + 2\underline{Z}_2 + \underline{Z} \underline{U}_{eh} + (\underline{Z}_2 - \underline{Z})(\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\left[ \underline{Z}_i + 2\underline{Z}'_i + 3(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4}) + \frac{2\underline{Z}_2 + \underline{Z}}{3} \right] + \left( \underline{Z}_i - \underline{Z}'_i + \frac{2\underline{Z}_2 + \underline{Z}}{3} \right) - 2 \left( \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}}{3} \right)^2} \tag{2.49}$$

Impunându-se condiția ca  $\underline{Z} \rightarrow \infty$ , se obține expresia curentului  $\underline{I}_4$  în situația în care nu se iau în considerare în calculul acestui curent elementele transversale la locul de defect. În aceste condiții relația (2.49) devine:

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{eh} - (\underline{U}_{ed} + \underline{U}_{ei})}{\underline{Z}_i + \underline{Z}'_i + 2(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4}) + R_f} \tag{2.50}$$

Deoarece tensiunile  $\underline{U}_{ei}$  și  $\underline{U}_{eh}$  sunt mult mai mici decât tensiunea  $\underline{U}_{ed}$ , relația (2.50) se poate scrie sub forma finală:

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{ed}}{\underline{Z}_i + \underline{Z}'_i + 2(\underline{Z}_{i4} + 2\underline{Z}'_{i4}) + R_f} \tag{2.51}$$

În literatură [21, 24, 37, 59, 60, 61], pentru curentul  $\underline{I}_4$  este dată cel mai frecvent relația (2.51). Din relația (2.49) se observă că tensiunea  $\underline{U}_{ei}$  se poate neglija la calculul curentului  $\underline{I}_4$  (de obicei  $\underline{U}_{ei} \ll \underline{U}_{ed}$ ), dar tensiunea  $\underline{U}_{eh}$  poate avea o contribuție însemnată la stabilirea valorii acestui curent.

## 2.3. Nesimetrii multiple

### 2.3.1. Stabilirea ecuației generale

Conform celor prezentate anterior, matricea de nesimetrie  $\underline{Z}$  prin care se produce defectul leagă între ele două sisteme simetrice.

Deci rețeaua în totalitatea ei poate fi privită ca un ansamblu de rețele interconectate prin rețele nesimetrice [8]. Elementele nesimetrice pot lega între ele noduri ale aceleiași rețele simetrice sau noduri a două sau mai multe rețele simetrice (figura 2.2).

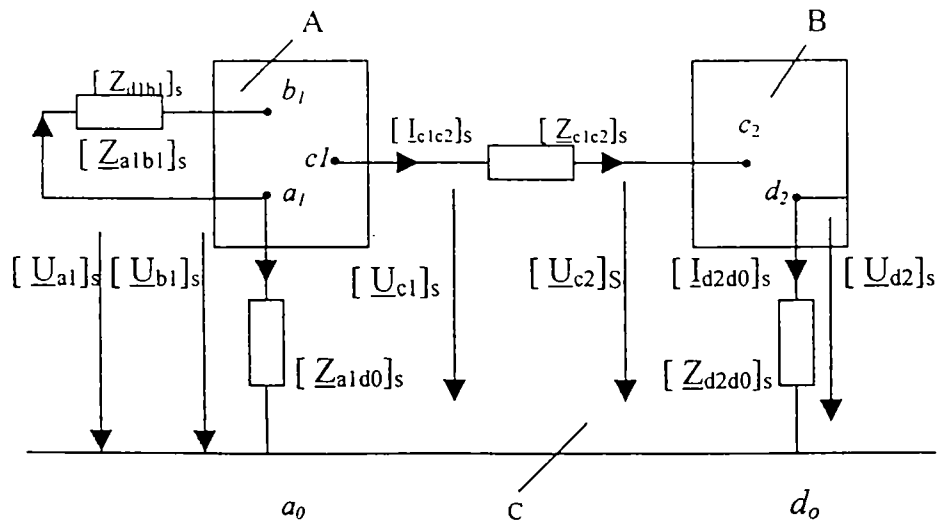


Fig.2.2.Explicativă privind calculul unei nesimetrii multiple

În această figură A, B și C se prezintă rețelele simetrice care au noduri interconectate prin legăturile nesimetrice de impedanțe  $[Z_1]$ ,  $[Z_2]$ ;  $[Z_3]$ ,  $[Z_4]$ . Rețeaua de nul s-a notat cu C.

Un nod în care apare o nesimetrie poate fi simplu sau multiplu, funcție de numărul legăturilor de nesimetrie existente în nodul respectiv. În figura 2.2 nodul a<sub>1</sub> este un nod dublu.

Un nod multiplu se poate considera ca fiind constituit dintr-o suprapunere de noduri simple. Prin aceasta, o rețea care prezintă noduri multiple se reduce la o rețea cu noduri simple [8].

Pentru stabilirea ecuației generale matriciale de calcul a nesimetriilor dintr-o rețea, elementele nesimetrice se elimină conform teoremei substituției, introducându-se în fiecare nod tensiunile acestuia față de nul  $[U_{a1}]_s \dots [U_{d2}]_s$  (figura 2.2) precum și curentii ce ar parcurge elementul nesimetric ( $[I_{a1b1}]_s \dots [I_{d2d0}]_s$ ), obținându-se rețele simetrice cu n noduri în care la fiecare nod (m) s-a introdus o tensiune  $[U_{mj}]$  și un curent  $[I_{mj,1}]$  (1 fiind nodul legat prin matricea elementului nesimetric  $[Z_{m1}]$  cu nodul m). Nodul 1 poate fi pe aceeași rețea simetrică j ca și nodul m sau pe o altă rețea simetrică (de exemplu j+1). Nodurile de pe aceeași rețea simetrică se notează cu litere în ordine alfabetică (literă curentă m), iar rețelele simetrice se notează cu cifre (mărimă curentă j). Nodurile legate între ele, din rețelele simetrice diferite prin elemente nesimetrice se notează cu aceeași literă. Dacă s este numărul total al rețelelor simetrice și n<sub>j</sub> numărul de noduri în care apar nesimetrii în rețeaua j, pentru fiecare nod al acestei rețele se poate scrie o relație de forma [8]:



$$\left[ \underline{U}_{emj} \right]_S - \left[ \underline{U}_{cmj} \right]_S = \left[ \underline{Z}_{mj,mj} \right]_S \cdot \left[ \underline{I}_{mj,1} \right]_S + \sum_{l,j=1}^n \left[ \underline{Z}_{mj,lj} \right]_S \cdot \left[ \underline{I}_{lj,vi} \right]_S ; \quad (2.52)$$

În relația (2.52) mărimile au următoarea semnificație :

$\left[ \underline{U}_{cmj} \right]$  - matricea coloană a componentelor simetrice a tensiunii din nodul m înaintea apariției defectului.

$\left[ \underline{U}_{mj} \right]_S$  - matricea coloană a componentelor simetrice a tensiunii din nodul m al rețelei j,

$\left[ \underline{Z}_{mj,mj} \right]_S$  -matricea de secvență a impedanțelor proprii văzute din nodul mj,

$\left[ \underline{I}_{mj,1} \right]_S$  - matricea coloană a componentelor simetrice a curentului din latura mj, 1 orientat spre nodul 1,

$\left[ \underline{I}_{lj,vi} \right]_S$  -matricea coloană a componentelor simetrice a curentului din latura lj, vi orientat spre nodul vi.

Scriind ecuația de forma (2.52) pentru fiecare nod al unei rețele și grupând matricial toate aceste ecuații, se obține ecuația [8, 9]:

$$\begin{bmatrix} \left[ \underline{U}_{eaj} \right]_S - \left[ \underline{U}_{eaj} \right]_S \\ \left[ \underline{U}_{ebj} \right]_S - \left[ \underline{U}_{bj} \right]_S \\ \vdots \\ \left[ \underline{U}_{enj} \right]_S - \left[ \underline{U}_{nj} \right]_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \underline{Z}_{aj,aj} \right]_S & \left[ \underline{Z}_{aj,bj} \right]_S & \cdots & \left[ \underline{Z}_{aj,nj} \right]_S \\ \left[ \underline{Z}_{bj,aj} \right]_S & \left[ \underline{Z}_{bj,bj} \right]_S & \cdots & \left[ \underline{Z}_{bj,nj} \right]_S \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[ \underline{Z}_{nj,aj} \right]_S & \left[ \underline{Z}_{nj,bj} \right]_S & \cdots & \left[ \underline{Z}_{nj,nj} \right]_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \left[ \underline{I}_{aj,\alpha} \right]_S \\ \left[ \underline{I}_{bj,\beta} \right]_S \\ \vdots \\ \left[ \underline{I}_{nj,\nu} \right]_S \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

sau încă

$$\left[ \Delta \underline{U}_{es} \right]_S = \left[ \underline{Z}_{mj,mj} \right]_S \left[ \underline{I} \right]_S + \left[ \underline{Z}_{mj,lj} \right]_S \left[ \underline{I} \right]_S . \quad (2.54)$$

Ecuații de forma (2.53) se pot scrie atâtea câte rețele simetrice există. Rangul hipermatricilor impedanță este egal cu numărul de noduri al fiecărei rețele simetrice existente.

Între tensiunile și curenții diverselor noduri se pot scrie relații de forma:

$$\left[ \underline{U}_{mj} \right]_S - \left[ \underline{U}_{mi} \right]_S = \left[ \underline{Z}_{mj,mj} \right]_S \cdot \left[ \underline{I}_{mj,mi} \right]_S . \quad (2.55)$$

Exprimând matricea curenților din relația (2.63) se obține:

$$\left[ \underline{I}_{mj,mi} \right]_S = \left[ \underline{Z}_{mj,mi} \right]_S^{-1} \cdot \left\{ \left[ \underline{U}_{em} \right]_S - \left[ \underline{U}_m \right]_S \right\} . \quad (2.56)$$

Relațiile (2.53) și (2.55) sau (2.53) și (2.56) dau ecuațiile necesare determinării matricilor de secvență a tensiunilor și curenților din fiecare nod în care se produce o nesimetrie. Pentru a ilustra modul în care se aplică ecuația generală (2.53) în determinarea tensiunilor și curenților din nodurile în care apar nesimetric se ia în considerare un caz mai general de nesimetrie care poate să apară într-un sistem energetic.

### 2.3.2. Elementele nesimetrice leagă între ele trei rețele simetrice

Un astfel de caz se întâlnește la un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ.

În situația în care trei rețele simetrice sunt legate între ele prin elemente nesimetrice (figura 2.3) pentru determinarea hipermetricii curenților din nodurile care prezintă nesimetrii se scriu relații de forma (2.53) pentru cele trei rețele simetrice obținându-se:

$$\begin{bmatrix} [\underline{U}_{ea1}]_S - [\underline{U}_{a1}]_S \\ [\underline{U}_{eb1}]_S - [\underline{U}_{b1}]_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{a1a1}]_S & [Z_{a1b1}]_S \\ [Z_{b1a1}]_S & [Z_{b1b1}]_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{a1a2}]_S \\ [I_{b3b1}]_S \end{bmatrix}, \tag{2.57}$$

$$\begin{bmatrix} [\underline{U}_{ea2}]_S - [\underline{U}_{a2}]_S \\ [\underline{U}_{ec2}]_S - [\underline{U}_{c2}]_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{a2a2}]_S & [Z_{a2c2}]_S \\ [Z_{c2a2}]_S & [Z_{c2c2}]_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{a1a2}]_S \\ [I_{c2c3}]_S \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} [\underline{U}_{eb3}]_S - [\underline{U}_{b3}]_S \\ [\underline{U}_{ec3}]_S - [\underline{U}_{c3}]_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{b3b3}]_S & [Z_{b3c3}]_S \\ [Z_{c3b3}]_S & [Z_{c3c3}]_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{b3b1}]_S \\ [I_{c2c3}]_S \end{bmatrix}.$$

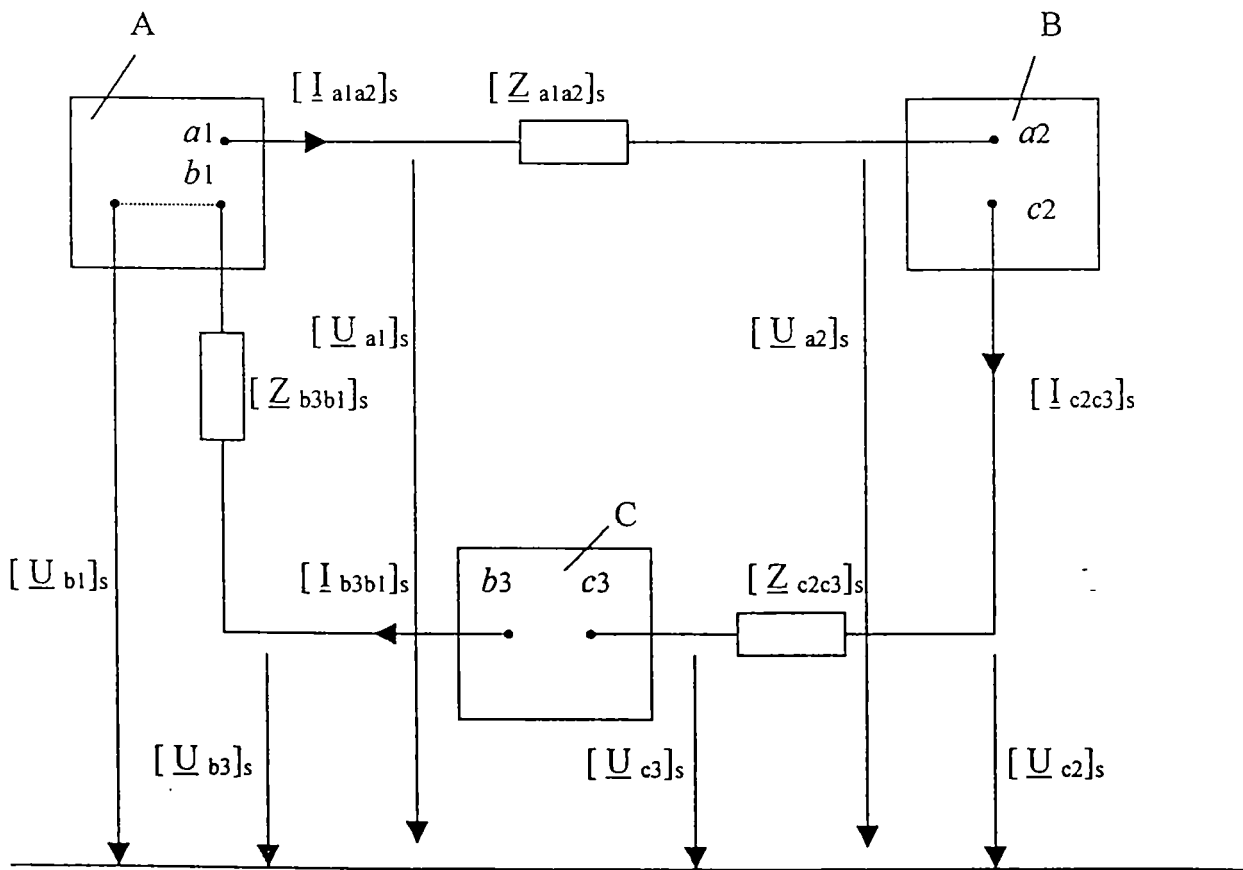


Fig.2.3.Explicativă privind calculul nesimetriei multiple când elementele nesimetrice leagă între ele trei rețele simetrice

Între tensiunile și curenții elementelor nesimetrice care leagă între ele rețelele simetrice

se pot scrie relațiile:

$$[\underline{U}_{a1}]_S - [\underline{U}_{a2}]_S = [Z_{a1a2}]_S \cdot [I_{a1a2}]_S, \tag{2.58}$$

$$[U_{c2}]_S - [U_{c3}]_S = [Z_{c2c3}]_S \cdot [I_{c2c3}]_S ,$$

$$[U_{b3}]_S - [U_{b1}]_S = [Z_{b3b1}]_S \cdot [I_{b3b1}]_S$$

Introducându-se relațiile (2.58) în relațiile (2.57) se obține ecuația matricială din care se determină matricile de secvență ale curenților din elementele nesimetrice care leagă rețelele simetrice între ele.

$$\begin{bmatrix} [U_{ea1}]_S - [U_{ea2}]_S \\ [U_{ec2}]_S - [U_{ec3}]_S \\ [U_{eb3}]_S - [U_{eb1}]_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{a1a1}]_S + [Z_{a2a2}]_S + [Z_{a1a2}]_S & -[Z_{a2c2}]_S & -[Z_{a1b1}]_S \\ -[Z_{c2a2}]_S & [Z_{c2c2}]_S + [Z_{c3c3}]_S + [Z_{c2c3}]_S & -[Z_{c2a2}]_S \\ -[Z_{b1a1}]_S & -[Z_{b3c3}]_S & [Z_{b3b3}]_S + [Z_{b1b1}]_S + [Z_{b3b1}]_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{a1a2}]_S \\ [I_{c2c3}]_S \\ [I_{b3b1}]_S \end{bmatrix} . \quad (2.59)$$

Dacă elementele nesimetrice leagă două noduri ale aceleiași rețele simetrice (de exemplu rețeaua A) prin particularizarea relațiilor (2.57) și considerând  $[I_{a1a2}]_S = [I_{c2c3}]_S = [I_{b3b1}]_S$  și  $[Z_{a2c2}]_S = [Z_{c3b3}]_S = 0$  se obține relația din care se determină matricea de secvență a curenților prin elementul nesimetric. În acest caz elementul nesimetric este constituit din înscrierea celor trei elemente nesimetrice din figura 2.3.

Relația care permite calculul curenților prin elementul nesimetric este:

$$[U_{ea1}]_S - [U_{eb1}]_S = \{ [Z_{a1a1}]_S + [Z_{b1b1}]_S - 2[Z_{b1a1}]_S + [Z_{a1a2}]_S + [Z_{c2c3}]_S + [Z_{b3b1}]_S \} \cdot [I_{a1a2}]_S \quad (2.60)$$

sau, înlocuind elementul nesimetric cu unul echivalent, relația (2.60) devine:

$$[U_{ea1}]_S - [U_{eb1}]_S = \{ [Z_{a1a1}]_S + [Z_{b1b1}]_S + [Z_{aeb1}]_S - 2[Z_{a1a1}]_S \} \cdot [I_{a1a2}]_S . \quad (2.61)$$

Pentru analiza simplilor puneri la pământ se particularizează relația (2.59) considerând  $[Z_{a1a2}] = 0$ , legătura dintre rețeaua simetrică B și C întreruptă și rețeaua simetrică C cu elementele deoarece reprezintă pământul.

### Cap.3. ANALIZA SIMPLELOR PUNERI LA PĂMÂNT

Defectul cu ponderea cea mai mare din totalul celor ce se înregistrează la rețelele de medie tensiune îl reprezintă simplele puneri la pământ [ 16, 17, 19, 40, 41, 65, 69, 113 ]. Soluția aleasă pentru tratarea neutrului influențează dependența mărimilor ( tensiuni, curenți, etc.) specifice rețelei în funcție de condițiile în care are loc defectul. Pentru stabilirea reglajelor protecțiilor, este necesar să se analizeze dependența tensiunii homopolare pe barele de medie tensiune ale stației de transformare, dependența curentului de defect, dependența curenților elementului sau elementelor utilizate pentru tratarea neutrului și dependența curenților capacitivi funcție de rezistența de trecere ( $R_t$ ) la locul de defect, de curentul capacitiv total al rețelei de medie tensiune și funcție de regimul în care funcționează rețeaua. În acest capitol se analizează dependența acestor mărimi în funcție de parametri menționați, luându-se în considerare cele cinci moduri în care poate fi tratat neutrul rețelei de medie tensiune. Nu se analizează cazul când neutrul este tratat cu rezistor și „întreruptor șunt” deoarece acesta este identic cu cel în care neutrul este tratat cu rezistor și punerea la pământ este netă ( $R_t = 0$ ).

#### 3.1. Modelul matematic

Pentru stabilirea modelului matematic de analiză a unei simple puneri la pământ se utilizează relațiile prezentate în capitolul 2. Modul în care elementul nesimetric interconectează rețele simetrice în cazul acestui defect este prezentat în figura 3.1.

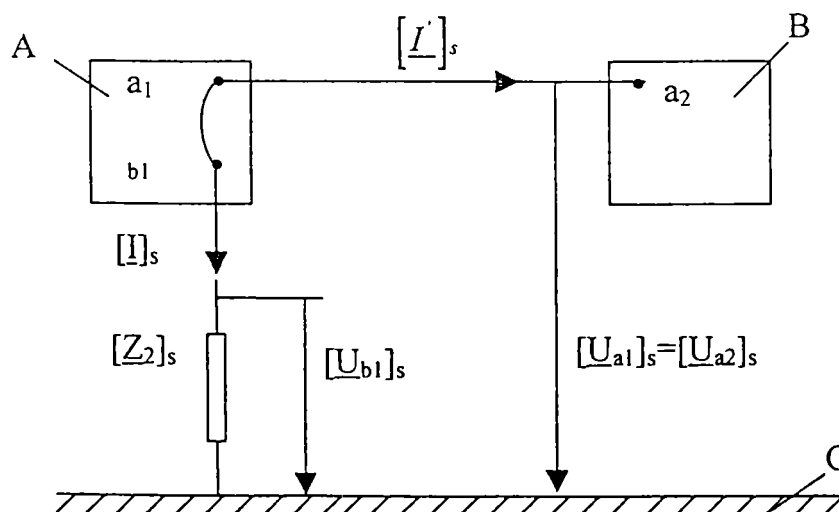


Fig.3.1. Explicativă privind calculul unei simple puneri la pământ

În această figură elementele au următoarea semnificație:

- A – rețeaua simetrică ce reprezintă sursa, inclusiv linia până la locul de defect;
- B – rețeaua simetrică ce reprezintă consumatorul, inclusiv linia în spatele defectului ;
- C – rețeaua simetrică echivalentă pământului;

$[Z_2]_s$  - matricea impedanțelor de secvență la locul de defect;

$[I]_s$  - matricea de secvență a curenților la locul de defect;

$[I']_s$  - matricea de secvență a curenților spre consumator.

Pentru nodul  $a_1$  identic cu nodul  $b_1$  (figura 3.1), relația (2.59) devine:

$$[U_{ed}]_s - [U_{a1}]_s = [Z_{a1a1}]_s \cdot \left\{ [I]_s + [I']_s \right\} \quad (3.1)$$

iar pentru nodul  $a_2$  aparținând rețelei simetrice B aceeași relație devine:

$$[U_{ea2}]_s - [U_{a2}]_s = [Z_{a2a2}]_s \cdot [I']_s \quad (3.2)$$

Matricea în componente simetrice a tensiunii nodului  $a_1$  satisface relația:

$$[U_{a1}]_s = [Z_2]_s \cdot [I]_s = [U_{b1}]_s \quad (3.3)$$

Cu notațiile  $[Z_{a1a1}]_s = [Z_s]_s$  și  $[Z_{a2a2}]_s = [Z_c]_s$ , din relațiile (3.1.), (3.2.), și (3.3.) se

obține sistemul:

$$[U_e]_s = ([Z_s]_s + [Z_c]_s) \cdot [I']_s + [Z_s]_s \cdot [I]_s \quad (3.4)$$

$$[0] = -[Z_c]_s \cdot [I']_s + [Z_2]_s \cdot [I]_s$$

Din ecuația a doua rezultă că:

$$[I]_s = [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_c]_s \cdot [I']_s \quad (3.5)$$

relație care introdusă în prima ecuație permite determinarea matricii  $[I']_s$ .

$$[U_e]_s = ([Z_s]_s + [Z_c]_s + [Z_s]_s \cdot [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_c]_s) \cdot [I']_s \quad (3.6)$$

Termenii matricii  $[Z_2]_s^{-1}$  se determină cu relațiile (2.30).

Dezvoltându-se ecuația (3.6.) se obține sistemul:

$$\begin{aligned} U_{eh} &= (Z_{sh} + Z_{ch} + Z_{sh} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{11}) \cdot I_h + Z_{sh} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{12} \cdot I_d + Z_{sh} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{12} \cdot I_i, \\ U_{ed} &= Z_{sd} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{12} \cdot I_h + (Z_{sd} + Z_{cd} + Z_{sd} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{22}) \cdot I_d + Z_{sd} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{23} \cdot I_i, \\ U_{ei} &= Z_{si} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{12} \cdot I_h + Z_{si} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{23} \cdot I_d + (Z_{si} + Z_{ci} + Z_{si} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{22}) \cdot I_i, \end{aligned} \quad (3.7)$$

sistem care rezolvat ne conduce la următoarele expresii pentru curenții  $I_h$ ,  $I_d$  și  $I_i$ :

$$\begin{aligned} I_h &= \frac{1}{D} [U_{eh}(a_{22} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{23}) - U_{ed}(a_{12} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{13}) + U_{ei}(a_{12} \cdot a_{23} - a_{22} \cdot a_{13})] , \\ I_d &= \frac{1}{D} [U_{eh}(a_{31} \cdot a_{23} - a_{21} \cdot a_{33}) + U_{ed}(a_{11} \cdot a_{33} - a_{31} \cdot a_{13}) - U_{ei}(a_{11} \cdot a_{23} - a_{21} \cdot a_{13})] , \\ I_i &= \frac{1}{D} [U_{eh}(a_{21} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{22}) - U_{ed}(a_{11} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{12}) + U_{ei}(a_{11} \cdot a_{22} - a_{21} \cdot a_{12})] \quad (3.8) \end{aligned}$$

în care  $D$  este determinantul sistemului (3.7.) și se exprimă sub forma:

$$\underline{D} = \underline{a}_{11}(\underline{a}_{22} \cdot \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{23}) - \underline{a}_{21}(\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{13}) + \underline{a}_{31}(\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{23} - \underline{a}_{22} \cdot \underline{a}_{13}). \quad (3.9)$$

Coeficienții  $\underline{a}_{ij}$  ( $i = \overline{1,3}$ ,  $j = \overline{1,3}$ ) au expresiile :

$$\begin{aligned} \underline{a}_{11} &= \underline{Z}_{sh} + \underline{Z}_{ch} + \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Z}_{ch} \cdot \underline{Y}_{11}; & \underline{a}_{12} &= \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{Y}_{12}; & \underline{a}_{13} &= \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{Y}_{12}; \\ \underline{a}_{21} &= \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{Z}_{ch} \cdot \underline{Y}_{12}; & \underline{a}_{22} &= \underline{Z}_{sd} + \underline{Z}_{cd} + \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{Y}_{22}; & \underline{a}_{23} &= \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{Y}_{23}; \\ \underline{a}_{31} &= \underline{Z}_{si} \cdot \underline{Z}_{ch} \cdot \underline{Y}_{12}; & \underline{a}_{32} &= \underline{Z}_{si} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{Y}_{23}; & \underline{a}_{33} &= \underline{Z}_{si} + \underline{Z}_{ci} + \underline{Z}_{si} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{Y}_{22}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Introducând relațiile (3.8.) în relațiile (3.5.) pentru curenții  $\underline{I}_h, \underline{I}_d$  și  $\underline{I}_i$  se obțin expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_h &= \underline{Z}_{ch} \cdot \underline{Y}_{11} \cdot \underline{I}'_h + \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{I}'_d + \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{I}'_i; \\ \underline{I}_d &= \underline{Y}_{12} \underline{Z}_{ch} \cdot \underline{I}'_h + \underline{Y}_{22} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{I}'_d + \underline{Y}_{23} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{I}'_i; \\ \underline{I}_i &= \underline{Y}_{12} \underline{Z}_{ch} \cdot \underline{I}'_h + \underline{Y}_{23} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{I}'_d + \underline{Y}_{22} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{I}'_i. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Curenții de fază ai liniei cu defect se determină cu relațiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_h + \underline{I}'_h + \underline{I}_d + \underline{I}'_d + \underline{I}_i + \underline{I}'_i; \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_h + \underline{I}'_h + \underline{a}^2(\underline{I}_d + \underline{I}'_d) + \underline{a}(\underline{I}_i + \underline{I}'_i); \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_h + \underline{I}'_h + \underline{a}(\underline{I}_d + \underline{I}'_d) + \underline{a}^2(\underline{I}_i + \underline{I}'_i). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare se determină cu relația [7, 11, 25, 47, 59, 60, 61]

$$\underline{U}_{hb} = \frac{(\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n + \underline{Z}_{hc}} \cdot (\underline{I}'_h + \underline{I}_h). \quad (3.13)$$

Curentul prin impedența de tratare a nulului rețelei este:

$$\underline{I}_n = \frac{3\underline{U}_{hb}}{\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n}. \quad (3.14)$$

Având în vedere faptul că rețelele de medie tensiune funcționează radial, o schemă de principiu în care apare un astfel de defect este prezentată în figura 3.2. Considerând sistemul pe partea de 110 kV ca fiind de putere infinită impedența acestuia este nulă. În aceste condiții matricea  $[\underline{Z}_s]_s$  se exprimă prin relația (3.15) iar coeficienții  $\underline{a}_{ij}$  ( $i = \overline{1,3}$ ;  $j = \overline{1,3}$ ) devin:

$$[\underline{Z}_s]_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{sh} + \underline{Z}_{Lh} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{ds} + \underline{Z}_{dl} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{si} + \underline{Z}_{Li} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \underline{a}_{11} &= \underline{Z}_{ch} \left( 1 + \frac{\underline{Z}_{hc}(\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n)}{\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n + \underline{Z}_{hc}} \cdot \underline{Y}_{11} \right) - \frac{\underline{Z}_{hc}(\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n)}{\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n + \underline{Z}_{hc}}, \\ \underline{a}_{12} &= (\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n + \underline{Z}_{hl}) \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{Y}_{12}, \quad \underline{a}_{13} = (\underline{Z}_{hTSl} + 3\underline{Z}_n + \underline{Z}_{hl}) \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{Y}_{12}, \quad \underline{a}_{21} = \underline{Z}_{dTr} \cdot \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Z}_{ch}, \\ \underline{a}_{22} &= \underline{Z}_{dTr} (1 + \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{Y}_{22}) + \underline{Z}_{cd}, \quad \underline{a}_{23} = \underline{Z}_{dTr} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{Y}_{23}, \quad \underline{a}_{31} = \underline{Z}_{dTr} \cdot \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Z}_{ch}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\underline{a}_{32} = \underline{Z}_{dTr} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{Y}_{23}, \quad \underline{a}_{33} = \underline{Z}_{dTr} (1 + \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{Y}_{22}) + \underline{Z}_{ci}.$$

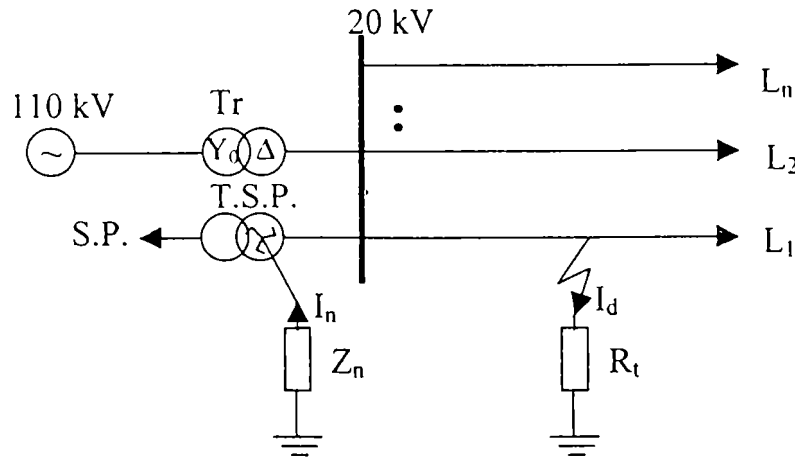


Fig. 3.2. Schema monofilară a rețelei în care s-a produs punerea la pământ

Dacă se are în vedere faptul că impedanța de secvență homopolară a consumatorului este infinită ( datorită conexiunii triunghi sau stea pe partea de medie tensiune a transformatorului de medie / joasă tensiune) relațiile (3.8.) devin:

$$\underline{I}'_h = 0;$$

$$\underline{I}'_d = \frac{1}{\underline{D}_1} \{ \underline{U}_{eh} (\underline{Z}_{si} \cdot \underline{a}_{23} - \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{a}_{33}) \underline{Y}_{12} + \underline{U}_{ed} [(1 + \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Y}_{11}) \underline{a}_{33} - \underline{Z}_{si} \cdot \underline{Y}_{12} \cdot \underline{a}_{13}] - \underline{U}_{ei} [(1 + \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Y}_{11}) \underline{a}_{23} - \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{Y}_{12} \cdot \underline{a}_{13}] \} \quad , \quad (3.17)$$

$$\underline{I}'_i = \frac{1}{\underline{D}_1} \{ \underline{U}_{eh} \cdot \underline{Y}_{12} (\underline{Z}_{sd} \cdot \underline{a}_{32} - \underline{Z}_{si} \cdot \underline{a}_{22}) - \underline{U}_{ed} [(1 + \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Y}_{11}) \underline{a}_{32} - \underline{Z}_{si} \cdot \underline{Y}_{12} \cdot \underline{a}_{12}] + \underline{U}_{ei} [(1 + \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Y}_{11}) \underline{a}_{22} - \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{Y}_{12} \cdot \underline{a}_{12}] \} \quad ,$$

unde  $\underline{D}_1$  are expresia:

$$\underline{D}_1 = (1 + \underline{Z}_{sh} \cdot \underline{Y}_{11}) (\underline{a}_{22} \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{23}) - \underline{Z}_{sd} \cdot \underline{Y}_{12} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{13}) + \underline{Z}_{si} \underline{Y}_{12} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{23} - \underline{a}_{22} \cdot \underline{a}_{13}) \quad (3.18)$$

De asemenea, relațiile (3.11.) devin:

$$\underline{I}_h = \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{D}_1} [\underline{U}_{eh} (\underline{a}_{22} \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{23}) - \underline{U}_{ed} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{13}) + \underline{U}_{ei} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{23} - \underline{a}_{22} \cdot \underline{a}_{13})] + \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{I}'_d + \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{I}'_i \quad ,$$

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{D}_1} [\underline{U}_{eh} (\underline{a}_{22} \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{23}) - \underline{U}_{ed} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{13}) + \underline{U}_{ei} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{23} - \underline{a}_{22} \cdot \underline{a}_{13})] + \underline{Y}_{22} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{I}'_d + \underline{Y}_{23} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{I}'_i \quad , \quad (3.19)$$

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{D}_1} [\underline{U}_{eh} (\underline{a}_{22} \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{23}) - \underline{U}_{ed} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{33} - \underline{a}_{32} \cdot \underline{a}_{13}) + \underline{U}_{ei} (\underline{a}_{12} \cdot \underline{a}_{23} - \underline{a}_{22} \cdot \underline{a}_{13})] + \underline{Y}_{23} \cdot \underline{Z}_{cd} \cdot \underline{I}'_d + \underline{Y}_{22} \cdot \underline{Z}_{ci} \cdot \underline{I}'_i \quad .$$

În relațiile (3.13) și (3.16) impedanța  $\underline{Z}_{hc}$  reprezintă impedanța homopolară capacitivă a rețelei de medie tensiune.

Cunoscând matricele  $[I']_s$  și  $[I]_s$ , se determină curenții de fază (relațiile 3.12), curentul prin impedanța de tratare a nulului (relația 3.14), tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare (relația 3.13), respectiv tensiunile de fază la locul de defect.

Parametrii  $\underline{Y}_{ij}$  ( $i = \overline{1,3}$ ;  $j = \overline{1,3}$ ) se determină din relațiile (2.36), în care impedanțele au expresiile din relațiile (2.35)

Pentru determinarea operativă a mărimilor (tensiune, curenți) ce caracterizează rețeaua electrică în timpul unei simple puneri la pământ, funcție de rezistența de trecere la locul de defect ( $R_z$ ), se definesc următorii coeficienți:

- coeficientul de reducere al tensiunii homopolare:

$$K_{U_h}(R_t) = \frac{U_h(R_t)}{U_h(R_t = 0)}, \quad (3.20)$$

- coeficientul de reducere al curentului de defect:

$$K_{I_d}(R_t) = \frac{I_d(R_t)}{I_d(R_t = 0)}, \quad (3.21)$$

- coeficientul de reducere a curenților capacitivi ai liniilor fără defect:

$$K_{I_c}(R_t) = \frac{I_c(R_t)}{I_c(R_t = 0)}, \quad (3.22)$$

- coeficientul de reducere al curentului prin bobina de compensare:

$$K_{I_{bc}}(R_t) = \frac{I_{bc}(R_t)}{I_{bc}(R_t = 0)}, \quad (3.23)$$

- coeficientul de reducere al curentului prin rezistorul de tratare al neutrlui:

$$K_{I_{R_n}}(R_t) = \frac{I_{R_n}(R_t)}{I_{R_n}(R_t = 0)}. \quad (3.24)$$

În cazul în care se acceptă parametrii transversali ai rețelei ca fiind concentrați pe barele de medie tensiune ale stației de transformare și se consideră defectul la începutul liniei ( $Z_{l_d} = Z_{l_i} = Z_{l_h} = 0$ ), pentru acești coeficienți se obțin expresiile:

$$K_{U_h}(R_t) = \left| \frac{\underline{Z}_h(R_t) \cdot \underline{I}_h(R_t)}{\underline{Z}_h(R_t = 0) \cdot \underline{I}_h(R_t = 0)} \right| = \frac{1}{\left| 1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h} \right|}. \quad (3.25)$$



$$K_{I_d}(R_t) = \left| \frac{3\underline{I}_h(R_t)}{3\underline{I}_h(R_t = 0)} \right| = \frac{1}{\left| 1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h} \right|}, \quad (3.26)$$

$$K_{I_c}(R_t) = \left| \frac{j\omega C_h \cdot \underline{U}_h(R_t)}{j\omega C_h \cdot \underline{U}_h(R_t = 0)} \right| = \frac{1}{\left| 1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h} \right|}, \quad (3.27.)$$

$$K_{I_{BC}}(R_t) = \left| \frac{\frac{\underline{U}_h(R_t)}{\underline{Z}_{hTSI} + \underline{Z}_{hBC}}}{\frac{\underline{U}_h(R_t = 0)}{\underline{Z}_{hTSI} + \underline{Z}_{hBC}}} \right| = \frac{1}{\left| 1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h} \right|}, \quad (3.28)$$

$$K_{I_{R_n}}(R_t) = \left| \frac{\frac{\underline{U}_h(R_t)}{\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n}}{\frac{\underline{U}_h(R_t = 0)}{\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n}} \right| = \frac{1}{\left| 1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h} \right|}. \quad (3.29)$$

Relațiile (3.25.).....(3.29.) arată că, în condițiile simplificatorii admise, cei cinci coeficienți au aceeași relație de calcul, deci pentru determinarea acestor mărimi se poate utiliza același coeficient.

În relațiile (3.25.).....(3.29.) impedanțele au următoarea semnificație :

$\underline{Z}_d$  - impedanța de secvență directă echivalentă rețelei văzută de la locul de defect în absența defectului;

$\underline{Z}_i$  - impedanța de secvență inversă echivalentă rețelei văzută de la locul de defect în absența defectului;

$\underline{Z}_h$  - impedanța de secvență homopolară echivalentă rețelei, văzută de la locul de defect în absența defectului.

Cunoscând acest coeficient caracteristic se determină mărimile ce caracterizează o simplă punere la pământ cu relațiile:

$$\underline{U}_h(R_t) = K_{U_h}(R_t) \cdot \underline{U}_h(R_t = 0), \quad (3.30)$$

$$\underline{I}_d(R_t) = K_{I_d}(R_t) \cdot \underline{I}_d(R_t = 0), \quad (3.31)$$

$$\underline{I}_c(R_t) = K_{I_c}(R_t) \cdot \underline{I}_c(R_t = 0), \quad (3.32)$$

$$\underline{I}_{BC}(R_t) = K_{I_{BC}}(R_t) \cdot \underline{I}_{BC}(R_t = 0), \quad (3.33)$$

$$\underline{I}_{R_n}(R_t) = K_{I_{R_n}}(R_t) \cdot \underline{I}_{R_n}(R_t = 0). \quad (3.34)$$

Deoarece impedanța de secvență homopolară ( $\underline{Z}_h$ ) depinde de soluția aleasă pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune, expresiile utilizate efectiv în calculul coeficientului  $K_{U_h}$  depind și ele de aceasta, motiv pentru care este necesar să se determine coeficientul precizat în funcție de modul de tratare a neutrului separat.

### 3.2. Rețea cu neutrul izolat

În cazul rețelei de medie tensiune cu neutrul izolat, impedanța de secvență homopolară, văzută de la locul de defect în absența defectului, este tocmai impedanța homopolară capacitivă a rețelei de medie tensiune legată galvanic ( $\underline{Z}_{hc}$ ), deci coeficientul  $K_{U_h}$  se exprimă prin relația:

$$K_{U_h} = \frac{1}{\left| 1 + \frac{3R_f}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_{hc}} \right|} \quad (3.35.)$$

Pentru calculul acestui coeficient s-a considerat transformatorul  $T_r$  din figura 3.2. având puterea nominală 16 MVA și conexiune triunghi a înfășurării de 20 kV. În situația considerată parametrii de secvență ai transformatorului devin [ 105,106,109].

$$\underline{Z}_{dTr} = \underline{Z}_{iTr} = (0,2 + j 2,7) \Omega ; \quad \underline{Z}_{hTr} = \infty .$$

Curenții capacitivi totali ai rețelei de medie tensiune (notați cu  $\Sigma I_c$ ) se consideră că au valorile: 12 A; 23 A; 40 A; 60 A; 80 A. În aceste condiții, impedanțele de secvență homopolară capacitivă a rețelei de medie tensiune devin:

$$\underline{Z}_{hc} = (50 - j 2887) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 12 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (26 - j 1506) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 23 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (15,1 - j 866) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 40 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (10,2 - j 577) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 60 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (7,6 - j 433) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 80 \text{ A};$$

Dependența coeficientului  $K_{U_h}$  funcție de rezistența de trecere este prezentată în fig. 3.3.

Rezistența de trecere la locul de defect s-a considerat că variază pe intervalul 0....5000  $\Omega$ . La stabilirea valorilor acestor parametri s-au avut în vedere cele mai uzuale cazuri întâlnite în rețelele de medie tensiune de la noi din țară [136, 137, 140, 141]. Pentru calculul coeficientului  $K_{U_h}$  și trasarea dependenței s-a utilizat programul MATHCAD-6 [95].

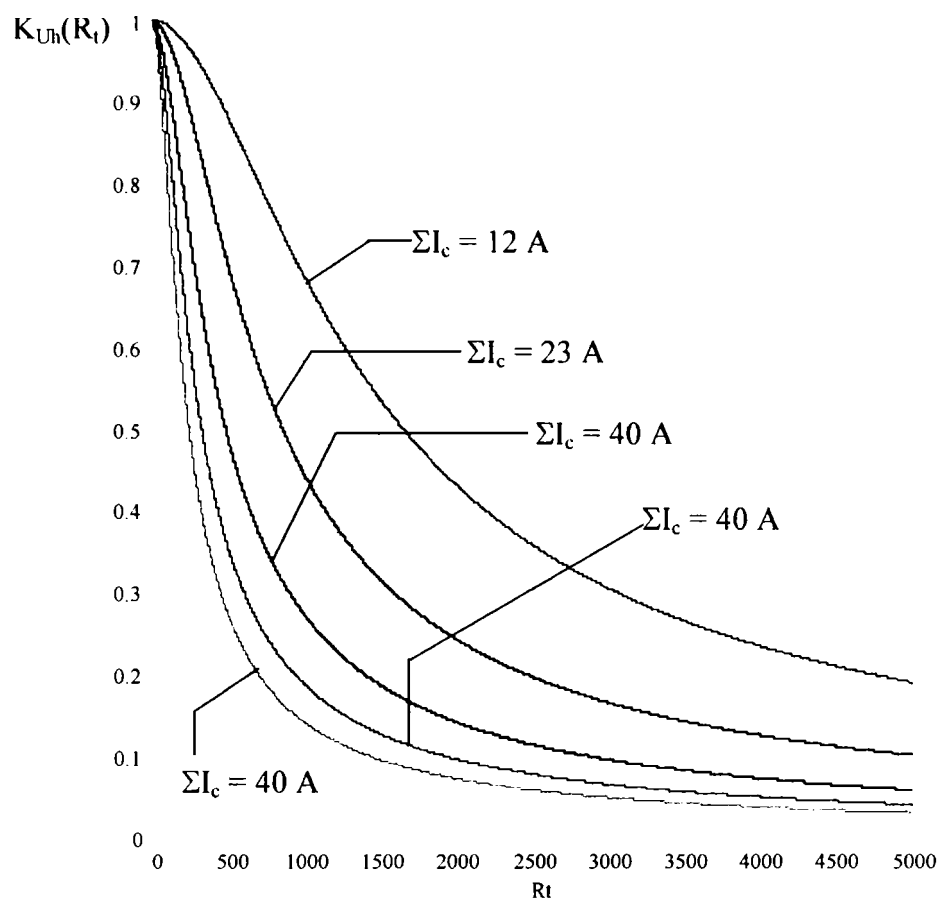


Fig. 3.3. Dependența coeficientului de reducere a tensiunii homopolare  $K_{U_h}$  funcție de rezistența de trecere la locul simplei puneri la pământ, când nulul este izolat

Din fig.3.3 se constată importanța deosebită pe care o are valoarea curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV asupra dependenței coeficientului  $K_{U_h}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect ( $R_t$ ). Astfel, pentru  $R_t = 500 \Omega$  coeficientul  $K_{U_h}$  are valorile: 0,88 dacă  $\Sigma I_c = 12 \text{ A}$ ; 0,71 dacă  $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ ; 0,5 dacă  $\Sigma I_c = 40 \text{ A}$ ; 0,36 dacă  $\Sigma I_c = 60 \text{ A}$ ; 0,27 dacă  $\Sigma I_c = 80 \text{ A}$ . În cazul în care  $R_t = 5000 \Omega$ , coeficientul  $K_{U_h}$  are valorile: 0,18 dacă  $\Sigma I_c = 12 \text{ A}$ ; 0,1 dacă  $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ ; 0,06 dacă  $\Sigma I_c = 40 \text{ A}$ ; 0,04 dacă  $\Sigma I_c = 60 \text{ A}$ ; 0,03 dacă  $\Sigma I_c = 80 \text{ A}$ .

Tensiunea homopolară pe barele stației de transformare în secundarul filtrului homopolar scade sub 10 V dacă  $R_t \geq 5000 \Omega$  și  $\Sigma I_c \geq 23 \text{ A}$ , dacă  $R_t \geq 3000 \Omega$  și  $\Sigma I_c \geq 40 \text{ A}$ , dacă  $R_t \geq 200 \Omega$  și  $\Sigma I_c \geq 60 \text{ A}$ , dacă  $R_t \geq 1500 \Omega$  și  $\Sigma I_c \geq 80 \text{ A}$ .

În aceste condiții, pentru a se putea sesiza o simplă punere la pământ este necesar ca releul ce controlează tensiunea homopolară pe barele de 20 kV ale stației de transformare să fie reglat la cel mult 10 V.

În tabelul nr.3.1. se prezintă variația tensiunii homopolare a barelor de 20 kV din stația de transformare și a curenților capacitivi totali, funcție de rezistența de trecere la locul de defect, considerându-se că rezistența de trecere variază în intervalul 0.....10000  $\Omega$ . Din acest tabel și

Tabel nr.3.1. Variația tensiunilor homopolare și a curenților capacitivi totali în funcție de rezistența de trecere la locul de simpla punere la pământ în rețelele electrice de 20kV cu neutru izolat.

Regim de funcționare	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\Sigma I_c(R_t=0)=12A$	$3U_0[V]$	100	100	99,9	99,5	98	88,8	69,4	43,4	23,4	18,9	15,8	13,6	11,9	10,6	9,6
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	12	12	12	11,9	11,7	10,6	8,32	5,2	2,81	2,27	1,9	1,63	1,43	1,28	1,15
	K	1	1	1	1	1,03	1,13	1,44	2,3	4,27	5,3	6,3	7,36	8,39	9,38	10,4
$\Sigma I_c(R_t=0)=23A$	$3U_0[V]$	100	99,9	99,5	98	92,9	70,8	44,8	24,3	12,4	10	8,3	7,1	6,3	5,56	5
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	24	23,9	22,8	22,5	21,3	16,2	10,2	5,5	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4	1,26	1,15
	K	1	1	1,05	1,07	1,13	1,48	2,35	4,36	8,54	10,4	12,6	15	17,1	19	20,9
NI $\Sigma I_c(R_t=0)=40A$	$3U_0[V]$	100	100	98,6	94,5	82,2	50	27,7	14,3	7,2	5,8	4,81	4,1	3,6	3,21	2,9
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	39,6	39,4	37,8	33	20	11,1	5,7	2,9	2,31	1,9	1,65	1,44	1,29	1,15
	K	1	1	1,02	1,06	1,21	2	3,6	7,02	13,8	17,3	21	24,2	27,8	31	34,8
$\Sigma I_c(R_t=0)=60A$	$3U_0[V]$	100	99,9	96,8	88,8	69,4	36	18,9	9,6	4,81	3,85	3,21	2,75	2,41	2,14	1,9
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	60	59,8	58	53,2	41,6	21,5	11,3	5,75	2,88	2,31	1,92	1,65	1,44	1,28	1,15
	K	1	1	1,03	1,13	1,44	2,79	5,3	10,4	20,8	26	31,3	36,4	41,7	46,9	52,2
$\Sigma I_c(R_t=0)=80A$	$3U_0[V]$	100	99,8	94,6	82,2	91,4	27,7	14,3	7,2	3,61	2,9	2,41	2,1	1,81	1,6	1,45
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	80	79,8	75,6	65,8	46,8	22,2	11,4	5,8	2,9	2,31	1,92	1,65	1,44	1,28	1,16
	K	1	1	1,06	1,21	1,71	3,6	7,02	13,8	27,6	34,6	41,7	48,5	55,6	62,5	69

$K = \Sigma I_c(R_t=0) / \Sigma I_c(R_t)$  este raportul de reducere a curenților capacitivi și al tensiunii homopolare în regim de funcționare cu neutru izolat în funcție de rezistența de trecere  $R_t$  la locul de defect

din figura 3.3 rezultă că atunci când rezistența de trecere la locul de defect este peste 5000  $\Omega$  dependența  $K_{U_h}(R_t)$  este practic liniară.

Din tabelul 3.1 se constată, de asemenea, că la o simplă punere la pământ printr-o rezistență de trecere  $\leq 100 \Omega$  izolația fazelor fără defect este supusă tensiunii de linie, deci menținerea timp îndelungat a defectului duce la îmbătrânirea prematură a acesteia sau chiar la distrugerea ei, producându-se defecte multiple care pot avea consecințe grave asupra instalațiilor

Dacă rezistența de trecere la locul de defect depășește 5000  $\Omega$  tensiunea fazelor fără defect crește cu maxim 20%; deci, în aceste condiții, solicitarea izolației este mult mai puțin pronunțată putându-se funcționa un timp mai îndelungat cu un astfel de defect. Experiența de exploatare a rețelelor electrice arată că un defect prin rezistență de trecere mare în momentul producerii în timp se transformă în unul cu rezistență de trecere mică, ceea ce are ca efect creșterea tensiunii fazelor fără defect. Din acest motiv este de dorit ca și defectele slabe (prin rezistență de trecere mare) să fie izolate într-un timp cât mai scurt.

### 3.3. Rețea cu neutrul tratat prin rezistor

În cazul rețelei cu neutrul tratat prin rezistor (conectat la nulul bobinei de punct neutru BPN în figura 1.3), impedanța homopolară a rețelei, în absența defectului, devine

$$\underline{Z}_h = \frac{(\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hBPN} + \underline{Z}_{hc} + 3R_n}, \quad (3.36)$$

iar coeficientul  $K_{U_h}(R_t)$  se exprimă prin relația

$$K_{U_h}(R_t) = \frac{1}{1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \frac{(\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hBPN} + \underline{Z}_{hc} + 3R_n}}}. \quad (3.37)$$

În relațiile (3.36) și (3.37) notațiile au următoarea semnificație:

$\underline{Z}_{hBPN}$  – impedanța homopolară a bobinei de punct neutru;

$\underline{Z}_{hc}$  – impedanța homopolară capacitivă a rețelei legată galvanic;

$R_n$  – rezistența rezistorului utilizat pentru tratarea neutrului.

Pentru calculul coeficientului  $K_{Uh}$  (relația 3.37) s-au folosit aceiași parametri ca în subcapitolul 3.2, cu excepția faptului că s-a considerat în locul curentului capacitiv total de 12A un curent de 100 A, situație în care  $\underline{Z}_{hc} = (6,1 - j 345) \Omega$ . De asemenea, pentru rezistența  $R_n$  s-a considerat valoarea 38,5  $\Omega$ , astfel încât la o punere netă la pământ ( $R_t = 0$ ) curentul de defect este limitat la valoarea de 300 A. Impedanța homopolară a bobinei de punct neutru este [121, 122]  $\underline{Z}_{hBPN} = (7,6 + j 25,9) \Omega$ .

În figura 3.4 s-a trasat dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect, în condițiile precizate. Din această dependență se constată influența nesemnificativă pe care o are în acest caz curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV asupra coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$ . Cunoscându-se valoarea acestui coeficient din relațiile (3.30.).....(3.34) se determină toate mărimile ce caracterizează o simplă punere la pământ.

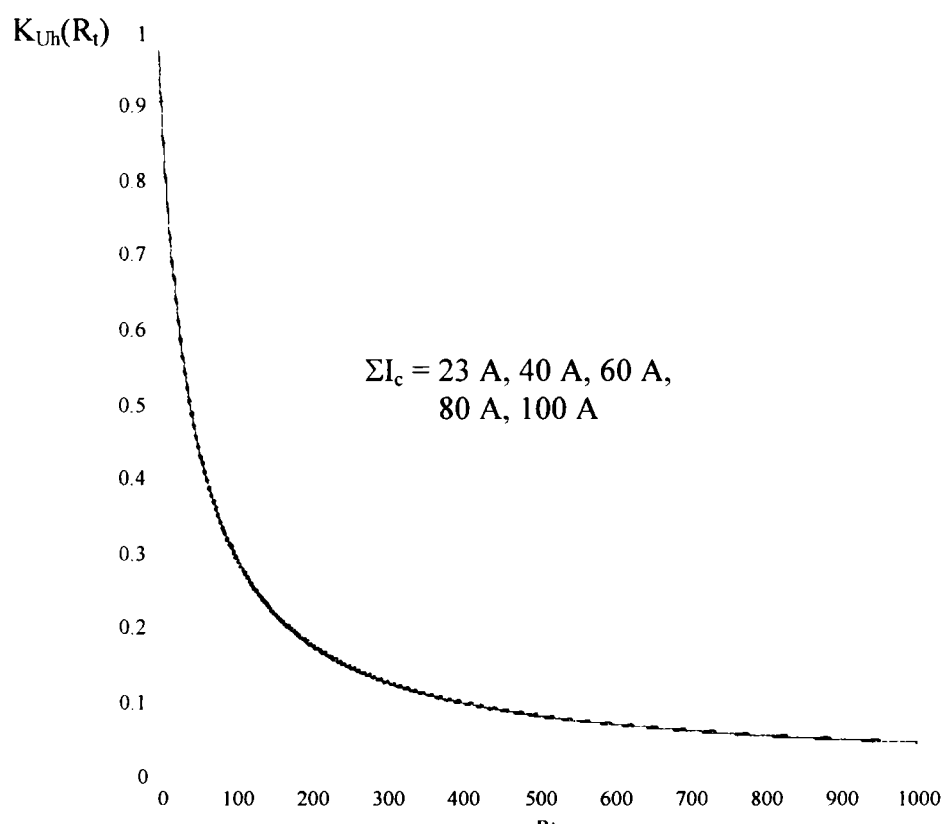


Fig. 3.4. Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect, când neutrul rețelei este tratat prin rezistor

Deoarece coeficientul  $K_{Uh}$  scade sub valoarea 0,1 dacă  $R_t \geq 400 \Omega$ ,

s-a considerat intervalul de variație al rezistenței de trecere la locul de defect ( $R_t$ ) 0.....1000  $\Omega$ .

Tensiunea fazelor fără defect crește cu maxim 20% dacă rezistența de trecere la locul de defect este  $\geq 400 \Omega$ . Deci solicitarea izolației este mult mai puțin pronunțată decât în cazul în care neutrul rețelei este izolat. Pe de altă parte, datorită valorii ridicate a curentului de defect, acesta poate fi sesizat selectiv astfel că într-un interval de timp de până la 1s [141] linia cu defect se

deconectează, ceea ce nu este posibil în cazul rețelelor cu neutrul izolat. Din acest punct de vedere rețeaua cu neutrul tratat prin rezistor este net superioară celei cu neutrul izolat.

Dezavantajul principal al rețelei cu neutrul tratat prin rezistor constă în faptul că nu pot fi separate defectele trecătoare de cele permanente și ca urmare intervin foarte multe deconectări ale consumatorilor. Tot din figura 3.4 se constată că la  $R_f = 100 \Omega$  tensiunea homopolară în secundarul filtrului homopolar este 30 V, deci creșterea tensiunii fazelor sănătoase este sub 30%; ori, la rețeaua cu neutrul izolat, în aceleași condiții tensiunea fazelor sănătoase devine practic egală cu tensiunea de linie.

În tabelul nr.3.2 se prezintă valorile tensiunii din secundarul filtrului homopolar ( $3U_0$ ) a curentului capacitiv total ( $\sum I_c$ ) și a curentului de defect ( $I_p$ ) funcție de rezistența de trecere la locul de defect, considerând curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV legată galvanic 23 A, 40 A, 60 A, 100 A. Și din acest tabel se constată că tensiunea homopolară și curentul de defect practic nu depind de valoarea curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV legată galvanic.

### 3.4. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare

În situația în care neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare impedanța homopolară a rețelei în absența defectului se determină cu relația:

$$\underline{Z}_h = \frac{(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC}) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC} + \underline{Z}_{hc}}, \quad (3.38)$$

iar coeficientul  $K_{U_h}(R_f)$  devine:

$$K_{U_h}(R_f) = \frac{1}{1 + \frac{3R_f}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \frac{(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC}) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC} + \underline{Z}_{hc}}}}. \quad (3.39)$$

Tabel nr.3.2. Variația tensiunii homopolare, curentului capacitiv total și a curentului prin rezistor în funcție de rezistența de trecere la locul de punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat prin rezistor de 300A

Regim de funcționare	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\Sigma I_c=23A$	$3U_0[V]$	100	79,6	43,7	27,9	16,2	7,2	3,7	1,9	0,96	0,77	0,64	0,55	0,48	0,43	0,38
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	23	18,3	10	6,4	3,7	1,66	0,85	0,44	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,1	0,09
	$I_p[A]$	300	238	131	83,5	48,5	21,5	11,1	5,7	2,9	2,3	1,9	1,65	1,44	1,28	1,15
	K	1	1,26	2,3	3,6	6,2	13,8	27	52,3	105	127,8	153	177	209	230	256
$\Sigma I_c=40A$	$3U_0[V]$	100	79,6	43,8	28	16,3	7,21	3,74	1,91	0,96	0,77	0,64	0,55	0,48	0,43	0,39
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	31,8	17,5	11,2	6,5	2,9	1,5	0,76	0,38	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,16
	$I_p[A]$	300	238,8	131,4	84	48,9	21,6	11,2	5,73	2,9	2,31	1,92	1,65	1,44	1,29	1,17
	K	1	1,26	2,3	3,57	6,13	13,9	26,7	52,4	104,2	130	156,3	181,8	208,3	232,6	256,4
$\Sigma I_c=60A$	$3U_0[V]$	100	79,6	43,8	28,1	16,3	7,2	3,8	1,9	0,97	0,77	0,65	0,55	0,48	0,43	0,39
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	60	47,8	26,3	16,9	9,78	4,32	2,28	1,14	0,58	0,46	0,39	0,33	0,29	0,26	0,33
	$I_p[A]$	300	238,8	131,4	84,3	48,9	21,6	11,4	5,7	2,91	2,31	1,95	1,65	1,44	1,29	1,17
	K	1	1,26	2,28	3,56	6,13	13,9	26,3	52,6	103,1	129,9	153,8	181,8	208,3	232,6	256
$\Sigma I_c=100A$	$3U_0[V]$	100	79,6	43,8	28	16,3	7,2	3,74	1,9	0,96	0,77	0,64	0,55	0,48	0,43	0,4
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	100	79,6	43,8	28	16,3	7,2	3,74	1,9	0,96	0,77	0,64	0,55	0,48	0,43	0,4
	$I_p[A]$	300	238,8	131,4	84	48,9	21,6	11,2	5,7	2,9	2,31	1,92	1,65	1,44	1,29	1,2
	K	1	1,26	2,28	3,57	6,13	13,9	26,7	52,6	104	130	156	182	208	232	250

$K = \Sigma I_c (R_t=0) / \Sigma I_c (R_t)$  este raportul de reducere al curentului capacitiv, al tensiunii homopolare și al curentului prin rezistorul de tratare al nulului în regim de funcționare cu  $R_n$ , în funcție de rezistența de trecere la locul de defect.



Notațiile din relația (3.39) au următoarea semnificație:

$\underline{Z}_d$  - impedanța de secvență directă văzută de la locul de defect, în absența defectului;

$\underline{Z}_i$  - impedanța de secvență inversă văzută de la locul de defect în absența defectului;

$\underline{Z}_{hTSP}$  - impedanța de secvență homopolară a transformatorului de servicii proprii;

$\underline{Z}_{hBC}$  - impedanța de secvență homopolară a bobinei de compensare;

$\underline{Z}_{hc}$  - impedanța de secvență homopolară capacitivă a rețelei de 20 kV legată galvanic.

Valorile impedanțelor din relația (3.39) sunt [104, 105, 106, 109, 113, 121, 122]:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = (0,2 + j 2,7) \Omega ; \underline{Z}_{hTSP} = (11,1 + j28,6) \Omega.$$

Impedanța  $\underline{Z}_{hc}$  depinde de curentul total capacitiv al rețelei de 20 kV având valorile:

$$\underline{Z}_{hc} = (26 - j 1506) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 23 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (15,1 - j 866) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 40 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (10,2 - j 577) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 60 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (6,1 - j 345) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 100 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (5,04 - j 288,7) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 120 \text{ A};$$

$$\underline{Z}_{hc} = (4,03 - j 231) \Omega , \text{ curent capacitiv total } 150 \text{ A}.$$

Impedanța homopolară a bobinei de compensare depinde de regimul în care funcționează rețeaua, deoarece în diversele regimuri de funcționare se modifică valoarea curentului prin bobina de compensare. În studiu s-au luat în considerare următoarele regimuri de funcționare ale rețelei: rezonanță; supracompensat 10%; subcompensat 10%; supracompensat 20%; supracompensat 50%.

Dacă valoarea curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV este 23 A, impedanța  $\underline{Z}_{hBC}$  are valorile:

$$\underline{Z}_{hBC} = (15,2 + j 1477,4) \Omega , \text{ rezonanță};$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (15,2 + j 1327,4) \Omega , \text{ supracompensate } 10\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (15,2 + j 1177,4) \Omega , \text{ supracompensate } 20\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (15,2 + j 724,4) \Omega , \text{ supracompensate } 50\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (15,2 + j 1627,4) \Omega , \text{ subcompensate } 10\%.$$

Dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_f)$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect și de regimul în care funcționează rețeaua este prezentată în figura 3.5, iar în tabelul nr.3.3 sunt prezentate valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar și ale curentului capacitiv total funcție de aceiași parametri.

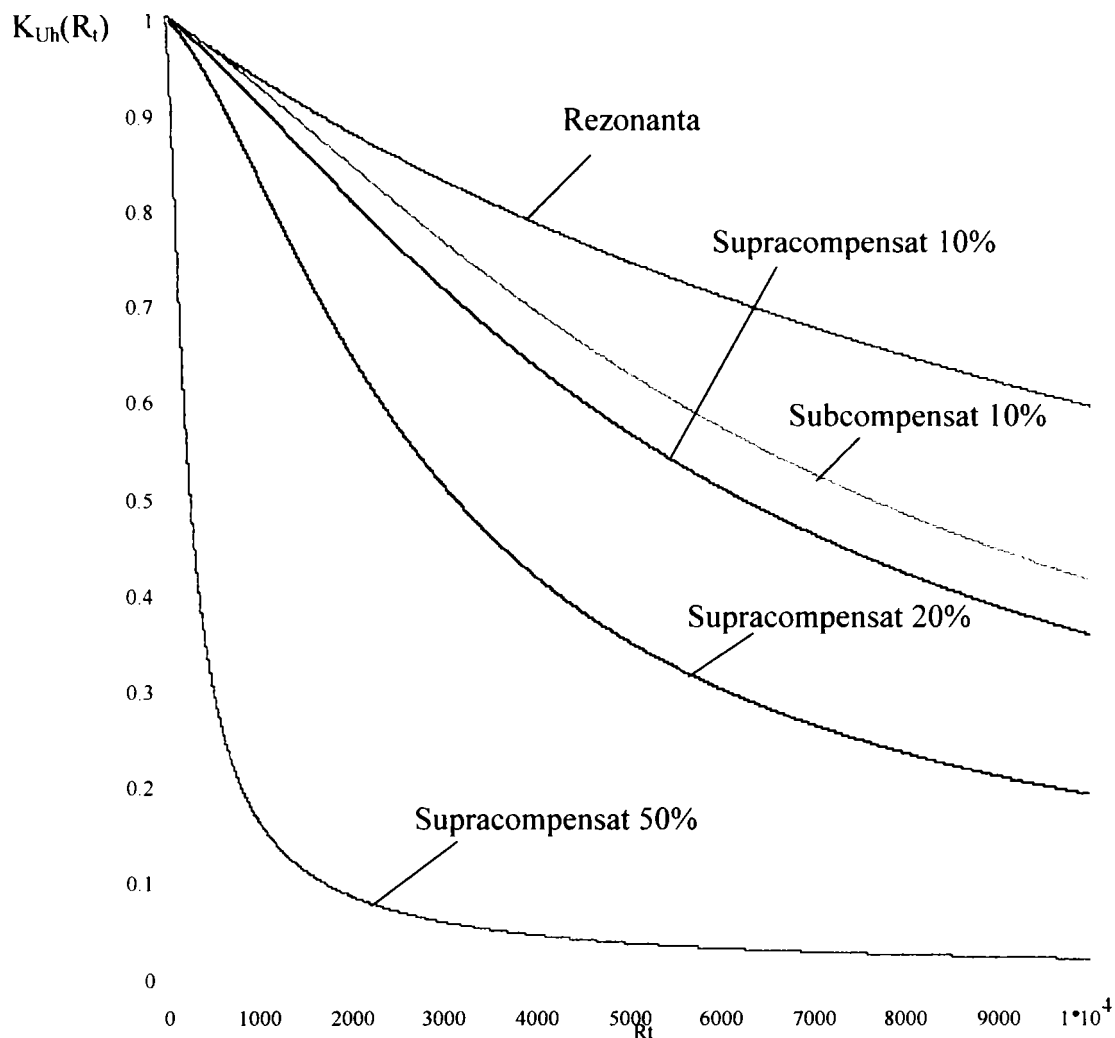


Fig. 3.5 Dependența coeficientului  $K_{uh}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, cand curentul capacitiv al rețelei de 20kV este 23A, neutrul tratat prin bobina de compensare

Din figura 3.5 rezultă importanța deosebită pe care o are regimul de funcționare al rețelei de 20 kV asupra dependenței coeficientului  $K_{uh}(R_t)$  în funcție de rezistența de trecere. Se constată, de asemenea, că tensiunea homopolară în regim de rezonanță are valori importante chiar la rezistențe de trecere foarte mari ( $R_t > 5000 \Omega$ ), ceea ce are ca efect creșterea tensiunii fazelor fără defect, deci solicitări importante ale izolației. Menținerea un timp îndelungat a unei rețele cu o simplă punere la pământ în funcțiune, deși nu afectează alimentarea consumatorilor, are toate șansele de a transforma defectul simplu într-un defect multiplu. Din punct de vedere al solicitării izolației pe durata unei simple puneri la pământ, rețeaua cu neutrul tratat prin bobină de compensare este mai puțin performantă decât cea cu neutrul izolat și net inferioară celei cu neutrul tratat prin rezistor.

Tabel nr.3.3. Variația tensiunilor homopolare și a curentului capacitiv total de  $I_c = 23A$  în funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat prin BC.

Regim de funcționare		$R_f$ [Ω]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Rezonanță	$3U_0$ [V]		100	100	99,8	99,5	99,1	97,6	95,3	91	83,5	80,2	77,2	74,3	71,7	69,2	66,9
	$\Sigma I_c(R_f)$ [A]		23	23	22,9	22,9	22,8	22,4	21,9	20,9	19,2	18,4	17,8	17,1	16,5	15,9	15,4
	K		1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,1	1,1	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5
Supracomp.10%	$3U_0$ [V]		100	99,99	99,7	99,4	98,8	96,5	92,3	83	65,6	58,6	52,6	47,6	43,4	39,8	36,7
	$\Sigma I_c(R_f)$ [A]		23	23	22,9	22,7	22,2	21,2	19,1	15,1	13,5	12,1	10,9	10,9	10	9,2	8,4
	K		1	1	1,01	1,01	1,04	1,08	1,2	1,52	1,71	1,9	2,1	2,3	2,51	2,72	
Subcomp.10%	$3U_0$ [V]		100	100	99,8	99,6	99,2	97,7	94,7	87,7	72,9	66,3	60,4	55,3	50,8	46,9	43,5
	$\Sigma I_c(R_f)$ [A]		23	23	23	22,8	22,5	21,8	20,2	16,8	15,2	13,9	12,7	11,7	11,7	10,8	10
	K		1	1	1	1,01	1,02	1,06	1,14	1,37	1,51	1,65	1,81	1,97	2,13	2,3	
Supracomp.20%	$3U_0$ [V]		100	99,98	99,6	99,2	98,1	93,7	84,3	65,7	42	35,1	30,1	26,3	23,3	20,9	18,9
	$\Sigma I_c(R_f)$ [A]		23	23	22,8	22,5	21,6	19,4	15,1	9,7	8,1	6,9	6,1	5,4	4,8	4,3	
	K		1	1	1,01	1,02	1,07	1,19	1,52	2,38	2,85	3,32	3,8	4,29	4,78	5,29	
Supracomp.50%	$3U_0$ [V]		100	99,8	98,6	96,3	89,9	67,6	43,2	23,8	12,3	9,9	8,3	7,1	6,2	5,54	5,0
	$\Sigma I_c(R_f)$ [A]		23	23	22,7	22,1	20,7	15,5	9,9	5,5	2,83	2,27	1,91	1,63	1,43	1,27	1,15
	K		1	1	1,01	1,04	1,11	1,48	2,31	4,2	8,13	10,1	12	14,1	16,1	18	20

BC cu  $\Sigma I_c \max = 23A$

$K = \Sigma I_c (R_f=0) / \Sigma I_c (R_f)$  este raportul de reducere al curentului capacitiv și a tensiunii homopolare, în funcție de rezistența de trecere la locul de defect.

Când curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV este 40A, impedența  $\underline{Z}_{hBC}$ , pentru regimurile de funcționare considerate, are valorile:

$$\underline{Z}_{hBC} = (5,1 + j 837,4) \Omega, \text{ rezonanță};$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (5,1 + j 750,8) \Omega, \text{ supracompensare } 10\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (5,1 + j 664,2) \Omega, \text{ supracompensare } 20\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (5,1 + j 404,4) \Omega, \text{ supracompensare } 50\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (5,1 + j 924) \Omega, \text{ subcompensare } 10\%.$$

Dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în funcție de regimul în care funcționează rețeaua și de rezistența de trecere la locul de defect este prezentată în figura 3.6, iar valorile tensiunii homopolare și ale curentului capacitiv total funcție de aceleași variabile sunt prezentate în tabelul nr.3.4.

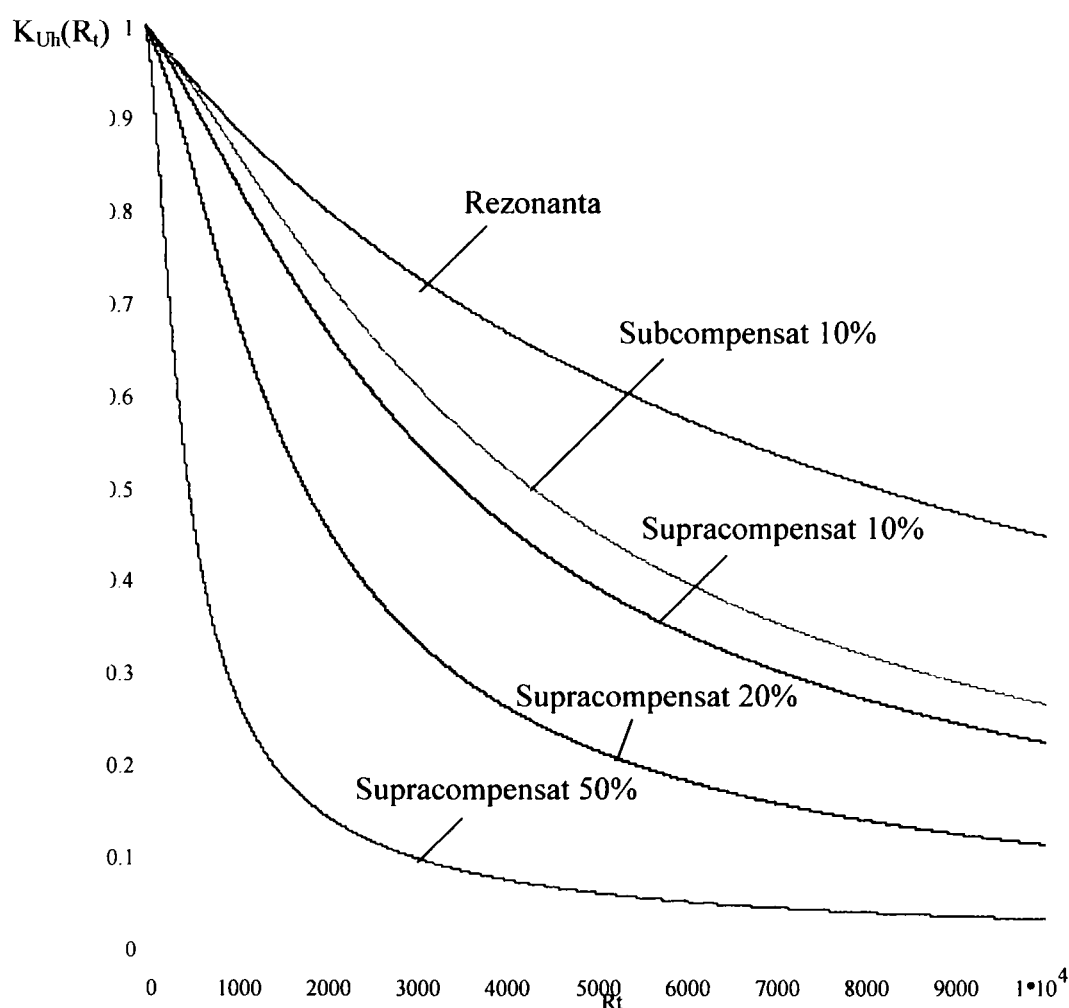


Fig. 3.6 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, când curentul capacitiv al rețelei de 20kV este 40A, neutrul tratat prin bobină de compensare

Tabel nr.3.4. Variația tensiunilor homopolare și a curentului capacitiv total de  $I_c = 40A$  în funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutru tratat prin BC.

Regim de funcționare		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Rezonanță	$3U_0[V]$	100	100	99,9	99,5	99	98	95,1	90,6	82,8	70,6	65,8	61,6	57,9	54,6	51,7	49
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	40	39,8	39,6	39,6	39,2	38	36,2	33,1	28,2	26,3	24,6	23,2	21,8	20,7	19,6
	K	1	1	1	1,01	1,01	1,02	1,05	1,1	1,21	1,42	1,52	1,62	1,73	1,83	1,93	2,04
Supracomp.10%	$3U_0[V]$	100	100	99,9	99,3	98,7	97,2	92,5	84	68,1	46,6	39,8	34,6	30,6	27,3	24,7	22,5
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	40	39,7	39,5	39,5	38,9	37	33,6	27,2	18,6	15,9	13,8	12,2	10,9	9,9	9
	K	1	1	1,01	1,01	1,03	1,08	1,19	1,47	2,15	2,15	2,51	2,89	3,27	3,66	4,05	4,44
Subcomp.10%	$3U_0[V]$	100	100	99,9	99,6	99,1	98,1	94,8	88,4	75	54,1	46,8	41,1	36,5	32,8	29,7	27,2
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	40	39,8	39,6	39,6	39,2	37,9	35,4	30	21,6	18,7	16,4	14,6	13,1	11,9	10,9
	K	1	1	1	1,01	1,01	1,02	1,05	1,13	1,33	1,85	2,14	2,43	2,74	3,05	3,37	3,68
Supracomp.20%	$3U_0[V]$	100	100	99,8	99,1	98,1	95,5	85,9	69,1	46,1	26,2	21,4	18,1	15,6	13,8	12,3	11,1
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	40	39,6	39,6	39,6	38,2	34,4	27,6	18,4	10,5	8,6	7,2	6,2	5,5	4,9	4,4
	K	1	1	1,01	1,02	1,02	1,05	1,16	1,45	2,17	3,82	4,67	5,52	6,41	7,25	8,13	9,01
Supracomp.50%	$3U_0[V]$	100	100	99,5	96,6	91,2	77,9	47,6	26,9	14,1	7,1	5,7	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$	40	40	39,8	38,6	36,5	31,2	19	10,8	5,6	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,2
	K	1	1	1,04	1,1	1,1	1,28	2,1	3,72	7,1	14,1	17,5	20,8	24,4	27,8	31,3	34,5

$K = \Sigma I_c (R_t=0) / \Sigma I_c (R_t)$  este raportul de reducere al curentului capacitiv și a tensiunii homopolare funcție de rezistența de trecere la locul de defect

Din figura 3.6 se constată că și în acest caz regimul de funcționare al rețelei de 20 kV influențează puternic dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect. Din tabelul 3.4 rezultă că pentru rezistențe de trecere la locul de defect mai mari de  $1000\ \Omega$  tensiunea homopolară scade ca valoare comparativ cu cazul în care curentul capacitiv total este 23 A, deci în acest caz solicitarea izolației este mai scăzută. Dacă curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV este 60 A, impedanța  $Z_{hBC}$  pentru regimurile de funcționare considerate are valorile:

$$\underline{Z}_{hBC} = (4 + j 548,4)\ \Omega, \text{ rezonanță};$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (4 + j 490,7)\ \Omega, \text{ supracompensare } 10\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (4 + j 433)\ \Omega, \text{ supracompensare } 20\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (4 + j 259,9)\ \Omega, \text{ supracompensare } 50\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (4 + j 616,1)\ \Omega, \text{ subcompensat } 10\%.$$

În figura 3.7 este prezentată dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect și de regimul în care se găsește rețeaua de 20 kV, iar în tabelul nr.3.5. sunt date valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar și curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV, funcție de aceleași variabile.

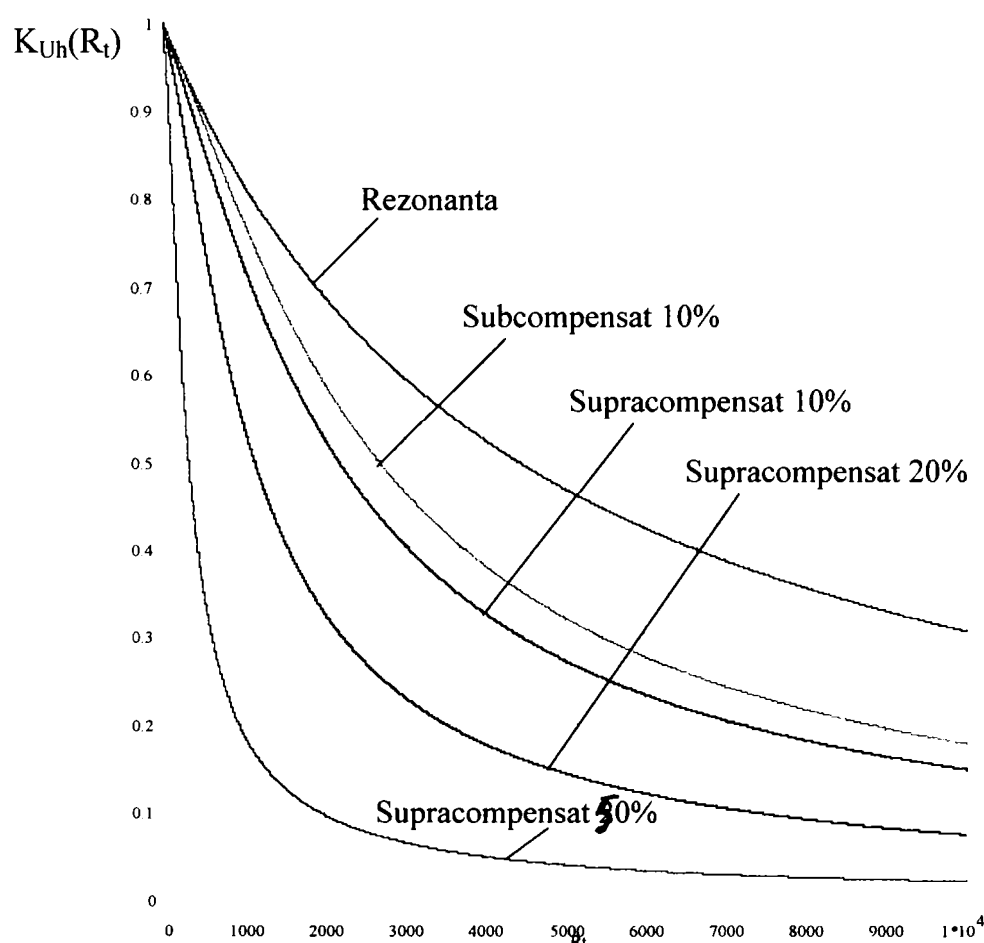


Fig. 3.7 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, când curentul capacitiv al rețelei de 20kV este 60A, neutrul tratat prin bobină de stingere

Tabel nr.3.5. Variația tensiunilor homopolare și a curentului capacitiv total de  $I_c = 60A$  în funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat prin BC.

Regim de funcționare		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Rezonanță	$3U_0[V]$		100	99,7	98,8	97,7	95,5	89,5	81	68,1	51,7	46,1	41,6	37,9	34,8	32,2	29,9
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		60	59,8	59,3	58,6	57,3	53,7	48,6	40,9	31	27,7	25,1	22,7	20,9	19,3	17,9
	K		1	1	1,01	1,02	1,05	1,12	1,23	1,47	1,93	2,17	2,4	2,64	2,87	3,11	3,34
Supracomp.10%	$3U_0[V]$		100	99,8	99	98	95,9	89,1	77,7	59,3	38,2	32,2	27,7	24,3	21,7	19,5	17,8
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		60	60	59,4	58,8	57,5	53,5	43	35,6	22,9	19,3	16,6	14,6	13	11,7	10,7
	K		1	1	1,01	1,02	1,04	1,12	1,29	1,69	2,62	3,1	3,61	4,12	4,61	5,13	5,62
Subcomp.10%	$3U_0[V]$		100	99,7	98,5	97	94	84,9	71,1	51,6	32,1	26,8	23	20,1	17,9	16,1	14,6
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		60	59,8	59,1	58,2	56,4	50,9	42,7	31	19,3	16,1	13,8	12,1	10,7	9,7	8,7
	K		1	1	1,02	1,03	1,06	1,18	1,41	1,94	3,12	3,73	4,35	4,96	5,59	6,21	6,95
Supracomp.20%	$3U_0[V]$		100	99,6	98	95,7	90,6	74,4	53,4	32,4	17,6	14,3	12	10,4	9,1	8,1	7,3
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		60	59,8	58,8	57,4	54,4	44,6	32	19,4	10,6	8,6	7,2	6,2	5,5	4,9	4,4
	K		1	1	1,02	1,04	1,1	1,34	1,87	2,93	5,68	7	8,33	9,62	11	12,3	13,7
Supracomp.50%	$3U_0[V]$		100	98,9	92,8	82,9	63,8	33,9	18,3	9,41	4,76	3,82	3,19	2,73	2,39	2,13	1,92
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		60	59,3	55,7	49,7	38,3	20,3	11	5,6	2,8	2,3	1,9	1,64	1,43	1,28	1,15
	K		1	1,01	1,08	1,21	1,57	2,95	5,46	10,6	21	26,2	31,3	36,6	41,8	46,9	52,1

$K = \Sigma I_c (R_t=0) / \Sigma I_c (R_t)$  este raportul de reducere al curentului capacitiv și a tensiunii homopolare funcție de rezistența de trecere la locul de defect.

Din figura 3.7 rezultă rolul important pe care îl are regimul de funcționare al rețelei de 20 kV asupra coeficientului  $K_{Uh}$ , dar este mai scăzut decât în cazul când curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV este 23 A. Din tabelul nr.3.5 se constată o micșorare a tensiunii homopolare comparativ cu situațiile precedente, dacă rezistența de trecere la locul de defect depășește valoarea de  $500 \Omega$ .

În cazul în care curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV este 100A, impedanța  $Z_{hBC}$ , pentru regimurile de funcționare considerate, are valorile:

$$\underline{Z}_{hBC} = (3,2 + j 317,4) \Omega, \text{ rezonanță};$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (3,2 + j 282,8) \Omega, \text{ supracompensare } 10\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (3,2 + j 248,2) \Omega, \text{ supracompensare } 20\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (3,2 + j 144,4) \Omega, \text{ supracompensare } 50\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (3,2 + j 352) \Omega, \text{ subcompensare } 10\%.$$

Dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect și de regimul în care funcționează rețeaua este prezentată în figura 3.8.

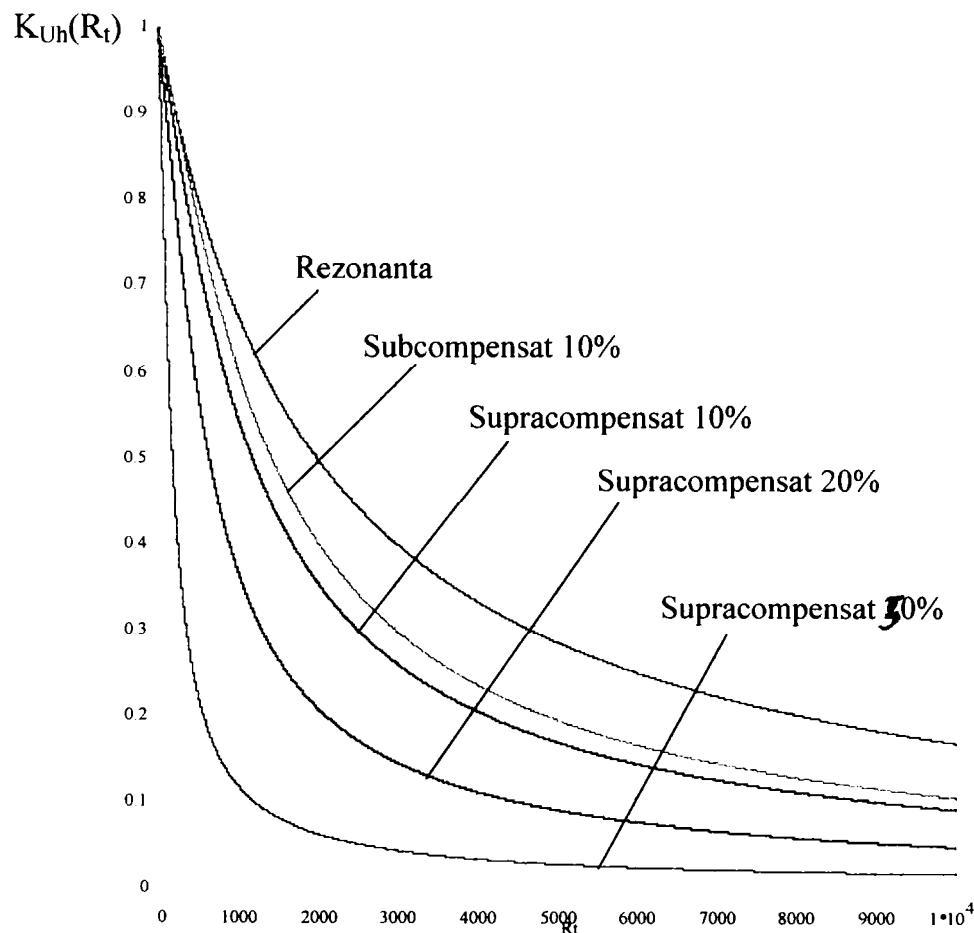


Fig. 3.8 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, când curentul capacitiv al rețelei de 20kV este 100A, neutrul tratat prin bobină de stingere



Din această figură se constată că regimul în care funcționează rețeaua influențează mai puțin decât în cazurile precedente variația coeficientului  $K_{Uh}$ . De asemenea se micșorează, în funcție de rezistența de trecere la locul de defect ( $R_t$ ), valorile coeficientului  $K_{Uh}$ . Aceasta are ca efect atât micșorarea valorilor tensiunii homopolare, deci și a tensiunii fazelor fără defect, cât și a valorilor curentului de defect respectiv a curenților capacitivi ce se închid prin liniile fără defect, comparativ cu variantele considerate anterior.

În tabelul 3.6. sunt prezentate valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar și valoarea curentului capacitiv total în funcție de aceleași variabile. În ceea ce privește solicitarea izolației fazelor fără defect, se constată că aceasta este cea mai scăzută dacă rețeaua funcționează în regim de supracompensare 50% și rezistența de trecere la locul de defect depășește  $500 \Omega$ .

Dacă curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV este 120 A, impedanța  $Z_{hBC}$  în funcție de regimurile considerate pentru funcționarea rețelei, are valorile:

$$\underline{Z}_{hBC} = (2,8 + j 260) \Omega, \text{ rezonanță};$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (2,8 + j 231,2) \Omega, \text{ supracompensare } 10\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (2,8 + j 202,4) \Omega, \text{ supracompensare } 20\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (2,8 + j 115,7) \Omega, \text{ supracompensare } 50\%;$$

$$\underline{Z}_{hBC} = (2,8 + j 288,8) \Omega, \text{ subcompensare } 10\%;$$

În figura 3.9 se prezintă dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în funcție de regimul în care funcționează rețeaua de 20 kV și de rezistența de trecere la locul de defect ( $R_t$ ).

Din această figură rezultă că valorile coeficientului  $K_{Uh}$  scad funcție de  $R_t$  mult mai rapid decât în cazurile anterioare. Valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar și curentul capacitiv total al rețelei în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, respectiv regimul de funcționare al rețelei, sunt prezentate în tabelul nr.3.7. În acest caz tensiunile fazelor fără defect nu au o creștere mai mare de 30% dacă  $R_t \geq 2000\Omega$  (indiferent de regimul de funcționare al rețelei) pe timpul cât există simpla punere la pământ. Deasemenea se constată din figura 3.9 că dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de regimul în care se găsește rețeaua de 20 kV este mai puțin importantă decât în cazurile anterioare.

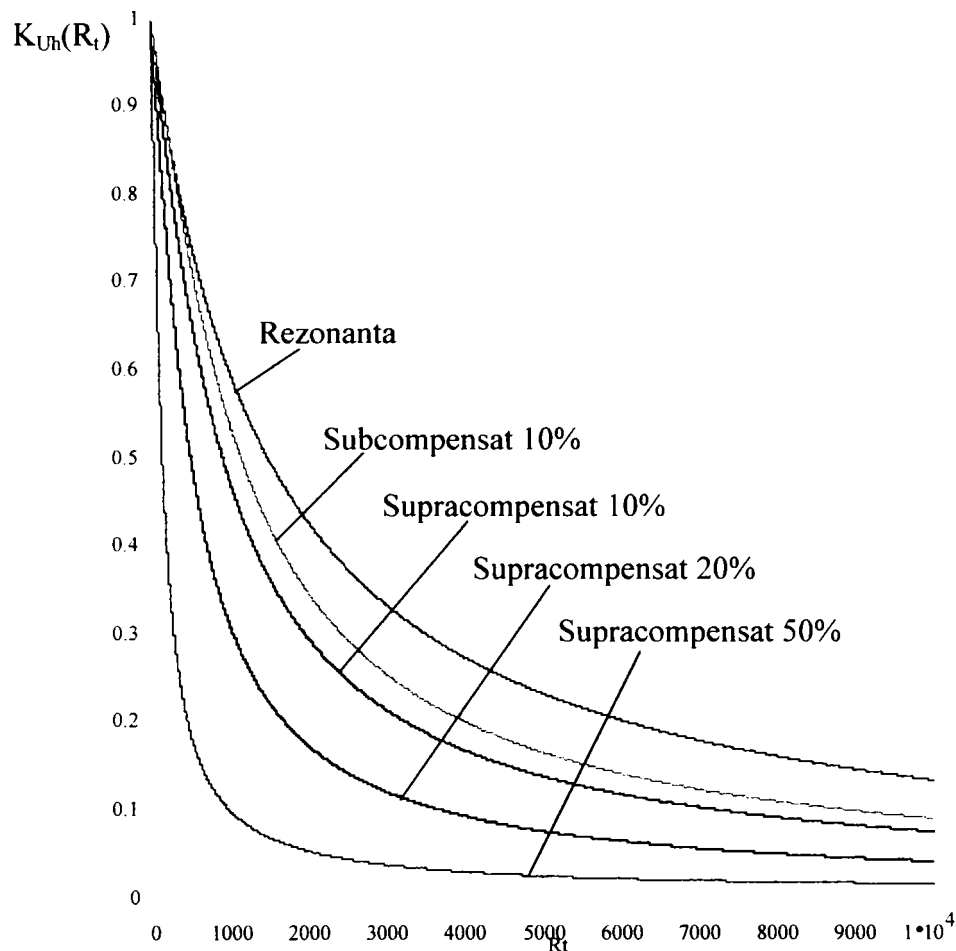


Fig. 3.9 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, când curentul capacitiv al rețelei de 20kV este 120A, neutrul tratat prin bobină de stingere

### 3.5. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu un rezistor

Când neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare conectată la nulul transformatorului de servicii proprii ( TSP + BC ) și un rezistor conectat la nulul bobinei de punct neutru ( BPN +  $R_n$  ), impedanța de secvență homopolară ( $\underline{Z}_h$ ), văzută de la locul de defect, se exprimă prin relația

$$\underline{Z}_h = \frac{(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC})(\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hc}(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBPN} + \underline{Z}_{hBC} + 3R_n) + (\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC})(\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n)}, \quad (3.40)$$

relație în care s-a avut în vedere că bobina de compensare este conectată la nulul TSP-ului, iar rezistorul este conectat la nulul BPN-ului.

Tabel nr.3.6. Variația tensiunilor homopolare și a curentului capacitiv total de  $I_c = 100A$  în funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat prin BC.

Regim de funcționare		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Rezonanță	$3U_0[V]$		100	99,6	99	96	92,2	82,4	70,1	54	36,9	31,9	28	25	22,6	20,6	18,9
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		100	99,6	99	96	92,2	82,4	70,1	54	36,9	32	28	25	22,6	20,6	18,9
	K		1	1	1,01	1,04	1,08	1,21	1,43	1,85	2,71	3,13	3,57	4	4,42	4,85	5,29
Supracomp.10%	$3U_0[V]$		100	99,5	97,4	94,7	89,2	74,3	55,9	36	20,6	16,9	14,3	12,4	11	9,8	8,9
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		100	99,5	97,4	94,7	89,2	74,3	55,9	36	20,6	16,9	14,3	12,4	11	9,8	8,9
	K		1	1	1,02	1,06	1,12	1,35	1,79	2,78	4,85	5,92	7	8,06	9,1	10,2	11,2
Subcomp.10%	$3U_0[V]$		100	99,7	98,2	96,3	92,4	80,5	63,6	42,7	24,9	20,5	17,4	15,1	13,4	12	10,8
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		100	99,7	98,2	96,3	92,4	80,5	63,6	42,7	24,9	20,5	17,4	15,1	13,4	12	10,8
	K		1	1	1,02	1,04	1,08	1,24	1,57	2,34	4,02	4,85	5,75	6,62	7,46	8,33	9,26
Supracomp.20%	$3U_0[V]$		100	99,4	96,3	92	82,6	58,7	37	20,6	10,8	8,7	7,3	6,3	5,5	4,9	4,4
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		100	99,4	96,3	92	82,6	58,7	37	20,6	10,8	8,7	7,3	6,3	5,5	4,9	4,4
	K		1	1	1,04	1,09	1,21	1,7	2,7	4,85	9,26	11,5	13,7	15,9	18,2	20,4	22,7
Supracomp.50%	$3U_0[V]$		100	98	85,9	69,2	46,2	21,6	11,2	5,7	2,9	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,15
	$\Sigma I_c(R_t) [A]$		100	98	85,9	69,2	46,2	21,6	11,2	5,7	2,9	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,15
	K		1	1,02	1,16	1,44	2,16	4,63	8,93	17,5	34,5	43,5	52,6	62,5	71,4	76,9	87

$K = \Sigma I_c (R_t=0) / \Sigma I_c (R_t)$  este raportul de reducere al curentului capacitiv și a tensiunii homopolare în regim de funcționare cu BC, în funcție de rezistența de trecere la locul de defect.

Tabel nr.3.7. Variația tensiunilor homopolare a curenților capacitivi totali și a curențului de defect, funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat cu bobină de compensare.

Regim de funcționare		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Rezonanță	$3U_0$ [V]		100	100	99,3	95,4	88,3	72,2	55,4	37,8	23,1	19,3	16,6	14,6	13	11,7	10,7
	$I_p$ [A]		10,4	10,3	10	9,6	8,89	7,27	5,58	3,8	2,32	1,95	1,67	1,47	1,31	1,18	1,07
	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	120	119	114	106	86,7	66,5	45,3	27,7	23,2	20	17,5	15,6	14,1	12,8
Supracomp. 10%	K		1	1	1,01	1,05	1,13	1,39	1,81	2,65	4,33	5,17	6,02	6,86	7,7	8,54	9,38
	$3U_0$ [V]		100	100	98,1	93,1	84	63,8	44,6	27,4	15,3	12,6	10,6	9,22	8,14	7,28	6,59
	$I_p$ [A]		17,9	17,7	17	16,1	14,5	11,1	7,72	4,75	2,66	2,18	1,84	1,6	1,41	1,26	1,14
Supracomp. 20%	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	120	118	112	101	76,6	53,5	32,9	18,4	15,1	12,8	11,1	9,76	8,73	7,9
	K		1	1	1,02	1,07	1,19	1,57	2,24	3,65	6,52	7,96	9,4	10,8	12,3	13,7	15,2
	$3U_0$ [V]		100	98,7	93,1	86,2	73,5	48,2	29,5	16,3	8,54	6,9	5,78	4,98	4,37	3,89	3,51
Supracomp. 50%	$I_p$ [A]		32,4	32	30,2	27,9	23,8	15,6	9,54	5,28	2,77	2,23	1,87	1,61	1,42	1,26	1,14
	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	118	112	103	88,2	57,9	35,4	19,5	10,3	8,28	6,94	5,97	5,24	4,67	4,21
	K		1	1,01	1,07	1,16	1,36	2,07	3,39	6,14	11,7	14,5	17,3	20,1	22,9	25,7	28,5
Subcomp. 10%	$3U_0$ [V]		100	96,4	79,2	60,7	39,1	18,1	9,42	4,8	2,42	1,94	1,62	1,39	1,21	1,08	0,97
	$I_p$ [A]		119	116	95	72,8	46,9	21,7	11,3	5,75	2,9	2,32	1,94	1,66	1,47	1,3	1,17
	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	116	95	72,8	46,9	21,7	11,3	5,76	2,9	2,33	1,94	1,66	1,47	1,3	1,17
Subcomp. 10%	K		1	1,04	1,26	1,65	2,56	5,53	10,6	20,8	41,3	51,6	61,0	72,1	82,3	92,6	103
	$3U_0$ [V]		100	100	100	96,4	89,4	71,6	52,2	33	18,7	15,3	13	11,3	9,94	8,9	8,05
	$I_p$ [A]		14,7	14,6	14,1	13,6	12,7	10,1	7,38	4,66	2,64	2,17	1,84	1,59	1,41	1,26	1,14
Subcomp. 10%	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	120	120	116	107	86	62,6	39,5	22,4	18,4	15,6	13,5	11,9	10,7	9,66
	K		1	1	1	1,04	1,12	1,4	1,92	3,04	5,36	6,53	7,7	8,88	10,1	11,2	12,4

TSP+  
BC  
 $\Sigma I_c =$   
120A

Expresia coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în acest caz devine:

$$K_{Uh}(R_t) = \frac{1}{1 + \frac{3R_t}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \frac{(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC})(\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n) \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hc}(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBPN} + \underline{Z}_{hBC} + 3R_n) + (\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC})(\underline{Z}_{hBPN} + 3R_n)}}}$$

(3.41)

Semnificația impedanțelor din relația (3.41) este identică cu a celor din relațiile (3.37) și (3.39). Valoarea impedanței homopolare a bobinei de punct neutru este [121, 122]:

$$\underline{Z}_{hBPN} = (7,6 + j25,9) \Omega.$$

Valoarea rezistenței rezistorului de tratare a neutrului este  $R_n = 38,5 \Omega$  [47, 137, 138, 139].

Dacă valoarea curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV este 23 A, dependența coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere este prezentată în figura 3.10.

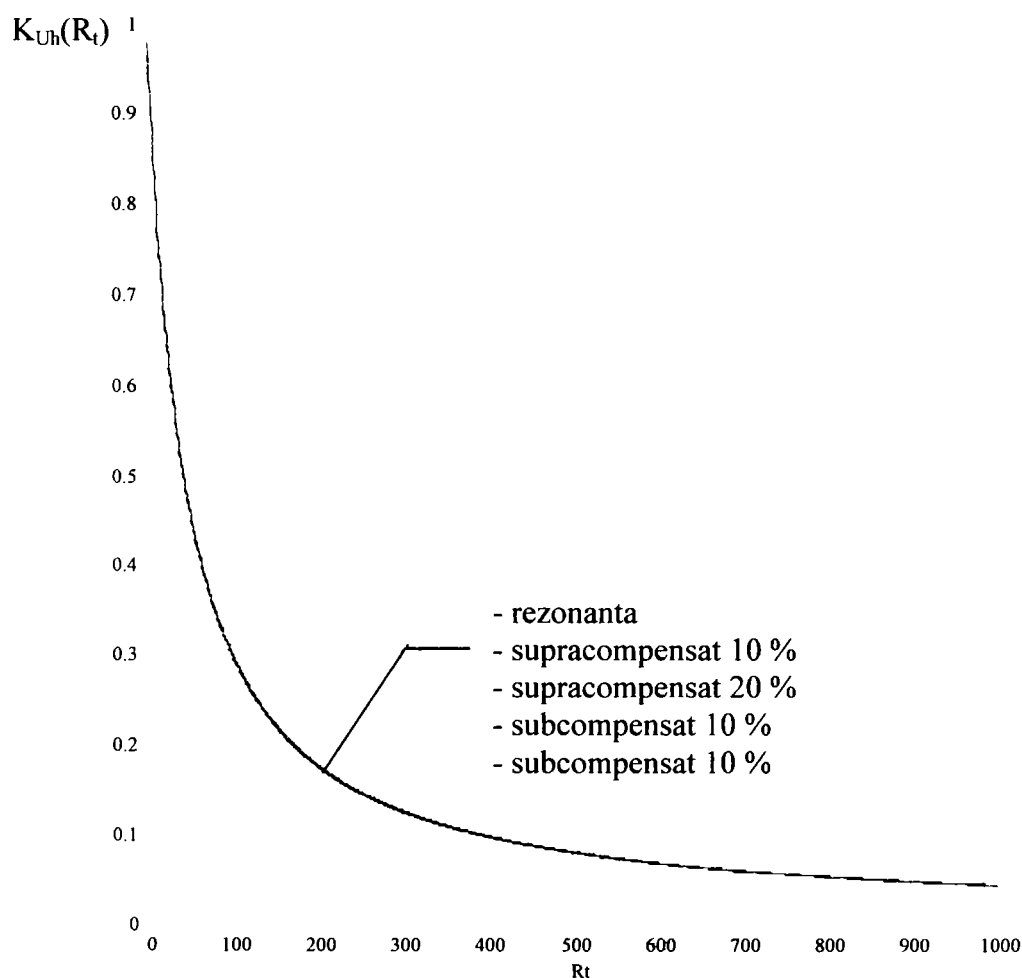


Fig. 3.10. Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect când curentul capacitiv al rețelei de 20 kV este de 23 A, neutrul tratat prin  $(TSP+BC) \parallel (BPN+R_n)$

În acest caz se observă că valoarea coeficientului  $K_{U_{th}}$  nu depinde de regimul în care funcționa rețeaua când neutrul este tratat prin bobină de compensare. De asemenea, se constată o variație a coeficientului  $K_{U_{th}}$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect practic identică cu cea obținută în cazul în care neutrul rețelei este tratat cu rezistor.

În figura 3.11 se prezintă dependența coeficientului  $K_{U_{th}}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect dacă valoarea curentului capacitiv al rețelei de 20 kV este 60 A. Se constată că în acest caz este sesizabilă o diferență între valorile coeficientului  $K_{U_{th}}$  când rețeaua funcționa în regim de supracompensare 50% față de celelalte regimuri considerate. Valorile coeficientului  $K_{U_{th}}$  în acest caz sunt practic identice cu cele obținute pentru cazul când curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV are valoarea 23 A.

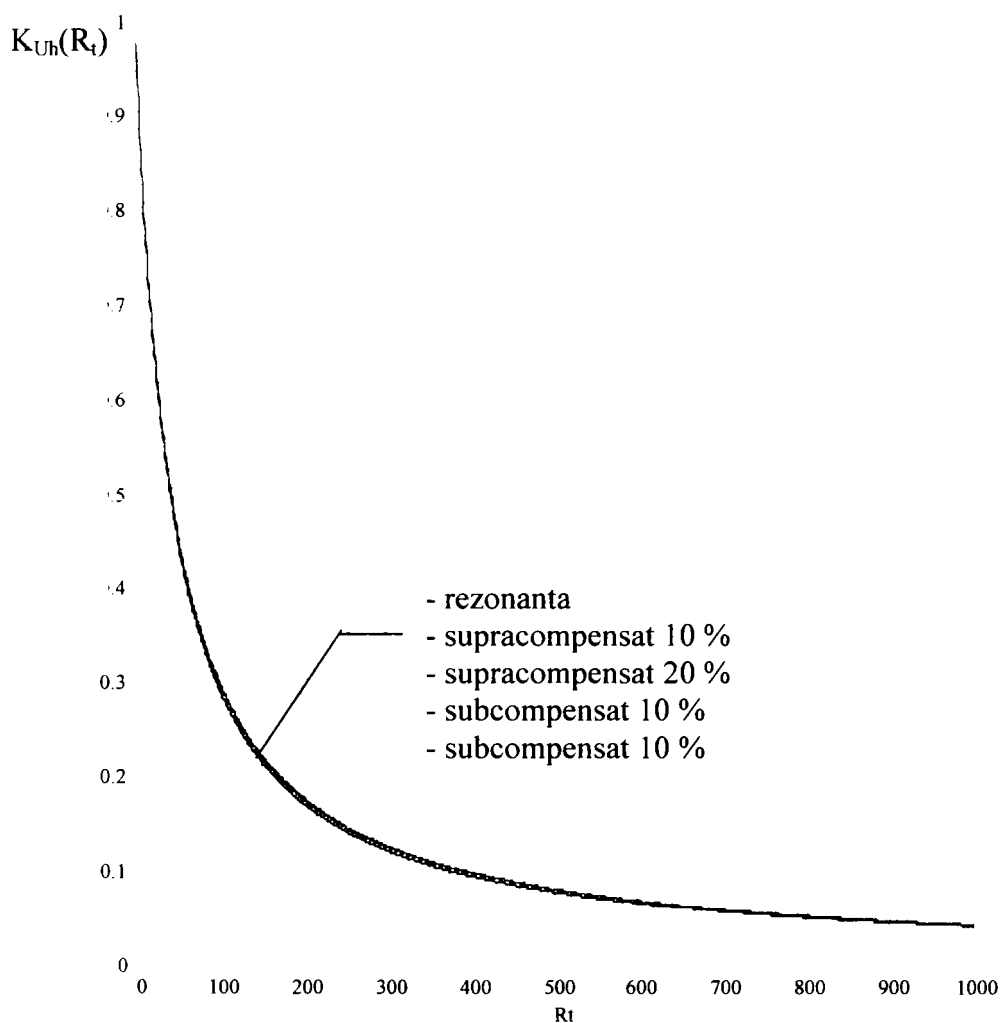


Fig. 3.11 .Dependența coeficientului  $K_{U_{th}}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect când curentul capacitiv al rețelei de 20 kV este de 60 A, neutrul tratat prin (TSP+BC)||((BPN+Rn))

În tabelul nr.3.8 sunt prezentate valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar de tensiune, curentul de defect și curentul capacitiv total funcție de rezistența de trecere la locul de defect și de regimul în care funcționa rețeaua când neutrul era tratat prin bobină de compensare.

Tabel nr.3.8. Variația tensiunilor homopolare, a curenților capacitivi totali și a curenților prin rezistorul de tratare a neutrului în funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat prin bobină de compensare și rezistor comutabil în varianta constructivă ( TSP + BC ) || ( BPN + R<sub>n</sub> ).

Regim de funcționare		R <sub>t</sub> [Ω]	0	10	50	100	200	500	1000	2000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Rezonanță	3U <sub>0</sub> [V]		100	79,5	43,3	27,6	16	7	3,65	1,86	0,94	0,75	0,63	0,54	0,47	0,42	0,38
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>t</sub> )[A]		60	47,7	26	16,6	9,6	4,2	2,19	1,12	0,56	0,45	0,38	0,32	0,28	0,25	0,23
	I <sub>p</sub> [A]		300	238,5	130	82,8	48	21	10,9	5,58	2,82	2,25	1,89	1,62	1,41	1,26	1,14
Supracomp.10%	K		1	1,26	2,31	3,63	6,25	14,3	27,4	54	106,4	133,3	158,7	185,2	212,8	238,1	263,1
	3U <sub>0</sub> [V]		100	79,4	43,2	27,5	15,9	7	3,63	1,85	0,93	0,75	0,62	0,53	0,47	0,42	0,37
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>t</sub> )[A]		60	47,6	25,9	16,5	9,54	4,2	2,18	1,11	0,56	0,45	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22
Supracomp.20%	I <sub>p</sub> [A]		300	238,2	129,6	82,5	47,7	21	10,9	5,55	2,79	2,25	1,86	1,59	1,41	1,26	1,11
	K		1	1,26	2,31	3,64	6,29	14,3	27,5	54	107,5	133,3	161,3	188,7	212,8	238,1	270,3
	3U <sub>0</sub> [V]		100	79,2	43	27,2	15,7	6,92	3,58	1,82	0,92	0,74	0,61	0,53	0,46	0,41	0,37
Supracomp.50%	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>t</sub> )[A]		60	47,5	25,8	16,3	9,42	4,15	2,15	1,09	0,55	0,44	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22
	I <sub>p</sub> [A]		300	237,6	129	81,6	47,1	20,8	10,7	5,46	2,76	2,22	1,83	1,59	1,38	1,23	1,11
	K		1	1,26	2,33	3,68	6,37	14,5	27,9	54,9	108,7	135,1	163,9	188,7	217,4	243,9	270,3
Supracomp.50%	3U <sub>0</sub> [V]		100	78,7	41,8	26,2	14,9	6,5	3,4	1,71	0,86	0,69	0,58	0,49	0,43	0,39	0,35
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>t</sub> )[A]		60	47,2	25,1	15,7	8,94	3,9	2,04	1,03	0,52	0,41	0,35	0,29	0,26	0,23	0,21
	I <sub>p</sub> [A]		300	236,1	125,4	78,6	44,7	19,5	10,2	5,13	2,58	2,07	1,74	1,47	1,29	1,17	1,05
K		1	1,27	2,39	3,82	6,71	15,4	29,4	58,5	116,3	144,9	172,4	204,1	233,5	256,4	285,7	

K=ΣI<sub>c</sub> (R<sub>t</sub>=0)/ ΣI<sub>c</sub> (R<sub>t</sub>) este raportul de reducere al curentului capacitiv, al tensiunii homopolare și a curentului prin rezistorul de tratare al neutrului rețelei de 20 kV funcție de rezistența de trecere la locul de defect.

Când valoarea curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV este 120 A, dependența coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect este prezentată în fig. 3.12.

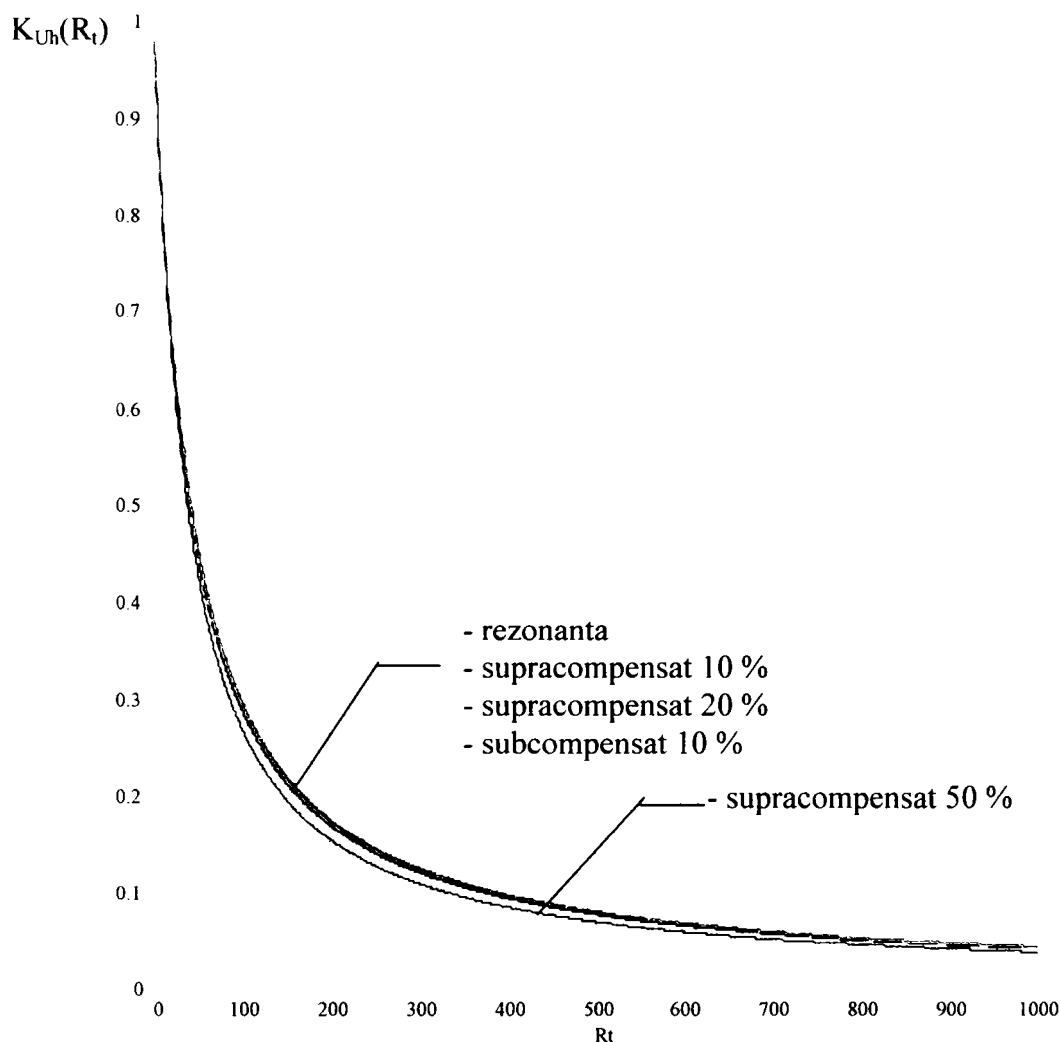


Fig. 3.12 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect când curentul capacitiv al rețelei de 20kV este de 120 A, neutrul tratat prin (TSP+BC)||((BPN+Rn)

Se constată că în acest caz valoarea coeficientului  $K_{Uh}$ , atunci când rețeaua funcționa în regim de supracompensare 50%, diferă mai mult de celelalte regimuri, când valoarea curentului capacitiv total al rețelei este 60 A.

Valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar, valoarea curentului de defect și valoarea curentului capacitiv total funcție de rezistența de trecere la locul de defect și de regimul în care funcționa rețeaua înaintea conectării rezistorului sunt prezentate în tabelul 3.9.

Din acest tabel se constată că atunci când rețeaua funcționa în regim de supracompensare 50% în absența rezistorului, la conectarea acestuia, curentul de defect crește cu aproximativ 10% când neutrul rețelei este tratat prin rezistor.



Tabel nr.3.9. Variația tensiunilor homopolare, a curenților capacitivi totali și a curenților de defect, funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat combinat (TSP + BC) // (BPN + R<sub>n</sub>)

Regim de funcționare		R <sub>i</sub> [Ω]	0	10	20	30	50	75	100	150	200	300	400	500	750	1000	2000
Rezonanță	3U <sub>0</sub> [V]		100	83,1	69,6	59,9	46,8	36,7	30,2	22,3	17,8	12,5	9,65	7,87	5,38	4,09	2,08
	I <sub>p</sub> [A]		289	234	196	168	131	103	84,9	62,7	49,7	35,1	27,1	22,1	15,1	11,5	5,86
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>i</sub> ) [A]		120	100	83,2	71,8	56,2	44,1	36,2	26,8	21,2	15,0	11,6	9,44	6,47	4,9	2,5
	K		1	1,2	1,44	1,67	2,14	2,72	3,31	4,48	5,66	8,01	10,4	12,7	18,6	24,5	48,0
Supracomp. 10%	3U <sub>0</sub> [V]		100	82,9	69,4	59,6	46,5	36,5	30	22,1	17,5	12,4	9,55	7,78	5,32	4,04	2,06
	I <sub>p</sub> [A]		293	236	198	170	132	104	85,3	62,9	49,8	35,2	27,2	22,1	15,1	11,5	5,86
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>i</sub> ) [A]		120	99,2	83,2	71,6	55,8	43,7	36	26,7	21,0	14,8	11,4	9,36	6,38	4,85	2,47
	K		1	1,21	1,44	1,68	2,15	2,74	3,34	4,53	5,71	8,09	10,5	12,9	18,8	24,8	48,6
Supracomp. 20%	3U <sub>0</sub> [V]		100	82,6	69,1	59,3	46,2	36,1	29,6	21,8	17,3	12,2	9,4	7,66	5,23	3,97	2,02
	I <sub>p</sub> [A]		297	240	201	172	134	105	85,9	63,2	50	35,3	27,2	22,2	15,2	11,5	5,86
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>i</sub> ) [A]		120	99,2	82,9	71,2	55,4	43,3	35,6	26,2	20,7	14,6	11,3	9,2	6,28	4,77	2,43
	K		1	1,21	1,45	1,69	2,17	2,77	3,37	4,58	5,79	8,22	10,6	13,1	19,1	25,2	49,4
Supracomp. 50%	3U <sub>0</sub> [V]		100	81,1	67,1	57,1	43,8	33,9	27,6	20,1	15,8	11,1	8,5	6,9	4,7	3,56	1,81
	I <sub>p</sub> [A]		331	264	218	186	142	110	89,6	65,3	51,3	35,9	27,6	22,4	15,3	11,6	5,88
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>i</sub> ) [A]		120	97,4	80,5	68,5	52,6	40,6	33,1	24,1	18,9	13,3	10,2	8,28	5,64	4,27	2,17
	K		1	1,23	1,49	1,75	2,28	2,95	3,63	4,98	6,34	9,05	11,8	14,5	21,3	28,1	55,3
Subcomp. 10%	3U <sub>0</sub> [V]		100	83,2	69,8	60,1	47	36,9	30,4	22,5	18,9	13,3	10,2	8,28	5,64	4,27	2,17
	I <sub>p</sub> [A]		287	232	194	167	131	103	84,6	62,5	49,6	35	27,1	22,1	15,1	11,5	5,86
	ΣI <sub>c</sub> (R <sub>i</sub> ) [A]		120	99,9	83,8	72,1	56,4	44,3	36,5	26,9	21,4	15,1	11,7	9,52	6,51	4,95	2,52
	K		1	1,2	1,43	1,66	2,13	2,71	3,29	4,46	5,62	7,95	10,3	12,6	18,4	24,3	47,5

(TSP+ BC)// (BPN+ R<sub>n</sub>) cu ΣI<sub>c</sub>= 120A

### 3.6. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu o bobină de punct neutru (soluția nouă care se propune)

Impedanța homopolară văzută de la locul de defect, în absența acestuia, când neutrul rețelei este tratat cu bobină de compensare conectată la nulul transformatorului de servicii proprii ( TSP + BC ) și bobina de punct neutru ( BTPC ) se exprimă prin relația :

$$\underline{Z}_h = \frac{(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC}) \cdot \underline{Z}_{hBTPC} \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hc}(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBTPC} + \underline{Z}_{hBC}) + \underline{Z}_{hBTPC}(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC})} \quad , \quad (3.42)$$

relație în care s-a avut în vedere că bobina de compensare este conectată la nulul TSP-ului, iar în paralel cu acest grup este conectată bobina trifazată de punct neutru.

Expresia coeficientului  $K_{Uh}(R_i)$ , în această situație, introducând relația (3.42) în relația (3.25), devine

$$K_{Uh}(R_i) = \frac{1}{1 + \frac{3R_i}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \frac{(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC}) \cdot \underline{Z}_{hBTPC} \cdot \underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_{hc}(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBTPC} + \underline{Z}_{hBC}) + \underline{Z}_{hBTPC}(\underline{Z}_{hTSP} + \underline{Z}_{hBC})}} \quad . \quad (3.43)$$

În relația (3.43) prin  $\underline{Z}_{hBTPC}$  s-a notat impedanța homopolară a bobinei de punct neutru și are valoarea [121, 122]:  $\underline{Z}_{hBTPC} = (8 + j 114,7)\Omega$ , celelalte impedanțe sunt identice cu cele din relația (3.41).

În figura 3.13. se prezintă variația coeficientului  $K_{Uh}(R_i)$  în azul în care curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV este 23A, considerându-se că înaintea conectării bobinei de punct neutru rețeaua funcționa în regimurile: rezonanță; supracompensare 10%; subcompensare 10%; supracompensare 20%; supracompensare 50%. Din această figură se constată faptul că, la acest mod de tratare a neutrului rețelei, coeficientului  $K_{Uh}$  nu depinde de regimul în care funcționa rețeaua de 20 kV înaintea conectării bobinei de punct neutru. Comparând valorile coeficientului  $K_{Uh}(R_i)$  din acest caz cu cele din cazul când neutrul rețelei este tratat prin rezistor (fig.3.4.) se constată că acestea diferă nesemnificativ pentru rezistențe de trecere sub 400  $\Omega$  și sunt practic identice dacă rezistența de trecere este mai mare de 400  $\Omega$ .

În tabelul nr.3.10. se prezintă valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar, a curentului de defect și a curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV. Și din acest tabel, rezultă faptul că regimul de funcționare a rețelei înaintea conectării bobinei de punct neutru nu influențează practic valorile acestor mărimi.

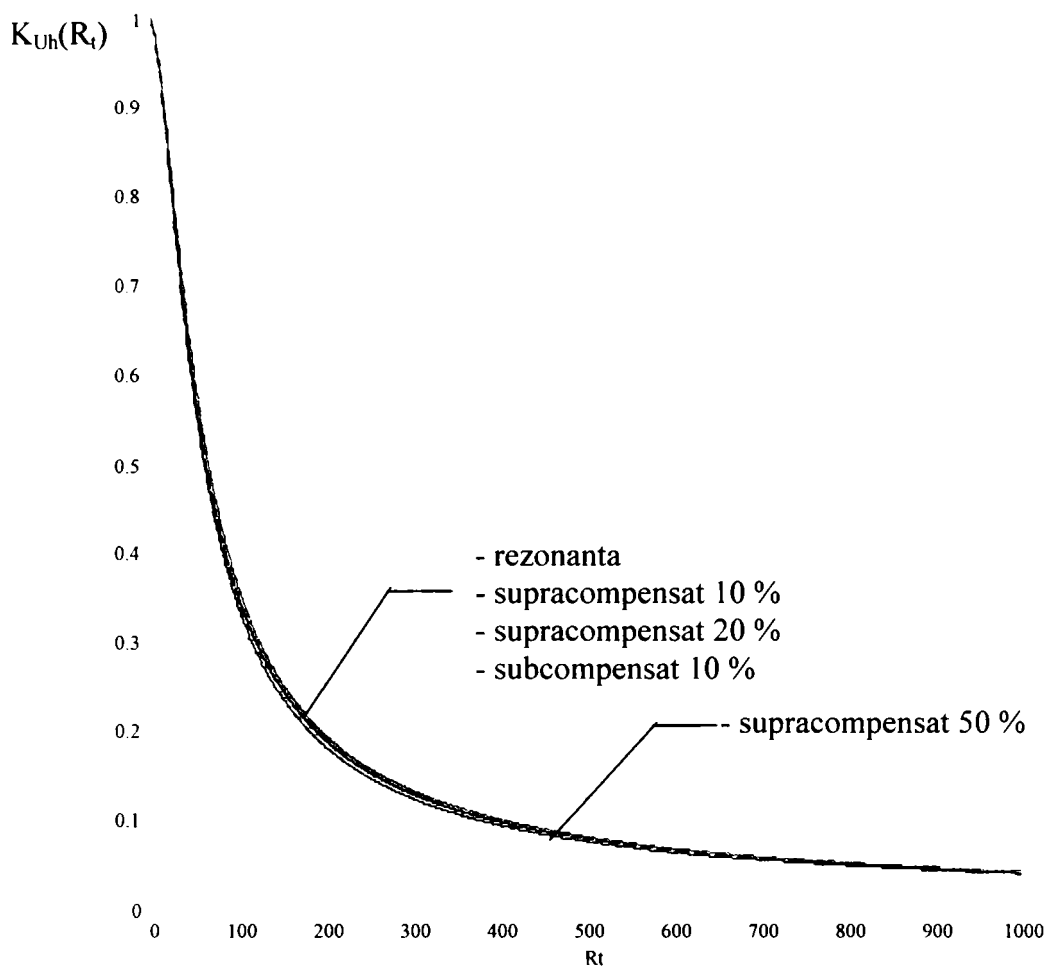


Fig. 3.13 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect când curentul capacitiv al rețelei de 20 kV este de 23 A, neutrul tratat prin (TSP+BC) || BTPC

În figura 3.14. se prezintă dependența coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, respectiv de regimul în care funcționa rețeaua înainte de conectarea bobinei de punct neutru, când curentul capacitiv total al rețelei este 60A.

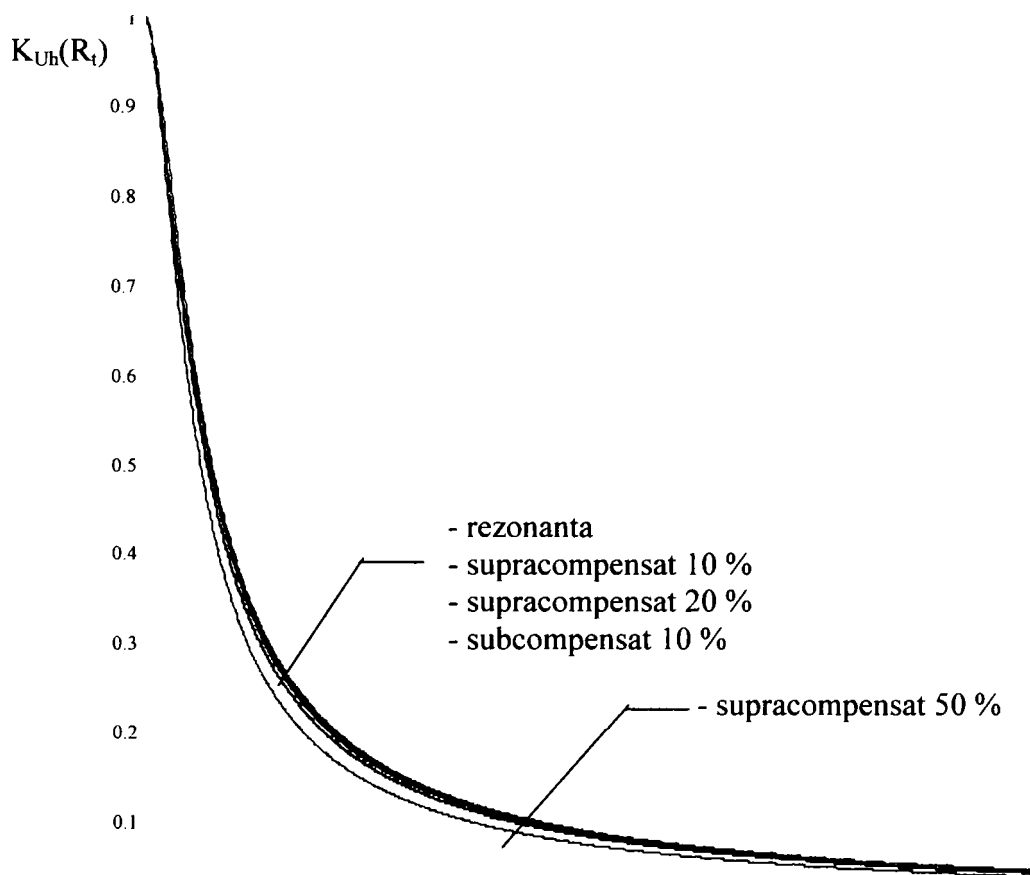


Fig.3.14

Tabel nr.3.10. Variația tensiunilor homopolare, a curenților capacitivi totali și a curenților de defect, funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat combinat (TSP + BC) // BTPC

Regim de funcționare		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	20	30	50	75	100	150	200	300	400	500	750	1000	2000
Rezonanță	$3U_0$ [V]		100	95,4	87	77,2	60,2	45,5	36,1	25,2	11,3	13	9,8	7,9	5,28	3,96	1,97
	$I_p$ [A]		300	287	261	232	181	137	108,5	75,7	57,9	39,1	29,5	23,7	15,86	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		23	22	20	17,8	13,9	10,5	8,3	5,8	4,43	3,0	2,26	1,81	1,21	0,91	0,46
	K		1	1,05	1,15	1,29	1,66	2,2	2,77	3,97	5,2	7,7	10,17	12,68	18,9	25,2	50,3
Supracomp.10%	$3U_0$ [V]		100	95,3	86,7	77	60	45,3	35,9	25	19,1	12,9	9,75	7,82	5,23	3,93	1,97
	$I_p$ [A]		300	289,2	263	233	182	137,1	108,6	75,8	57,9	39,2	29,5	23,7	15,86	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		23	22	20	17,7	13,8	10,4	8,25	5,75	4,39	3,0	2,24	1,8	1,21	0,91	0,45
	K		1	1,05	1,15	1,3	1,67	2,21	2,79	4,0	5,23	7,74	10,3	12,8	19,1	25,4	50,8
Supracomp.20%	$3U_0$ [V]		100	95,2	86,5	76,7	59,6	44,9	35,6	24,8	18,9	12,8	9,65	7,75	5,18	3,89	1,95
	$I_p$ [A]		306	291,4	264,8	234,8	182,2	137,4	108,8	75,8	57,9	39,2	29,5	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		23	21,9	19,9	17,6	13,7	10,3	8,17	5,7	4,35	2,94	2,22	1,78	1,19	0,89	0,45
	K		1	1,05	1,16	1,3	1,68	2,23	2,81	4,04	5,28	7,81	10,4	12,9	19,3	25,7	51,3
Supracomp.50%	$3U_0$ [V]		100	94,7	85,4	75,1	57,6	43,1	34	23,6	18	12,2	9,18	7,36	4,92	3,7	1,85
	$I_p$ [A]		310	305	275	242	185,7	139	109,6	76,1	58	39,2	29,6	23,7	15,87	11,92	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		23	21,8	19,6	17,3	13,3	9,92	7,82	5,43	4,14	2,8	2,11	1,69	1,13	0,85	0,43
	K		1	1,06	1,17	1,33	1,74	2,32	2,94	4,23	5,55	8,2	10,9	13,6	20,3	27	54
Subcomp.10%	$3U_0$ [V]		100	95,5	87,1	77,5	60,5	45,8	36,3	25,4	19,4	13,1	9,9	7,94	5,3	4,0	2,0
	$I_p$ [A]		299	285	260	231	181	137,3	108,4	75,7	57,8	39,1	29,5	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		23	22	20	17,8	13,9	10,5	8,35	5,83	4,46	3,02	2,28	1,83	1,22	0,92	0,46
	K		1	1,05	1,15	1,29	1,65	2,18	2,75	3,94	5,16	7,63	10,1	12,6	18,8	25,1	50

(TSP+ BC)// BTPC  
 $\Sigma I_c = 23A$

Se constată că și în acest caz regimul de funcționare al rețelei influențează ne semnificativ valorile coeficientului  $K_{Uh}$  cu excepția cazului când rețeaua funcționa supracompensat 50%. Valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar, a curentului de defect și a curentului capacitiv total funcție de rezistența de trecere și regimul în care funcționa rețeaua înaintea conectării bobinei de punct neutru sunt prezentate în tabelul nr.3.11.

Variația coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  în funcție de regimul în care funcționa rețeaua înaintea conectării bobinei de punct neutru, respectiv de rezistența de trecere la locul de defect când valoarea curentului capacitiv total al rețelei de 20 kV este 120 A, este prezentată în figura 3.15, iar valorile tensiunii homopolare din secundarul filtrului homopolar, a curentului de defect și a curentului capacitiv total, în funcție de aceleași variabile sunt prezentate în tabelul nr.3.12.

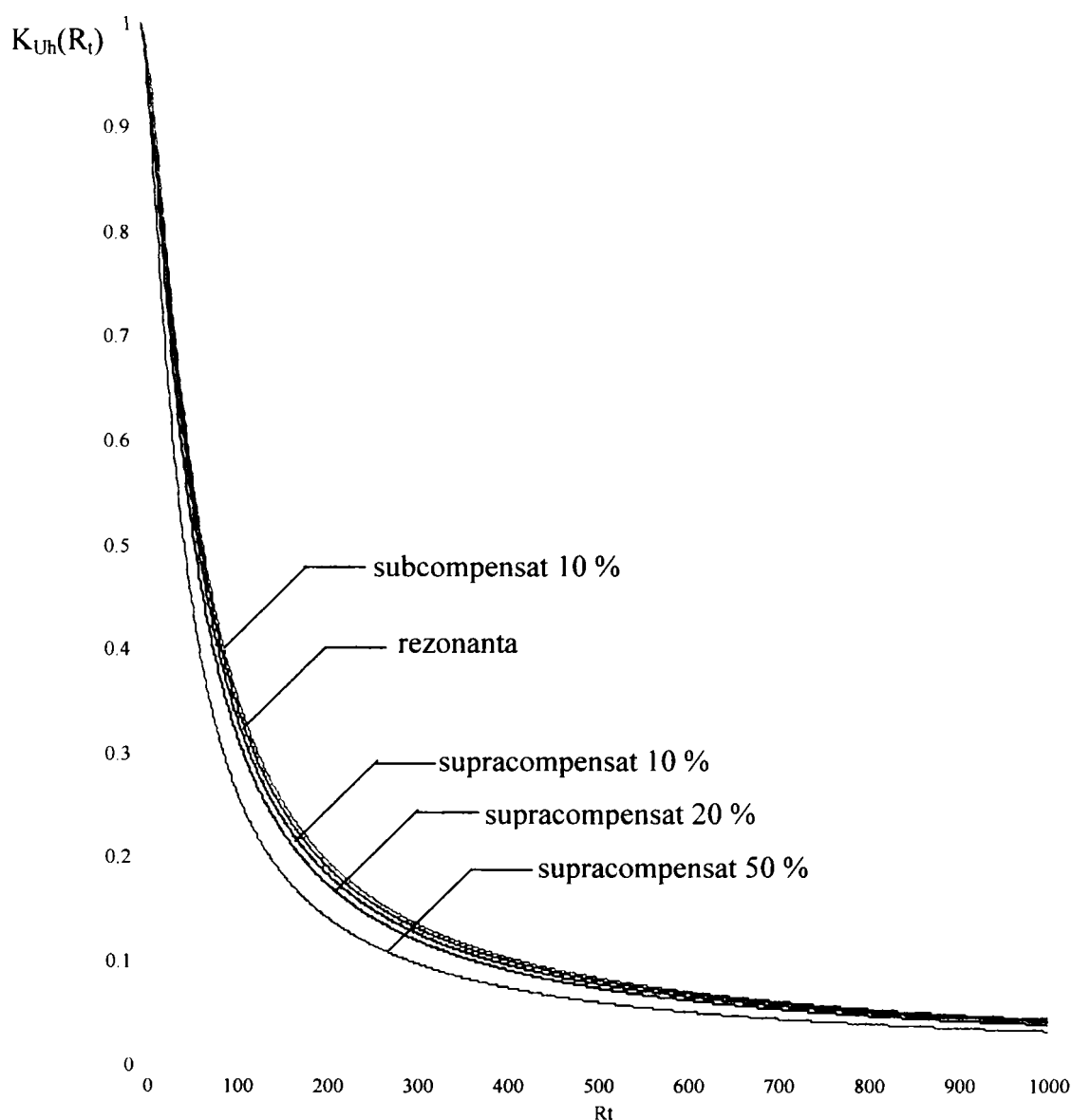


Fig. 3.15 Dependența coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de rezistența de trecere la locul de defect când curentul capacitiv al rețelei de 20 kV este de 120 A, neutrul tratat prin (TSP+BC) || BTPC

Tabel nr.3.11. Variația tensiunilor homopolare, a curenților capacitivi totali și a curenților de defect, funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat combinat (TSP + BC) // BTPC

Regim de funcționare		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	10	20	30	50	75	100	150	200	300	400	500	750	1000	2000
Rezonanță	$3U_0$ [V]		100	95,3	86,9	77,3	60,3	45,7	36,3	25,3	19,4	13,1	9,9	7,94	5,32	3,99	2,0
	$I_p$ [A]		300	284	259	230	180	136	108	75,6	57,8	39,1	29,5	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		60	57,2	52,1	46,4	36,2	27,5	21,8	15,2	11,6	7,88	5,94	4,77	3,2	2,4	1,2
	K		1	1,05	1,15	1,29	1,66	2,19	2,76	3,95	5,16	7,63	10,1	12,6	18,8	25	50
Supracomp. 10%	$3U_0$ [V]		100	95,1	86,4	76,4	59,6	45	35,6	24,9	19	12,9	9,7	7,79	5,21	3,91	1,96
	$I_p$ [A]		304	289	263	233	181	137	108	75,7	57,8	39,1	29,5	23,7	15,8	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		60	57,2	51,9	46,1	35,7	27	21,5	14,9	11,4	7,71	5,82	4,68	3,15	2,36	1,17
	K		1	1,05	1,16	1,31	1,68	2,22	2,81	4,02	5,26	7,78	10,3	12,8	19,2	25,5	51
Supracomp. 20%	$3U_0$ [V]		100	94,9	85,9	75,9	58,7	44,2	34,9	24,3	18,6	12,6	9,48	7,61	5,09	3,82	1,92
	$I_p$ [A]		311	296	268	236	183	138	109	75,8	57,9	39,1	29,5	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		60	56,9	51,6	45,6	35,3	26,6	21	14,6	11,1	7,55	5,69	4,56	3,06	2,3	1,16
	K		1	1,05	1,16	1,32	1,7	2,27	2,86	4,11	5,38	7,96	10,6	13,1	19,7	26,2	52,2
Supracomp. 50%	$3U_0$ [V]		100	93,4	83	72	54,2	40,2	31,5	21,8	16,6	11,2	8,45	6,78	4,53	3,41	1,71
	$I_p$ [A]		348	327	290	252	190	141	110	76,3	58,1	39,2	29,6	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		60	56,1	49,8	43,2	32,6	24,2	18,9	13,1	9,96	6,72	5,07	4,07	2,72	2,04	1,02
	K		1	1,07	1,21	1,39	1,84	2,49	3,17	4,58	6,02	8,92	11,8	14,8	22,1	29,4	58,6
Subcomp. 10%	$3U_0$ [V]		100	95,5	87,2	77,8	61	46,3	36,8	25,7	19,7	13,3	10,1	8,08	5,41	4,06	2,04
	$I_p$ [A]		294	280	256	228	179	136	108	75,5	57,7	39,1	29,5	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_t)$ [A]		60	57,3	52,4	46,7	36,6	27,8	22,1	15,5	11,8	7,95	6,05	4,85	3,24	2,43	1,22
	K		1	1,05	1,15	1,29	1,64	2,16	2,72	3,89	5,1	7,5	9,94	12,4	18,5	24,6	49,1

(TSP+ BC)// BTPC  
 $\Sigma I_c = 60A$

Tabel nr.3.12. Variația tensiunilor homopolare, a curenților capacitivi totali și a curențului de defect, funcție de rezistența de trecere la locul de simplă punere la pământ în rețelele electrice de 20 kV cu neutrul tratat combinat (TSP + BC) // BTPC

Regim de funcționare		$R_1$ [ $\Omega$ ]	0	10	20	30	50	75	100	150	200	300	400	500	750	1000	2000
Rezonanță	$3U_0$ [V]		100	95,3	86,9	77,5	60,9	46,4	36,9	25,9	19,8	13,4	10,1	8,15	5,46	4,1	2,06
	$I_p$ [A]		291	277	252	225	177	135	107	75,1	57,5	39	29,5	23,7	15,8	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	114,3	104	93	73,1	55,6	44,3	31	23,8	16,1	12,2	9,78	6,55	4,92	2,47
Supracomp.10%	K		1	1,05	1,15	1,29	1,64	2,16	2,71	3,87	5,05	7,45	9,86	12,3	18,3	24,4	48,7
	$3U_0$ [V]		100	94,9	86,1	76,4	59,5	45,1	35,8	25	19,1	13,0	9,79	7,86	5,26	3,95	1,98
	$I_p$ [A]		301	286	259	230	179	136	108	75,3	57,6	39,0	29,5	23,7	15,8	11,9	5,97
Supracomp.20%	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	114	103	91,7	71,4	54,1	42,9	30	22,9	15,6	11,7	9,43	6,31	4,74	2,38
	K		1	1,05	1,16	1,31	1,68	2,22	2,8	4	5,23	7,72	10,2	12,7	19,0	25,3	50,5
	$3U_0$ [V]		100	94,4	85,1	75	57,9	43,6	34,5	24	18,4	12,4	9,38	7,53	5,04	3,79	1,9
Supracomp.50%	$I_p$ [A]		314	297	268	236	182	137	108	75,5	57,7	39,1	29,5	23,7	15,8	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	113	102	90	69,5	52,3	41,3	28,8	22	14,9	11,3	9,04	6,05	4,54	2,28
	K		1	1,06	1,18	1,33	1,73	2,3	2,9	4,16	5,45	8,05	10,7	13,3	19,8	26,4	52,7
Subcomp.10%	$3U_0$ [V]		100	91,6	79,9	68,3	50,6	37,2	29	20,1	15,3	10,3	7,77	6,23	4,17	3,13	1,57
	$I_p$ [A]		377	347	304	260	193	141	111	76,3	58,1	39,2	29,5	23,7	15,9	11,9	5,97
	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	110	95,9	82	60,7	44,6	34,9	24,1	18,3	12,4	9,32	7,48	5,0	3,76	1,88
Subcomp.10%	K		1	1,09	1,25	1,46	1,98	2,69	3,44	4,99	6,55	9,71	12,9	16,1	24	31,9	63,7
	$3U_0$ [V]		100	95,6	87,6	78,5	62,1	47,5	37,9	26,6	20,4	13,9	10,5	8,41	5,63	4,23	2,12
	$I_p$ [A]		282	269	246	221	175	134	107	74,9	57,4	39,0	29,4	23,6	15,8	12,0	5,96
Subcomp.10%	$\Sigma I_c(R_c)$ [A]		120	115	105	94,2	74,5	57,0	45,5	32,0	24,5	16,6	12,6	10,1	6,76	5,1	2,55
	K		1	1,05	1,14	1,27	1,61	2,11	2,64	3,76	4,9	7,22	9,55	11,9	17,8	23,6	47,2

(TSP+ BC)// BTPN  $\Sigma I_c = 120A$

Din fig. 3.13 și 3.15 se constată că deși curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV a crescut de la 23 A la 120 A curbele de variație a coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere diferă ne semnificativ. Deci la acest mod de tratare a neutrului rețelei de medie tensiune, curentul capacitiv total al rețelei nu este o mărime semnificativă în ceea ce privește variația tensiunii homopolare în funcție de rezistența de trecere în cazul unei simple puneri la pământ.

### 3.7. Concluzii

Comparând soluția de tratare a neutrului propusă de autor cu variantele utilizate până în prezent privind comportarea rețelei de medie tensiune în cazul unei simple puneri la pământ rezultă următoarele concluzii mai importante:

a) Solicitarea izolației fazelor fără defect în timpul unei simple puneri la pământ este mult mai scăzută în cazul soluției propuse de autor. Astfel dacă rezistența de trecere la locul de defect este de peste 400  $\Omega$  (situație frecvent întâlnită în exploatare) tensiunea fazelor fără defect rămâne practic aceeași cu cea din regim normal de funcționare (fig. 3.13, 3.14 și 3.15). În situația când nulul rețelei este izolat tensiunea fazelor fără defect este practic egală cu cea din regim normal de funcționare numai dacă rezistența de trecere la locul de defect depășește valoarea de 5000  $\Omega$  când curentul capacitiv total al rețelei este 23 A, respectiv dacă rezistența de trecere depășește 10000  $\Omega$  când curentul capacitiv total al rețelei este 12 A (fig. 3.3). Cum normativele în vigoare prevăd că nulul rețelei de medie tensiune poate fi izolat, doar dacă curentul capacitiv al acesteia este maxim 15 A, rezultă că soluția propusă de autor este net superioară celei cu neutrul izolat.

Pentru varianta de tratare a neutrului cu bobină de compensare, în cazul unei simple puneri la pământ tensiunea fazelor fără defect este aproximativ egală cu cea din regim normal de funcționare, dacă rezistența de trecere la locul de defect depășește valoarea de 10000  $\Omega$  (fig. 3.5...3.9). Deci solicitarea izolației pe durata unei simple puneri la pământ este mult mai mare decât în cazul soluției propuse de autor. Această afirmație este întărită și de faptul că majoritatea simplelor puneri la pământ au loc prin rezistență de trecere mai mică de 1000  $\Omega$ . În cazul rețelelor care au neutrul tratat prin rezistor, sau combinat utilizând bobină de compensare în paralel cu un rezistor, solicitarea izolației pe durata unei simple puneri la pământ (fig. 3.4, 3.10, 3.11, 3.12) este aproximativ aceeași ca în cazul soluției propuse de autor.

b) În rețelele de medie tensiune care au neutrul izolat sau tratat prin bobină de compensare depistarea unei simple puneri la pământ cu ajutorul protecțiilor se face controlând tensiunea homopolară pe bara de medie tensiune din stația de transformare și conținutul în armonici al curentului de defect [133, 134, 135, 141]. Experiența de exploatare a evidențiat că în cazul simplelor puneri la pământ prin rezistență de trecere mai mare de aproximativ 200  $\Omega$  nu



mai poate fi sesizată selectiv linia cu defect. Acest neajuns conduce la creșterea timpilor de funcționare a rețelei cu o simplă punere la pământ, ajungându-se la timpi de ordinul minutelor, deoarece depistarea liniei cu defect se face manual, prin deconectarea și reconectarea succesivă a liniilor de medie tensiune din stația de transformare. În cazul rețelelor cu neutrul tratat prin rezistor, respectiv a celor cu neutrul tratat combinat (bobină de compensare în paralel cu un rezistor) pentru sesizarea liniei cu simplă punere la pământ, cu ajutorul protecțiilor, se controlează valoarea tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune din stația de transformare, valoarea curentului de defect și valoarea curentului prin rezistor. În acest fel pot fi sesizate selectiv simple puneri la pământ care au loc prin rezistență de trecere a cărei valoare poate ajunge până la  $5000 \Omega$ . În cazul variantei propuse de autor se mențin aceste protecții deci și din acest punct de vedere soluția este superioară celei în care neutrul este izolat sau tratat prin bobină de compensare.

c) Deoarece în soluția propusă de autor la apariția unei simple puneri la pământ se funcționează  $0,4 \text{ s} \dots 0,8 \text{ s}$  cu neutrul tratat prin bobină de compensare, se asigură selectarea defectelor trecătoare de cele permanente, ceea ce nu se realizează în cazul variantei de tratare a neutrului prin rezistor. Prin aceasta se evită deconectarea liniilor în cazul defectelor trecătoare ceea ce desigur constituie un mare avantaj al soluției propuse de autor, cu atât mai mult cu cât datele statistice că în cazul liniilor aeriene sau mixte defectele trecătoare reprezintă  $60\% \dots 80\%$  din numărul total al simplelor puneri la pământ.

d) Prin introducerea de către autor în lucrare a coeficientului  $K_{Uh}(R_t)$  și trasarea curbelor de variație a acestui coeficient în situațiile concrete existente în exploatare, se pune la dispoziția proiectanților și a inginerilor din exploatare o metodă rapidă de stabilire a reglajelor protecțiilor putându-se determina din relațiile 3.30 ... 3.34 valorile mărimilor ce sunt controlate prin intermediul protecțiilor.

e) Având în vedere faptul că prin soluția propusă se elimină rezistorul, se reduc cheltuielile de implementare și totodată crește fiabilitatea rețelelor. Acest lucru este important deoarece exploatarea rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistor a evidențiat posibilitatea întreruperii acestuia, ceea ce face ca rețeaua să devină cu nulul izolat. O astfel de situație poate conduce la consecințe grave deoarece protecțiile cu ajutorul cărora se stabilește linia cu simplă punere la pământ nu mai au condiții de funcționare.

## Cap.4. ANALIZA REGIMULUI TRANZITORIU PROVOCAT DE SIMPLELE PUNERI LA PĂMÂNT

### 4.1.Considerații generale

Regimurile tranzitorii provocate de simplele puneri la pământ pot conduce la valori mult mai mari ale tensiunilor și curenților decât în regim stabilizat. Din acest motiv pentru a determina solicitarea izolației cât și solicitările electrodinamice se impune analiza acestor regimuri tranzitorii.

Analiza regimurilor tranzitorii în rețelele electrice presupune rezolvarea unui sistem de ecuații format din ecuațiile lui Kirchhoff asociate rețelei respective, împreună cu relațiile dintre tensiune și curent pe fiecare element al rețelei (relațiile constitutive ale elementelor). Dacă rețeaua conține și elemente reactive (bobine și/sau condensatoare), relațiile constitutive sunt de tip diferențial/integral. Numărul de ecuații al acestui sistem algebric-diferențial/integral rezultat depinde evident de numărul de elemente al rețelei și modul lor de interconectare. Pentru o simulare realistă a unei rețele fizice este necesară modelarea ei printr-un număr suficient de mare de elemente de circuit, ceea ce face ca schema electrică supusă modelării să devină destul de complexă. În consecință, analiza ei trebuie să fie asistată de calculator. Dintre metodele de analiză asistată de calculator a circuitelor electrice, două sunt în uz curent [97, 126]:

- 1) metoda variabilelor de stare,
- 2) metoda potențialelor nodurilor.

Metoda variabilelor de stare presupune menținerea ca necunoscute a tensiunilor condensatoarelor și a curenților prin bobine, astfel încât se obține în final un sistem de ecuații diferențiale de ordinul întâi. Sistemul de ecuații astfel obținut, numit și *ecuațiile de stare ale circuitului*, reprezintă setul minim de ecuații care descrie evoluția temporală a circuitului; tensiunile și curenții care intervin în ecuațiile de stare sunt numite *variabilele de stare ale circuitului*. Sistemul ecuațiilor de stare se integrează apoi, de regulă, prin metode numerice.

După obținerea variabilelor de stare, se revine la ecuațiile folosite în etapele de eliminare, pentru a exprima eventual și alte variabile dorite în funcție de variabilele de stare de acum cunoscute. Metoda variabilelor de stare presupune deci rezolvarea unui sistem minimal de ecuații, care reprezintă esența dinamicii circuitului. Acest avantaj este însă diminuat de un proces de eliminare a variabilelor nedorite destul de complicat, dar care desigur, poate fi preluat de calculator. De asemenea, matricea sistemului de ecuații diferențiale este dens populată cu

elemente, ceea ce lungeste timpul de calcul. După rezolvarea ecuațiilor de stare, este necesară o altă etapă, aceea de a obține mărimile necunoscute pe baza variabilelor de stare.

Metoda potențialelor nodurilor (sau metoda analizei nodale) consideră drept variabile ale circuitului potențialele nodurilor. Obținerea ecuațiilor pe noduri are loc mai simplu și mai rapid decât obținerea ecuațiilor de stare, aceste ecuații având aceeași formă și în curent continuu și în curent alternativ și chiar în regim dinamic. După rezolvarea ecuațiilor nodale, avem deja cunoscute potențialele tuturor nodurilor, din care se obțin tensiunile și curenții din laturile circuitului.

Față de metoda variabilelor de stare, la metoda analizei nodale, sistemul de ecuații de rezolvat este mai mare, dar matricile implicate sunt mai rar populate.

## 4.2. Metoda variabilelor de stare

### 4.2.1. Elemente de teoria grafurilor

La baza formulării sistematice a ecuațiilor unui circuit stă conceptul de *graf*. Schemei electrice a unui circuit dat i se asociază un graf, înlocuind fiecare element de circuit printr-un segment de linie. Graful se orientează prin alegerea arbitrară a unui sens pe fiecare latură a lui, care va reprezenta sensul pozitiv pentru curentul din elementul de circuit corespunzător acelei laturi, respectiv pentru tensiunea de la bornele acelui element de circuit. Graful unui circuit reține doar modul de interconectare al elementelor circuitului, adică topologia schemei; natura particulară a elementelor de circuit nu interesează.

Un grup de laturi care unește două noduri ale grafului se numește *cale*. O cale la care nodul de sfârșit coincide cu nodul de început se numește *buclă*. Un set de laturi care unesc toate nodurile, dar nu formează bucle, se numește *arbore*. Laturile arborelui se numesc *ramuri*. Laturile grafului care nu sunt conținute în arbore, se numesc *corzi*. Ele formează un arbore complementar primului, numit *coarbore*.

Dacă circuitul are  $n$  noduri și  $l$  elemente de circuit, atunci evident și graful asociat va avea  $n$  noduri și  $l$  laturi. Numărul minim de laturi necesare pentru a lega între ele cele  $n$  noduri este  $n-1$ , deci un arbore al grafului va avea  $n-1$  ramuri, iar coarboarele,  $l-(n-1)$  corzi.

Să presupunem că am selectat un arbore pentru un graf dat. Fiecare coardă adăugată arborelui va forma cu ramurile acestuia o buclă, numită *buclă fundamentală*. La un graf având  $n$  noduri și  $l$  laturi, numărul buclelor fundamentale este deci egal cu al corzilor adică  $o=l-(n-1)$ . Vom numerota buclele fundamentale de la 1 la  $o$  și vom atribui, fiecărei bucle, un sens de parcurgere, identic cu sensul corzii care a generat bucla respectivă.

$$\text{Matricea } B = [b_{ij}], \quad (4.1)$$

unde

$b_{ij} = 1$  dacă latura  $l$  aparține buclei  $i$  și are aceeași orientare ca și bucla ,

$b_{ij} = -1$  dacă latura  $l$  aparține buclei  $i$  și are orientare opusă buclei ,

$b_{ij} = 0$  dacă latura  $l$  nu aparține buclei  $i$ .

se numește *matricea fundamentală a buclelor* [18].

Cu ajutorul ei, teorema a doua a lui Kirchhoff se scrie astfel:

$$B \cdot u = 0, \quad (4.2)$$

unde  $u = [u_1, u_2, \dots, u_l]^T$  este matricea coloană a tensiunilor laturilor (indicele "t" semnifică operația de transpunere); ordinea liniilor din vectorul  $u$  este aceeași ca ordinea coloanelor din matricea  $B$ . Această relație matricială generează  $o = l-n+1$  ecuații independente în tensiunile laturilor.

În fine, o tăietură fundamentală asociată unui arbore se obține înlăturând o ramură a arborelui și corzile necesare prin care graful se separă în două subgrafuri ("insule"), astfel încât să nu existe nici o cale care să lege un nod al primului subgraf de un alt nod al celui de-al doilea subgraf.

$$\text{Atunci, matricea } D = [d_{ij}], \quad (4.3)$$

unde

$d_{ij} = 1$  dacă latura  $l$  este în tăietura  $i$  și are sensul ramurii care a generat tăietura,

$d_{ij} = -1$  dacă latura  $l$  este în tăietura  $i$  și are sens opus ramurii care a generat tăietura,

$d_{ij} = 0$  dacă latura  $l$  nu este în tăietură,

se numește *matricea fundamentală a tăieturilor*. Matricea este de dimensiune  $(n-1) \times l$ .

Cu ajutorul ei, teorema I-a a lui Kirchhoff se scrie:

$$D \cdot i = 0, \quad (4.4)$$

unde laturile care corespund liniilor matricii coloană a curenților laturilor,  $i = [i_1, i_2, \dots, i_l]^T$ ,

apar în aceeași ordine ca în coloanele matricii  $D$ .

Dacă ordonăm coloanele matricii  $B$  astfel primele  $n-1$  să corespundă ramurilor arborelui iar următoarele  $l-n+1$ , corzilor coarborelui, se obține [20, 97]:

$$B = [B_T \ 1] \quad (4.5)$$

unde coloanele lui  $B_T$  se referă la ramuri, iar coloanele matricii identitate, la corzi.

$$\text{În mod similar se procedează și cu matricea } [D] \text{ obținându-se } D = [1 \ D_\Lambda] \quad (4.6)$$

coloanele matricii  $D_\Lambda$  corespunzând corzilor. Între matricile  $B_T$  și  $D_\Lambda$  există relația 20

$$B_T = -D_\Lambda', \quad (4.7)$$

indicele superior  $t$  simbolizând din nou operația de transpunere. Cunoscând deci matricea  $B$ , se obține imediat matricea  $D$  și reciproc.

#### 4.2.2. Formularea ecuațiilor de stare pentru rețele RLC liniare

Ne vom referi la rețele formate din surse independente de tensiune și/sau curent, rezistoare, bobine (eventual cuplate magnetic) și condensatoare. Presupunem că nu există bucle formate numai din surse independente de tensiune, respectiv tăieturi formate numai din surse independente de curent. Rețeaua poate conține  $n_C$  bucle formate numai din condensatoare, sau condensatoare și surse independente de tensiune, respectiv  $n_L$  tăieturi formate numai din bobine sau bobine și surse independente de curent.

Tensiunile de la bornele condensatoarelor, împreună cu curenții prin bobine, reprezintă variabilele de stare ale rețelei. Dacă  $n_{LC}$  este numărul total de bobine și condensatoare, atunci numărul variabilelor de stare independente este  $n_{LC} - n_C - n_L$ ; acest număr se mai numește și *ordinul de complexitate* al rețelei.

Esența metodei variabilelor de stare constă în a obține un set de ecuații diferențiale de ordinul întâi, de dimensiunile  $n_{LC} - n_C - n_L$ , în variabilele de stare. Întrucât numărul total de ecuații al unui circuit este  $2l$  ( $l$  relații provenind din teoremele lui Kirchhoff, iar  $l$  reprezentând relațiile constitutive ale laturilor), procedura de eliminare a  $2l - (n_{LC} - n_C - n_L)$  relații nu este chiar banală. Algoritmul după care are loc această eliminare va fi schițat în continuare [20]:

1. Se selectează un arbore  $T$  care conține toate sursele independente de tensiune, nici o sursă independentă de curent, cât mai multe condensatoare, cât mai puține bobine. Un astfel de arbore se numește *arbore normal*.

2. Se scriu teoremele lui Kirchhoff:

$$D \cdot i = 0, \quad B \cdot u = 0 \quad (4.8)$$

unde matricile  $u$  și  $i$  sunt sectorizate astfel:

$$i = \left[ i_{ET} i_{CT} i_{RT} i_{LT} i_{JA} i_{LA} i_{RA} i_{CA} \right] \quad (4.9)$$

$$u = \left[ u_{ET} u_{CT} u_{RT} u_{AT} u_{JA} u_{LA} u_{RA} u_{CA} \right] .$$

Indicii  $T$  și  $A$  se referă la ramurile arborelui, respectiv corzile coarborelui, iar  $E, C, R, L, J$  la laturi conținând surse independente de tensiune, condensatoare, rezistoare, bobine, respectiv surse independente de curent.

Matricea  $D$  este sectorizată astfel:

$$D = \begin{bmatrix} \hat{1} & 0 & 0 & 0 & F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Ordinea laturilor care intervin în submatricile care formează un rând este aceeași cu a laturilor care intervin în submatricile care formează coloana matricilor  $i$  și  $u$ , adică ramuri care conțin surse independente de tensiune ( $E_T$ ), ramuri cu condensatoare ( $C_T$ ), ramuri cu rezistoare ( $R_T$ ), ramuri cu bobine ( $L_T$ ), corzi cu surse independente de curent ( $J_\Lambda$ ), corzi cu bobine ( $L_\Lambda$ ), corzi cu rezistoare ( $R_\Lambda$ ) și în final, corzi cu condensatoare ( $C_\Lambda$ ).

Ținând cont de relația  $B_T = -D'_\Lambda$  rezultă

$$B = \begin{bmatrix} -F'_{11} & -F'_{21} & -F'_{31} & -F'_{41} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -F'_{12} & -F'_{22} & -F'_{32} & -F'_{42} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -F'_{13} & -F'_{23} & -F'_{33} & -F'_{43} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -F'_{14} & -F'_{24} & -F'_{34} & -F'_{44} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Din modul de construcție al arborelui normal rezultă  $F_{34} = F_{43} = F_{44} = 0$ ,  
 $F'_{43} = F'_{34} = F'_{44} = 0$ .

3. Se scriu relațiile constitutive ale elementelor de circuit:

-pentru laturile cu rezistoare:

$$\begin{aligned} u_{RT} &= R_T i_{RT} & \text{sau} & & i_{RT} &= G_T u_{RT} \\ i_{R\Lambda} &= G_\Lambda u_{R\Lambda} & & & u_{R\Lambda} &= R_\Lambda i_{R\Lambda} \end{aligned} ; \quad (4.12a)$$

-pentru laturile cu condensatoare:

$$\begin{bmatrix} i_{CT} \\ i_{C\Lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T & 0 \\ 0 & C_\Lambda \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{CT} \\ u_{C\Lambda} \end{bmatrix} ; \quad (4.12b)$$

-pentru ramurile cu inductivități:

$$\begin{bmatrix} u_{\Lambda T} \\ u_{L\Lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{TT} & L_{T\Lambda} \\ L_{\Lambda T} & L_{\Lambda\Lambda} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{LT} \\ i_{L\Lambda} \end{bmatrix} . \quad (4.12c)$$

4. Din ecuațiile (4.8) și (4.12) se elimină toate variabilele, mai puțin  $u_{CT}, i_{L\Lambda}, u_{ET}$  și  $i_{J\Lambda}$ :

- a) se exprimă  $i_{CT}$  în funcție de curenții corzilor, iar  $u_{LA}$  în funcție de tensiunile ramurilor;  
 b) se exprimă  $i_{LT}$  în funcție de  $i_{LA}$  și  $i_{JA}$ , iar  $u_{CA}$  în funcție de  $u_{CT}$  și  $u_{ET}$ ;  
 c) se exprimă  $u_{LT}$  în funcție de  $di_{JA}/dt$  și  $di_{LA}/dt$ , iar  $i_{CA}$  în funcție de  $du_{ET}/dt$  și  $du_{CT}/dt$ ;  
 d) se exprimă  $u_{RT}$  în funcție de  $u_{ET}$ ,  $u_{CT}$ ,  $i_{JA}$ ,  $i_{LA}$ ; analog pentru  $i_{RA}$ ;  
 e) din relațiile (4.12b) și (4.12c) se rețin prima linie, respectiv a doua, obținându-se

$$\begin{bmatrix} C_T & 0 \\ 0 & L_{\Lambda\Lambda} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{CT} \\ i_{LA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{CT} \\ u_{LA} - L_{\Lambda T} \frac{di_{LT}}{dt} \end{bmatrix}$$

Înlocuind aici  $i_{CT}$ ,  $u_{LA}$  și  $i_{LT}$  prin expresiile obținute anterior, obținem în final sistemul ecuațiilor de stare:

$$M \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{CT} \\ i_{LA} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_{CT} \\ i_{LA} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u_{ET} \\ i_{JA} \end{bmatrix} + B_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{ET} \\ i_{LA} \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

unde

$$M = \begin{bmatrix} (C_T + F_{24} C_{\Lambda} F'_{24}) & 0 \\ 0 & (L_{\Lambda\Lambda} - F'_{42} L_{T\Lambda} - L_{\Lambda T} F_{42} + F'_{42}) \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} (-F_{23} R^{-1} F'_{23}) & (-F'_{22} + F_{23} R^{-1} F'_{33} R_T F_{32}) \\ (F'_{22} - F'_{32} G^{-1} F_{33} G_{\Lambda} F'_{23}) & (-F'_{32} G^{-1} F_{32}) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} (-F_{23} R^{-1} F'_{13}) & (-F_{21} + F_{23} R^{-1} F'_{33} R_T F_{31}) \\ (F'_{12} - F'_{32} G^{-1} F_{33} G_{\Lambda} F'_{13}) & (-F'_{32} G^{-1} F_{31}) \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} (-F_{24} C_{\Lambda} F'_{14}) & 0 \\ 0 & (-F'_{42} L_{TT} F_{41} + L_{\Lambda T} F_{41}) \end{bmatrix},$$

unde s-a notat:

$$R = R_{\Lambda} + F'_{33} R_T F_{33} \quad \text{și} \quad G = G_T + F_{33} G_{\Lambda} F'_{33}$$

Făcând schimbarea de variabilă

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{CT} \\ \hat{i}_{L\Lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u}_{CT} \\ \hat{i}_{L\Lambda} \end{bmatrix} - M^{-1} B_1 \begin{bmatrix} u_{ET} \\ i_{J\Lambda} \end{bmatrix}$$

ecuațiile (4.13) ajung în forma normală

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{u}_{CT} \\ \hat{i}_{C\Lambda} \end{bmatrix} = M^{-1} A \begin{bmatrix} \hat{u}_{CT} \\ \hat{i}_{C\Lambda} \end{bmatrix} + M^{-1} (B + AM^{-1} B_1) \begin{bmatrix} u_{ET} \\ i_{J\Lambda} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Acest sistem de ecuații diferențiale liniare de ordinul întâi se rezolvă printr-un procedeu numeric, de regulă bazat pe algoritmul Runge –Kutta, disponibil în toate pachetele de soft matematic și cu o convergență bine controlată.

După rezolvarea sistemului, dispunem de tensiunile condensatoarelor din ramuri,  $u_{CT}$ , și de curenții bobinelor din corzi,  $i_{L\Lambda}$ . Apoi, parcurgând etapa de eliminare 4 în sens invers, se obțin rând pe rând și ceilalți curenți respectiv celelalte tensiuni necunoscute.

Din prezentarea făcută rezultă că modificări ale valorilor parametrilor de circuit ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $M$ ) lasă submatricile topologice  $F_{ij}$  nemodificate, reflectându-se doar prin modificări ale submatricelor constitutive  $R_T$ ,  $R_{\Lambda}$ ,  $R_{TT}$ , .... Aceasta conduce la recalcularea matricilor  $M$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $B_1$ . Dacă apar modificări ale topologiei schemei, prin adăugarea de noi elemente de circuit sau eliminarea unora deja prezente, este afectată în general structura arborelui normal, necesitând alegerea unuia nou. Atunci se modifică nu numai matricile topologice  $F_{ij}$ , dar și matricile constitutive  $R_T$ ,  $R_{\Lambda}$ ,  $L_{LL}$ ,... datorită unei posibile redistribuiri a elementelor de circuit pe ramuri și corzi. Datorită modului oarecum complicat în care se reflectă modificările făcute schemei, în special în cazul rețelelor mari, eficiența metodei variabilelor de stare este discutabilă.

### 4.2.3. Formularea ecuațiilor de stare pentru rețeaua considerată

Acest exemplu de aplicare a metodei variabilelor de stare la o rețea concretă va fi rezolvat prin deducerea manuală a ecuațiilor de stare, datorită inaccesibilității autorului la un soft corespunzător.

Schema electrică în cauză este reprezentată în figura 4.1.



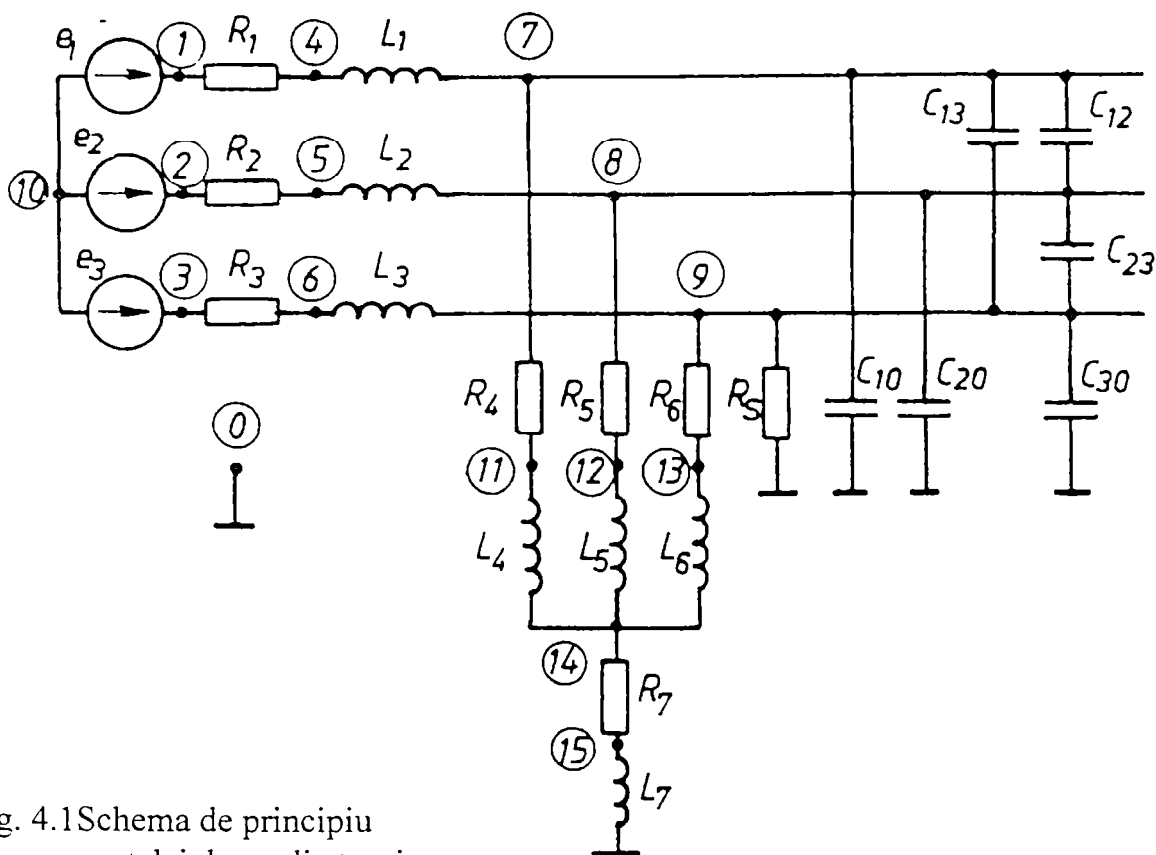


Fig. 4.1 Schema de principiu a rețelei 'e medie tensiune

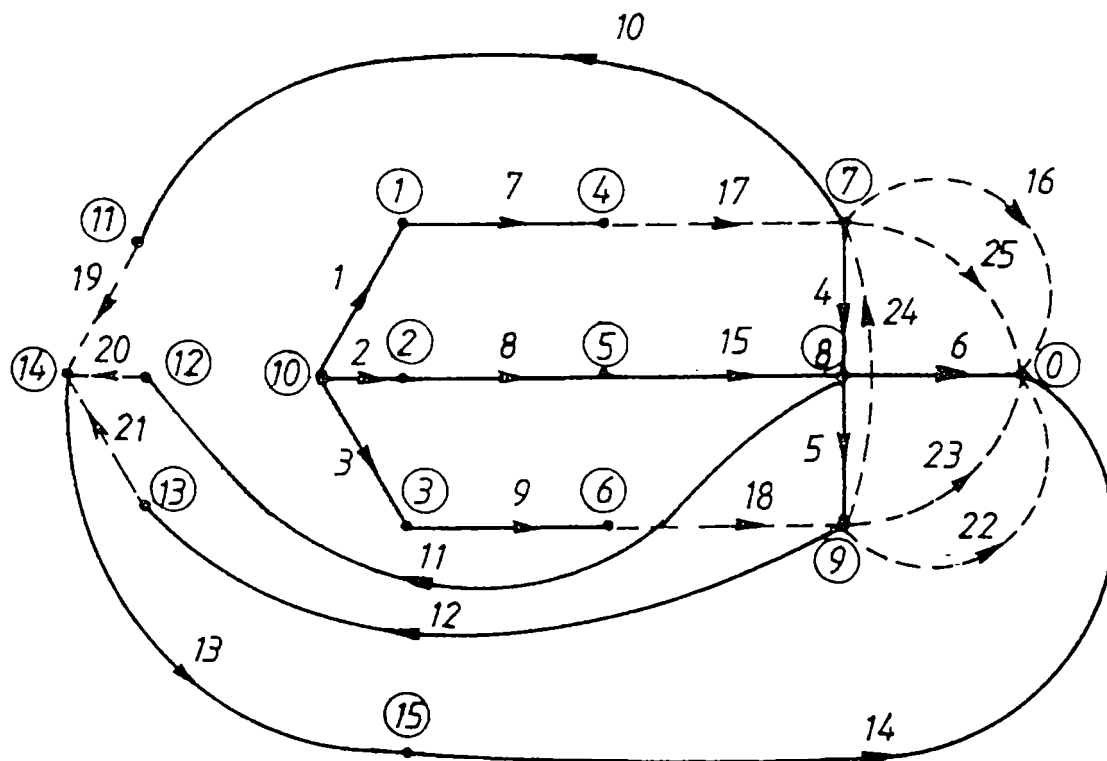


Fig. 4.2. Graful asociat rețelei de medie tensiune

Graful acestui circuit este reprezentat în figura 4.2, în care arborele normal selectat este desenat cu linie continuă, iar coarboarele, cu linie întreruptă. În figura 4.2, cifrele încercuite reprezintă numerotarea nodurilor, iar cele neîncercuite, numerotarea laturilor. S-a respectat ordinea de numerotare a laturilor din subcapitolul 4.2.2, adică, mai întâi ramurile cu surse

independente de tensiune, apoi cele cu capacități, rezistențe, inductivități; în continuare, corzile cu surse independente de curent, cele cu inductivități, rezistențe, capacități. Din acest motiv indicii laturii grafului nu corespund cu indicii elementelor din laturile corespunzătoare ale schemei circuitului. De asemenea, s-a introdus, din motive de construcție a matricilor, o sursă de curent fictivă, de valoare nulă, între nodurile 7 și 0 (latura 16 în figura 4.2). Graful conține 6 laturi capacitive, 7 laturi inductive ( $n_{LC}=13$ ), 2 tăieturi inductive ( $n_L=2$ ) și 3 bucle capacitive ( $n_C=3$ ). Ordinul de complexitate al circuitului, și deci și numărul variabilelor de stare independente, este  $n_{LC}-n_C-n_L=8$ .

Valorile numerice ale parametrilor elementelor de circuit, numerotate în ordinea laturilor grafurilor, pentru cazul considerat [105], sunt:  $C_4 = C_5 = 0,34 \mu\text{F}$ ;  $C_6 = 1,16 \mu\text{F}$ ;

$R_7 = R_8 = R_9 = 0,1 \Omega$ ;  $R_{10} = R_{11} = R_{12} = 7,6 \Omega$ ;  $R_{13} = 5,8 \Omega$ ;  $L_{14} = 1,05 \text{ H}$ ;  $L_{15} = 6,7 \text{ mH}$ ;

$L_{17}=L_{18} = 6,7 \text{ mH}$ ;  $L_{19} = L_{20} = L_{21} = 82 \text{ mH}$ ;  $R_{22} = 4 \Omega$ ;  $C_{23} = C_{25} = 1,16 \mu\text{F}$ ;  $C_{24} = 0,34 \mu\text{F}$ .

Vectorii tensiune, respectiv curent, corespunzător surselor independente, sunt:

$$u_E = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad i_J = [i_{16}],$$

unde

$u_1=16330\sin 100\pi t$  [V],  $u_2=16330\sin(100\pi t-2\pi/3)$  [V],  $u_3=16330\sin(100\pi t-4\pi/3)$  [V]

$i_{16}=0$

Matricile elementelor de circuit sunt:

$$R_T = \begin{bmatrix} R_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{13} \end{bmatrix}; \quad R_\Lambda = [R_{22}];$$

$$C_T = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & 0 \\ 0 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & C_6 \end{bmatrix}; \quad C_\Lambda = \begin{bmatrix} C_{23} & 0 & 0 \\ 0 & C_{24} & 0 \\ 0 & 0 & C_{25} \end{bmatrix};$$

$$L_{TT} = \begin{bmatrix} L_{14} & 0 \\ 0 & L_{15} \end{bmatrix}; \quad L_{T\Lambda} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$L_{\Delta T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ - & \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad L_{\Delta \Delta} = \begin{bmatrix} L_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{18} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{19} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{20} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{21} \end{bmatrix}.$$

Submatricile  $L_{TA}$  și  $L_{AT}$  sunt nule deoarece bobinele nu sunt cuplate magnetic.

Matricea fundamentală a buclelor B se obține după regula din subcapitolul 4.2.2 (rel.4.1); coloanele ei sunt ordonate în ordinea crescătoare a laturilor, iar liniile, în ordinea crescătoare a corzilor. Identificând matricea astfel obținută cu sectorizarea din rel.(4.11), se obțin următoarele submatrici topologice:

$$-F'_{11} = [0]_{1 \times 3}; \quad -F'_{21} = [-1 \ 0 \ -1]; \quad -F'_{31} = [0]_{1 \times 7}; \quad -F'_{41} = [0]_{1 \times 2};$$

$$-F'_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad -F'_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix};$$

$$-F'_{32} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad -F'_{42} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$-F'_{13} = [0]_{1 \times 3}; \quad -F'_{23} = [0 \ 1 \ -1];$$

$$-F'_{33} = [0]_{1 \times 7}; \quad -F'_{14} = [0]_{3 \times 3}; \quad -F'_{24} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Urmează acum calculul matricilor  $M$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $B_1$  care intervin în sistemul (4.13), respectiv transformarea la forma (4.14), obținându-se în final sistemul:

$$\frac{du_4}{dt} = (9.14 \cdot i_{17} + 4.59 \cdot i_{18} - 4.59 \cdot i_{19} + 4.59 \cdot i_{20}) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{du_5}{dt} = (-1.15 \cdot u_5 + 1.15 \cdot u_6 - 4.59 \cdot i_{17} - 9.17 \cdot i_{18} - 4.59 \cdot i_{20} + 4.59 \cdot i_{21}) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{du_6}{dt} = (0.34 \cdot u_5 - 0.34 \cdot u_6 - 4.59 \cdot i_{17} - 4.59 \cdot i_{18} - 1.34 \cdot i_{19} - 5.93 \cdot i_{20} - 1.34 \cdot i_{21}) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{di_{17}}{dt} = (-10^{-3} \cdot u_4 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot u_5 - 10^{-4} \cdot i_{17}) \cdot 10^5 + (-10^{-3} \cdot u_1 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot u_2 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot u_3) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{di_{18}}{dt} = (5 \cdot 10^{-4} \cdot u_4 + 10^{-3} \cdot u_5 - 10^{-4} \cdot i_{18}) \cdot 10^5 + (5 \cdot 10^{-4} \cdot u_1 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot u_2 - 10^{-3} \cdot u_3) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{di_{19}}{dt} = (10^{-4} \cdot u_4 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot i_{19} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot i_{20} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot i_{21}) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{di_{20}}{dt} = (3 \cdot 10^{-4} \cdot i_{19} - 6 \cdot 10^{-4} \cdot i_{20} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot i_{21}) \cdot 10^5 ;$$

$$\frac{di_{21}}{dt} = (-10^{-4} \cdot u_5 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot i_{19} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot i_{20} - 6 \cdot 10^{-4} \cdot i_{21}) \cdot 10^5 .$$

Rezolvarea acestui sistem de opt ecuații diferențiale liniare, de ordinul întâi, se poate face, de exemplu, în MATLAB, care are subprogramul ODE23 pentru rezolvarea (prin metoda Runge-Kutta) a acestui tip de ecuații.

În exemplul considerat, rezistorul  $R_{22}$  simulează rezistența de trecere la locul unde apare o punere la pământ accidentală a uneia din fazele liniei. Solverul ODE23 cere, așa cum este și normal, condițiile inițiale, adică valorile celor opt variabile de stare în momentul apariției defectului. Pentru obținerea acestor condiții inițiale se atribuie rezistenței  $R_{22}$  o valoare arbitrară dar suficient de mare pentru a putea neglija curentul prin ea; aceasta ar corespunde regimului normal, anterior punerii la pământ. Se recalculează matricile elementare în care apare  $R_{22}$ , adică  $R_A$  și  $G_A$ , apoi  $R$  și  $G$  și în final, matricile  $A$  și  $B$ . Sistemul de ecuații de stare astfel obținut, se integrează în condiții inițiale nule, pe un interval de timp suficient de lung pentru a putea considera că circuitul ajunge în regim permanent. Valorile variabilelor de stare obținute la sfârșitul acestui interval vor deveni condiții inițiale pentru următorul interval de timp, declanșat de apariția defectului, respectiv cu valoarea redusă a lui  $R_{22}$ .

Principalul neajuns al acestei metode constă în aceea că orice variantă analizată presupune scrierea manuală a ecuațiilor de stare ceea ce conduce la creșterea apreciabilă a datelor de intrare și a timpului necesar introducerii acestora.

### 4.3. Metoda analizei nodale

#### 4.3.1. Formularea ecuațiilor nodale

Pentru simplificarea expunerii metodei ne vom referi pentru început la rețelele liniare de curent continuu. Este avantajos să considerăm fiecare latură "k" a grafului ca fiind o latură compusă dintr-un element dipolar  $b_k$  și o sursă independentă de curent  $I_{sk}$ :

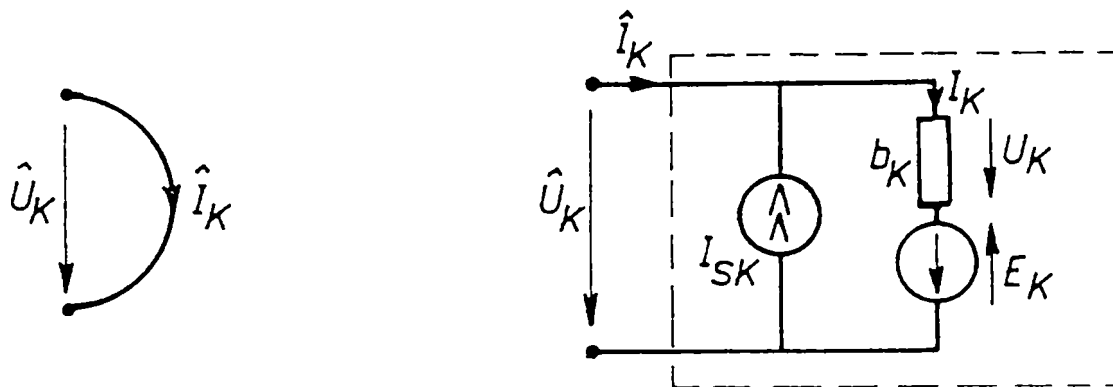


Fig.4.3 Elementele ce compun laturile dipolare

Elementul dipolar  $b_k$  poate fi o rezistență liniară sau o sursă de curent comandată în tensiune. Desigur, în particular, nu trebuie ca toate aceste trei elemente care compun latura să fie nenule.

Fie o rețea având l laturi compuse, numerotate consecutiv de la 1 la l, și n+1 noduri, numerotate consecutiv de la 0 la n. Nodul 0, ales arbitrar, va fi nodul de referință pentru potențiale, deci  $V_0=0$ .

Fie [20]

$$[\hat{U}] = [\hat{U}_1, \hat{U}_2, \dots, \hat{U}_l], [U] = [U_1, U_2, \dots, U_l], [E] = [E_1, E_2, \dots, E_l]; \quad (4.15)$$

$$[\hat{I}] = [\hat{I}_1, \hat{I}_2, \dots, \hat{I}_l], [I] = [I_1, I_2, \dots, I_l], [I_s] = [I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sl}]$$

matricile coloană ("vectorii") tensiunilor, respectiv curenților laturilor compuse.

Conform figurii precedente, avem

$$[\hat{U}] = [U] - [E], \quad (4.16)$$

$$[\hat{I}] = [I] - [I_s]. \quad (4.17)$$

Prima teoremă a lui Kirchhoff, scrisă pentru cele  $n$  noduri (s-a exclus nodul de referință) este:

$$[A] \left[ \hat{I} \right] = 0, \quad (4.18)$$

unde  $[A] = [a_{ij}]_{n \times l}$  este *matrice redusă de incidență*, ale cărei elemente se obțin după regula:

$a_{ij} = 1$       dacă latura  $j$  este incidentă nodului  $i$  și are sensul dinspre nod,

$a_{ij} = -1$      dacă latura  $j$  este incidentă nodului  $i$  dar are sensul spre nod,

$a_{ij} = 0$       dacă latura  $j$  nu este incidentă nodului.

Înlocuind (4.17) în (4.18) obținem

$$[A][I] = [A][I_S]. \quad (4.19)$$

Să presupunem că elementul dipolar  $b_k$  este un rezistor liniar, cu relația constitutivă

$$I_k = \frac{1}{R_k} U_k = G_k U_k.$$

Atunci, pentru cele  $l$  laturi compuse, putem scrie

$$[I] = [G][U], \quad (4.20)$$

unde  $[G] = [g_{ij}]_{l \times l}$  reprezintă *matricea conductanțelor laturilor*, având elementele

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ , & \text{dacă} \\ 1/R_k = G_k & i = j \end{cases}$$

Înlocuind (4.20) în (4.19) obținem

$$[A][G][U] = [A][I_S].$$

Înlocuind aici  $[U]$  din relația (4.16), obținem

$$[A][G] \left[ \hat{U} \right] = [A][I_S] - [G][E]. \quad (4.21)$$

Se demonstrează [20] că

$$\left[ \hat{U} \right] = [A]^t [V], \quad (4.22)$$

unde  $[V] = [V_1, V_2, \dots, V_n]^t$

este vectorul potențialelor celor  $n$  noduri. Cu (4.22), relația (4.21) devine

$$[A][G][A]^t [V] = [A][I_S] - [G][E].$$

Cu notațiile

$$[G_n] = [A][G][A]^T, \quad (4.23)$$

$$[I_{sn}] = [A]([I_s] - [G][E]), \quad (4.24)$$

unde  $[G_n]$  se numește *matricea conductanțelor nodurilor*, iar  $[I_{sn}]$ , *vectorul surselor de curent nodale echivalente*, obținem în final

$$[G_n][V] = [I_{sn}] \quad (4.25)$$

După rezolvarea sistemului algebric (4.25) în raport cu necunoscutele  $[V]$ , din (4.22) se obține  $[\hat{U}]$ , din (4.16) rezultă  $[U]$ , iar din (4.20),  $[I]$ . Ecuația matricială (4.25), care determină, după cum am văzut, în mod univoc tensiunile și curenții din rețea, se numește *ecuație nodală*, sau *ecuația potențialelor nodurilor*.

În cazul unei rețele mari, cu un număr mare de noduri, este necesară rezolvarea numerică a ecuației nodale. Pentru aceasta sunt disponibili o gamă largă de algoritmi numerici, cel mai răspândit având la bază metoda eliminării Gauss.

Numărul de ecuații conținut în ecuația (4.25) este cu o unitate mai mic decât numărul de noduri al rețelei. De cele mai multe ori o rețea are mai puține noduri decât laturi, astfel că metoda nodală este mai economică, sub aspectul numărului de ecuații, decât metoda clasică bazată pe scrierea celor două teoreme ale lui Kirchhoff.

Eficiența metodei nodale este condiționată, pe de-o parte, de ușurința construirii matricilor  $[G_n]$  și  $[I_{sn}]$ , iar pe de altă parte, de modul în care metoda poate fi extinsă pentru a include și regimul sinusoidal, respectiv regimul general variabil. Fără a intra în detalii tehnice, implementarea metodei pe calculatoarele numerice nu face uz de rel. (4.23), (4.24), ci de algoritmi bazați pe tehnica matricilor rare, care recurg la calculul elementelor matricilor  $[G_n]$  și  $[I_{sn}]$  doar în faza în care este nevoie de acestea. Se face astfel o economie substanțială de timp de calcul. Extinderea metodei analizei nodale pentru circuite în regim sinusoidal permanent este directă, pe baza analogiei formale între ecuațiile unui circuit de curent continuu și cele ale unui circuit de curent alternativ, scrise însă în complex.

### 4.3.2. Adaptarea metodei analizei nodale pentru regimul variabil

Analiza numerică a circuitelor în regim variabil se face împărțind intervalul de timp pe care are loc analiza în subintervale, de lungime  $h = t_{k+1} - t_k$ , unde  $t_k, t_{k+1}$  sunt două momente

successive; pe fiecare subinterval se pot înlocui condensatoarele și bobinele prin schemele echivalente din figura de mai jos [20, 121, 122].

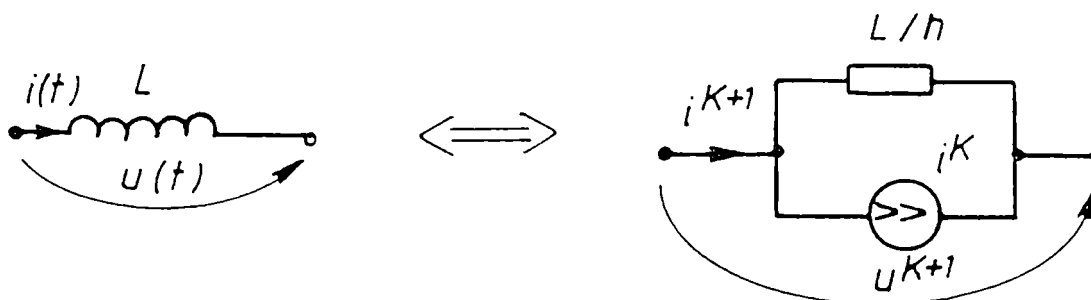


Fig.4.4.Schema echivalentă unui condensator

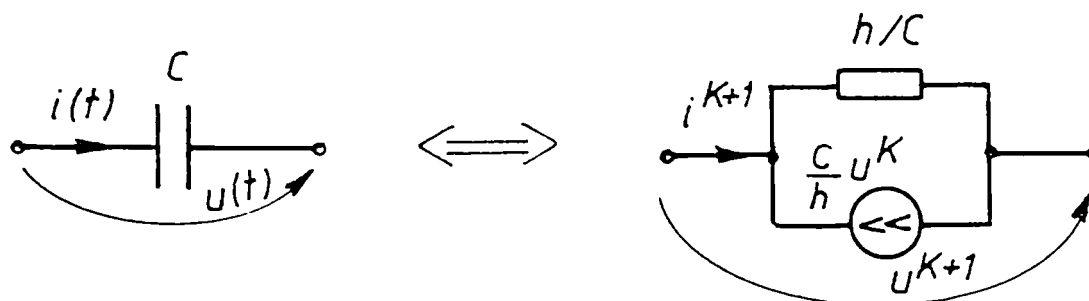


Fig. 4.5. Schema echivalentă unei bobine

Algoritmul de analiză a circuitelor în regim variabil prin metoda nodală are deci următorii pași:

1. Se înlocuiesc condensatoarele prin întreruperi, bobinele prin scurtcircuite, iar surselor li se atribuie valorile corespunzătoare momentului  $t=0$ ; circuitul care se obține la acest moment ( $t=0$ ) este deci un circuit rezistiv de curent continuu, pentru rezolvarea căruia aplicăm metoda nodală
2. Se alege un pas temporal  $h$ ; se calculează noile valori ale surselor, corespunzând momentului  $t' = t + h$ ; se înlocuiesc condensatoarele și bobinele prin schemele lor echivalente, sursele de curent echivalente care intervin în aceste scheme fiind calculate cu tensiunile și curenții determinați la pasul anterior. Acesta este din nou un circuit rezistiv, de curent continuu, pentru rezolvarea căruia se aplică din nou metoda analizei nodale.
3. Se compară valoarea lui  $t$  cu valoarea finală a intervalului de analiză  $t_f$ . Dacă  $t > t_f$ , simularea s-a terminat. În caz contrar, se reia din nou pasul 2 ș.a.m.d.  
În mod evident, această procedură este convenabilă numai dacă este inclusă într-un program de analiză asistată de calculator a circuitelor electrice.



### 4.3.3. Programul PSpice de analiză a circuitelor electrice

Programul PSpice este versiunea pentru PC-uri a unui program de analiză asistată de calculator a circuitelor electrice (SPICE), dezvoltat în anii '70 la Universitatea din California, Berkeley [123]. În momentul de față este cel mai răspândit și popular program de simulare numerică a circuitelor electrice, atât în mediul industrial cât și în cel universitar. El are la bază metoda analizei nodale [20], prezentată în subcapitolele 4.3.1., 4.3.2. Rezolvarea ecuației matriciale (4.25) are loc prin algoritmi specializați, foarte performanți. La analiza în regim dinamic, pașii de discretizare  $h$  sunt variabili, mai mici când potențialele variază rapid în timp, respectiv mai mari în caz contrar. Aceasta duce la o reducere sensibilă a timpului de calcul.

Tipurile elementelor de circuit, care sunt implementate în program, sunt în număr destul de mare. În versiuni mai vechi, este necesară scrierea unei "liste de componente" și a unei liste de comenzi. În versiunile mai noi, scrierea listei de componente este înlocuită prin desenarea, cu ajutorul unui program din grupul de programe PSpice, a schemei circuitului. Programul de simulare PSpice conține și un "osciloscop soft", care permite reprezentarea grafică a mărimilor calculate sau a unora exprimate cu ajutorul acestora. Datorită facilităților de care dispune acest simulator, a calităților și performanțelor de rezolvare și nu în ultimul rând datorită faptului că autorul dispune de acest simulator, analiza regimurilor tranzitorii a fost efectuată, cu bune rezultate, folosind simulatorul PSpice. Principalul avantaj al acestui mod de simulare constă în aceea că analiza altor variante nu implică decât schimbarea valorilor unor parametrii din schemele simulate, ceea ce se face cu mare ușurință și într-un timp scurt.

### 4.3.4. Analiza PSpice a simplelor puneri la pământ în rețele de medie tensiune

Rețeaua de medie tensiune al cărei comportament dinamic la o simplă punere la pământ dorim să o analizăm, este reprezentată schematic în figura 4.6., care permite simularea tuturor soluțiilor de tratare a neutrului, inclusiv a variantei propuse de autor.

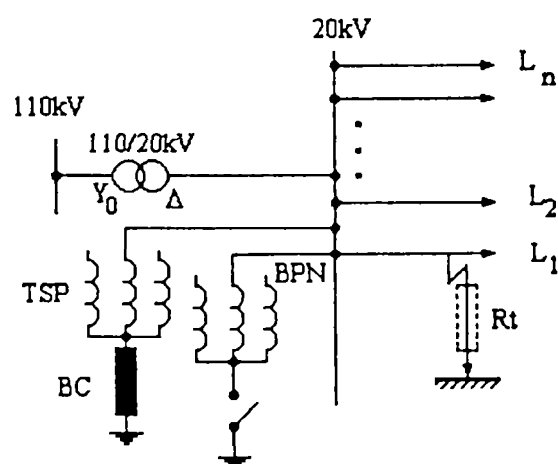


Fig. 4.6. Schema de principiu al rețelei de medie tensiune

Modelul de circuit cu care a fost echivalată rețeaua [98, 106], și care conține datele de intrare în simulatorul PSpice, este reprezentat în fig.4.7.

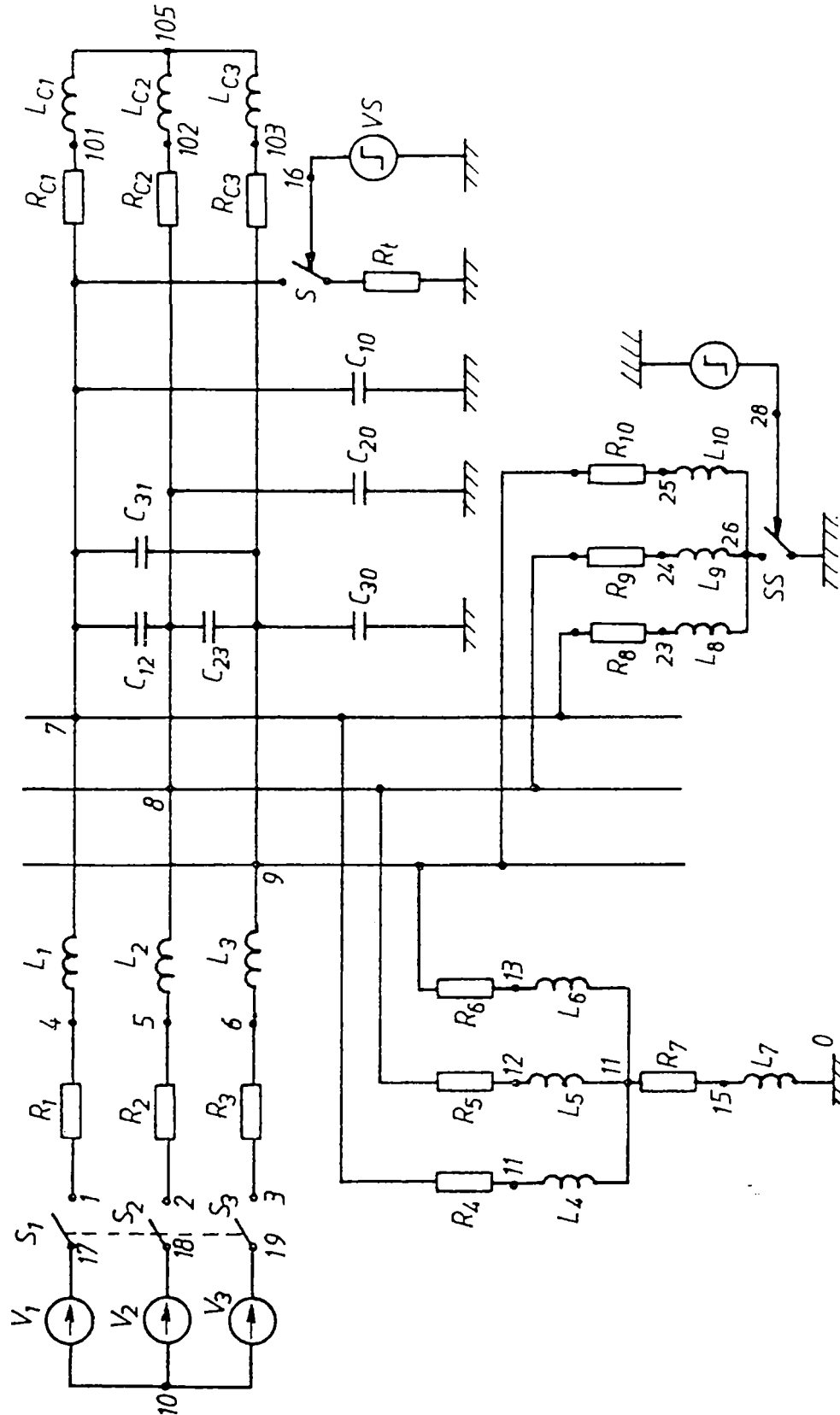


Fig. 4.7. Schema prin care s-a modelat rețeaua de medie tensiune

Elementele de circuit  $V_1, V_2, V_3, R_1, R_2, R_3, L_1, L_2, L_3$  simulează transformatorul de 16 MVA; condensatoarele  $C_{10}, C_{20}, C_{30}$  țin cont de capacitățile față de pământ ale liniei  $C_{12}, C_{23}, C_{31}$  țin cont de capacitățile dintre conductoarele de fază,  $R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}, L_{C1}, L_{C2}, L_{C3}$  simulează un consumator echivalent alimentat din stația de transformare;  $R_4, R_5, R_6, L_4, L_5, L_6$  reprezintă parametrii transformatorului de servicii proprii,  $R_7, L_7$  reprezintă parametrii bobinei de

compensare.  $R_8, R_9, R_{10}, L_8, L_9, L_{10}$  reprezintă parametrii bobinei de punct neutru;  $S_1, S_2, S_3$  reprezintă întrerupătorul trifazat care cuplează transformatorul la barele stației de transformare:

S reprezintă contactorul cu care se simulează punerea la pământ a unuia din conductoarele liniei; SS reprezintă contactorul cu care se pune la pământ nulul bobinei de creere a neutrului. Închiderea contactoarelor este comandată la momente precise de timp. Secvența de închidere a comutatoarelor este următoarea:

1. La momentul  $t=0$  se închid contactoarele  $S_1, S_2, S_3$ ,
2. După cca 200 ms (deci 10 perioade), timp în care regimul sistemului a devenit permanent, se închide contactorul S, simulându-se o punere la pământ a fazei respective,
3. După încă 100ms (deci 5 perioade), regimul fiind practic permanent, se închid contactorul SS.

Simulările PSpice efectuate pe modelul de rețea din figura 2 au luat în considerare următorii factori:

1. Structura rețelei prin curentul capacitiv total, controlat prin valorile capacităților  $C_{10}, C_{20}, C_{30}$ ;
2. Regimul de funcționare al rețelei, prin valorile parametrilor bobinei de compensare  $R_7, L_7$ .
3. Valoarea rezistenței de trecere la locul defectului,  $R_t$ . S-au considerat două cazuri:  $R_t=4 \Omega$ , respectiv  $20 \Omega$ . Implementarea acestor valori în simularea PSpice s-a realizat ținând cont că implementarea PSpice a contactorului S constă dintr-un rezistor căruia i se pot atribui valori arbitrare pentru cele două stări (închis, respectiv deschis); pentru starea închis s-au atribuit succesiv valorile menționate mai sus.

#### 4.3.5. Rezultate obținute prin simulare numerică PSpice

În studiul efectuat s-au considerat ca mărimi variabile următoarele: faza inițială a tensiunii în momentul apariției defectului; curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV; regimul în care funcționează rețeaua având neutrul tratat prin bobina de compensare; rezistența de trecere la locul de defect ( $R_t$ ) și modul de tratare al neutrului.

Pentru parametrii ce intervin în figura 4.7. s-au considerat valorile necesare pentru a reproduce aceste defecte în sectorul experimental realizat special în acest scop.

$$R_1 = R_2 = R_3 = 0,1 \Omega; L_1 = L_2 = L_3 = 8,6 \text{ mH};$$

$$R_4 = R_5 = R_6 = 11,1 \Omega; L_4 = L_5 = L_6 = 91 \text{ mH};$$

$$R_{c1} = R_{c2} = R_{c3} = 22,5 \Omega; L_{c1} = L_{c2} = L_{c3} = 35 \text{ mH};$$

$$R_8 = R_9 = R_{10} = 8 \Omega; L_8 = L_9 = L_{10} = 365 \text{ mH};$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{31} = 36.8 \mu\text{F};$$

$$C_{10} = C_{20} = C_{30} = 2.1 \mu\text{F}; \text{ (curent capacitiv total 23 A);}$$

$$C_{10} = C_{20} = C_{30} = 6.9 \mu\text{F}; \text{ (curent capacitiv total 75 A);}$$

Pentru curentul capacitiv total al rețelei de 23 A parametrii  $R_7$  și  $L_7$  au valorile:

$$R_7 = 5.4 \Omega; L_7 = 1.61 \text{ H (rezonanță);}$$

$$R_7 = 5.4 \Omega; L_7 = 1.44 \text{ H (supracompensat 10%);}$$

$$R_7 = 5.4 \Omega; L_7 = 1.28 \text{ H (supracompensat 20%);}$$

$$R_7 = 5.4 \Omega; L_7 = 0.799 \text{ H (supracompensat 50%);}$$

$$R_7 = 5.4 \Omega; L_7 = 1.76 \text{ H (subcompensat 10%).}$$

Când curentul capacitiv total al rețelei este 75 A valorile parametrilor  $R_7$  și  $L_7$  devin:

$$R_7 = 2.1 \Omega; L_7 = 0.49 \text{ H (rezonanță);}$$

$$R_7 = 2.1 \Omega; L_7 = 0.441 \text{ H (supracompensat 10%);}$$

$$R_7 = 2.1 \Omega; L_7 = 0.392 \text{ H (supracompensat 20%);}$$

$$R_7 = 2.1 \Omega; L_7 = 0.245 \text{ H (supracompensat 50%);}$$

$$R_7 = 2.1 \Omega; L_7 = 0.539 \text{ H (subcompensat 10%);}$$

În studiu s-au acceptat condițiile simplificatoare din literatură [11, 21, 32, 33, 59, 61] considerându-se rezistența bobinei de compensare constantă și de asemenea capacitățile dintre conductoarele liniilor.

Rezultatele obținute sunt prezentate sub formă de oscilograme.

Conectarea în paralel cu bobina de compensare a bobinei de punct neutru (BTPC) se realizează după 100 ms de la producerea simplei puneri la pământ, pentru a reproduce regimul tranzitoriu în varianta de tratare a neutrului propusă de autor.

Semnificația mărimilor din oscilograme este:

$V(7)$  – tensiunea fazei R pe care s-a considerat că are loc simpla punere la pământ;

$V(8)$  – tensiunea fazei S;

$V(9)$  – tensiunea fazei T;

$[V(7) + V(8) + V(9)]/346$  – tensiunea homopolară din secundarul filtrului homopolar;

$I(R7)$  – curentul prin bobina de compensare;

$I(R11)$  – curentul prin bobina de punct neutru (BTPC);

$I(S)$  – curentul prin faza pusă la pământ;

$I(C10) + I(C20) + I(C30)$  –curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV (cel care se întoarce prin fazele fără defect).

Deoarece în varianta de tratare a neutrului propusă de autor inițial rețeaua funcționează cu neutrul tratat prin bobină de compensare prin simularea realizată se analizează regimul

tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ atât în cazul când rețeaua are neutrul tratat prin bobină de compensare cât și în cazul când neutrul rețelei este tratat cu bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru.

În figurile 4.8 și 4.9 se prezintă oscilogramele obținute pentru cazul când curentul capacitiv al rețelei este 23 A, rezistența de trecere  $R_t = 4 \Omega$ , rețeaua cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționează în regim de rezonanță. Din aceste oscilograme rezultă că la conectarea bobinei de punct neutru (BTPC) regimul tranzitoriu este nesemnificativ. Tensiunea maximă pe durata regimului tranzitoriu este cu aproximativ 28% mai mare decât în regim stabilizat, ceea ce reprezintă 5,6 kV în plus. Deoarece rezistența de trecere la locul de defect are valoare scăzută ( $4 \Omega$ ) tensiunea homopolară nu-și schimbă practic valoarea la conectarea bobinei de punct neutru (BTPC). Se constată, de asemenea, că în curentul de defect apare un vârf de valoare extrem de ridicată, dar care se amortizează într-un timp foarte scurt. Oscilogramele obținute în aceleași condiții, dar rețeaua de medie tensiune având curentul capacitiv total 75 A sunt prezentate în fig. 4.10 și 4.11. Comparând oscilograma din fig. 4.8 cu cea din fig. 4.10 se constată o modificare nesemnificativă a variației în timp pe durata regimului tranzitoriu a tensiunii fazelor fără defect, respectiv a tensiunii homopolare. Deci variația în timp a acestor tensiuni pe durata regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ nu este influențată mult de valoarea curentului capacitiv total al rețelei de medie tensiune. În ceea ce privește însă variația în timp pe durata aceluiași regim tranzitoriu a curentului de defect și a celui capacitiv (oscilogramele din fig. 4.9, respectiv 4.11) se constată modificarea constantelor de timp și a amplitudinii oscilațiilor amortizate, valoarea maximă a acestor curenți nedepinzând practic de valoarea curentului capacitiv total al rețelei de medie tensiune. Pentru curentul capacitiv total al rețelei de 23 A frecvența oscilațiilor amortizate (fig.4.9) este de aproximativ 620 Hz, iar dacă valoarea curentului capacitiv total al rețelei este 75 A, aceeași frecvență devine 460 Hz. Amplitudinea oscilațiilor amortizate, a curentului de defect, în prima perioadă, este practic dublă atunci când curentul capacitiv total al rețelei de medie tensiune este 75 A, comparativ cu cazul în care acest curent este 23 A. Regimul tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ netă, curentul capacitiv total fiind 75 A s-a reprodus și în sectorul experimental realizat în stația de transformare 110 kV/20 kV I.U.M. – Tg.Jiu, iar rezultatele obținute sunt prezentate în Anexa 3 oscilograma nr.4. În această oscilogramă componenta aperiodică este mai mică decât cea obținută prin simulare numerică.

Rezultatul se justifică prin faptul că faza inițială a tensiunii în momentul provocării defectului a fost aproximativ  $45^\circ$ , iar în simularea numerică faza inițială a tensiunii s-a ales  $90^\circ$ .

În simularea numerică s-a ales faza inițială a tensiunii  $90^\circ$  pentru a determina valoarea maximă a componentei aperiodice ce intervine în regimul tranzitoriu analizat.

Pentru a constata modul în care regimul de funcționare a rețelei de medie tensiune având neutrul tratat prin bobină de compensare, influențează regimul tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ, s-a simulat numeric cazul în care curentul capacitiv total al rețelei este 23 A și rețeaua funcționează în regim de supracompensare 50%. Rezultatele obținute sunt prezentate în oscilogramele din fig. 4.12 și 4.13. Comparând oscilograma din fig. 4.8. cu cea din fig. 4.12. se constată modificări ne semnificative, deci se poate aprecia că evoluția în timp a tensiunilor de fază și a celei homopolare pe durata regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ, dacă rețeaua are neutrul tratat prin bobină de compensare nu este influențată de regimul în care funcționează rețeaua de medie tensiune. Curentul capacitiv pe durata unei simple puneri la pământ de asemenea, nu este influențat de regimul în care funcționează rețeaua (fig. 4.9 și 4.13).

Datorită regimului de supracompensare curentul de defect atinge valori mai ridicate (fig.4.13) comparativ cu cazul când rețeaua funcționează în regim de rezonanță. Atunci când rețeaua funcționează în regim de supracompensare, pe durata defectului și curentul prin bobina de compensare are valori mai ridicate decât atunci când aceasta funcționează la rezonanță (fig.4.9 comparativ cu fig. 4.13). Analiza modului în care soluția aleasă pentru tratarea neutrului influențează regimul tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ, impune simularea numerică a tuturor variantelor păstrându-se aceleași caracteristici pentru rețeaua de medie tensiune. Oscilogramele obținute pentru cazul în care curentul capacitiv total al rețelei de medie tensiune este 23 A și neutrul rețelei este izolat sunt prezentate în fig.4.14 și 4.15. Din oscilograma prezentată în fig. 4.14 se constată o supratensiune pe faza T, (defectul fiind pe faza R) de 48% din tensiunea fazei respective atunci când regimul tranzitoriu s-a stabilizat. Dacă se ia ca termen de comparație tensiunea fazei din regim normal de funcționare, supratensiunea ce apare în regim tranzitoriu este de 150%. Din oscilograma prezentată în fig.4.15 rezultă că în acest caz constanta de timp este mai mare astfel că după aproximativ 33 ms se anulează componenta aperiodică comparativ cu cazul în care neutrul rețelei este tratat cu bobină de compensare, când amortizarea componentei aperiodice se produce în aproximativ 11 ms. Acest defect a fost reprodus și în sectorul experimental realizat în stația de transformare 110 kV/20 kV I.U.M. – Tg.Jiu, iar oscilograma obținută este prezentată în Anexa 3 pagina 6. Din această oscilogramă se constată că tensiunea fazei pe care s-a provocat simpla punere la pământ (faza T, respectiv curba 5 din oscilogramă) nu scade brusc la zero ca în cazul simulării numerice. Din acest motiv regimul tranzitoriu pe fazele fără defect este mai puțin pronunțat decât în cazul simulării numerice. În ceea ce privește curentul de defect (curba 1 din oscilogramă) se constată existența unei valori foarte mari în momentul apariției defectului, (rezultat obținut și prin

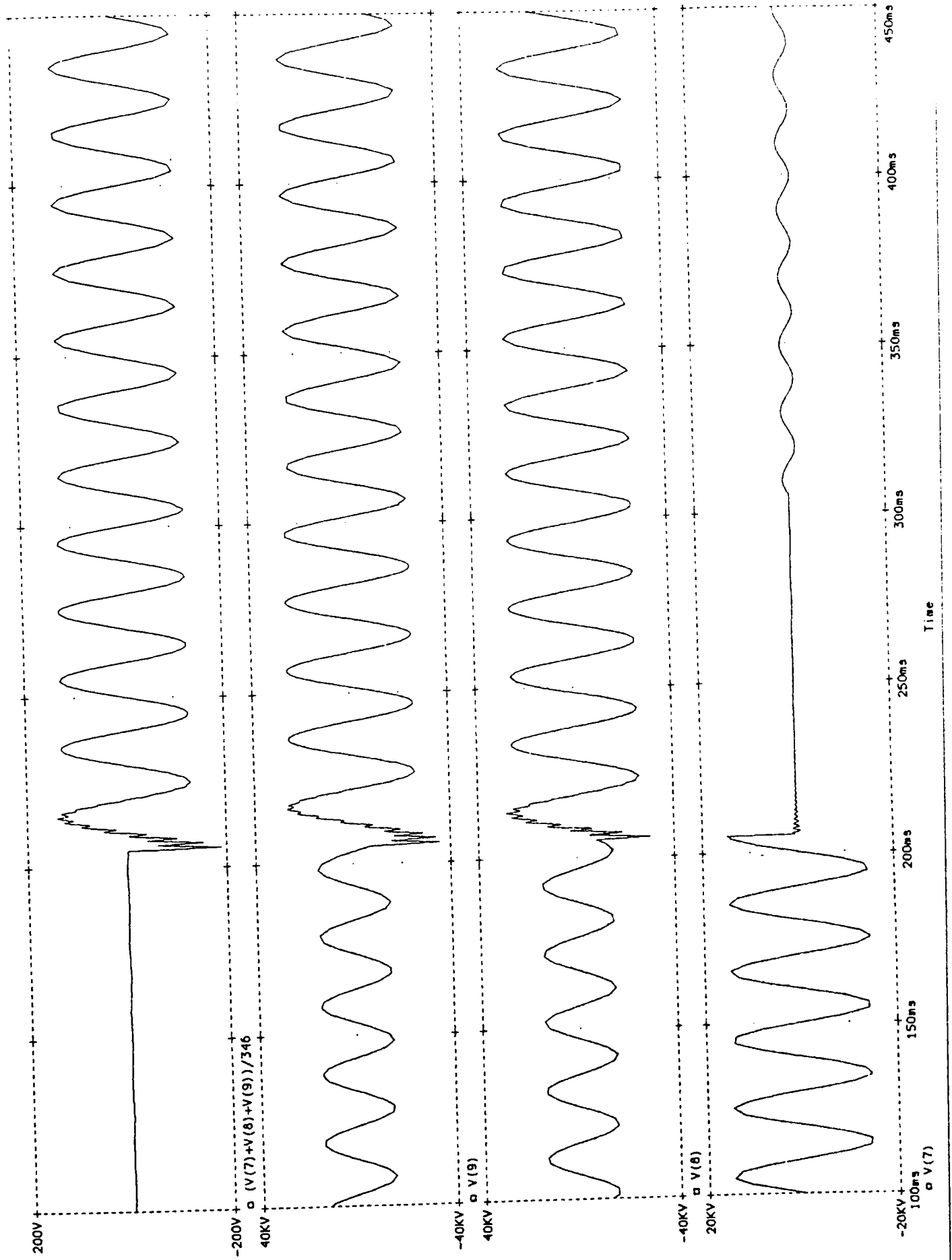
simulare numerică), care se amortizează rapid. Componenta aperiodică în acest caz se amortizează în aproximativ 120 ms. Acest rezultat poate fi justificat și prin faptul că variația curentului de defect s-a înregistrat în secundarul transformatorului de curent.

În fig. 4.16 și 4.17 sunt prezentate oscilogramele obținute în cazul simulării numerice a unei simple puneri la pământ atunci când neutrul rețelei este tratat prin rezistor. Din oscilograma prezentată în fig. 4.16 se constată că pe durata regimului tranzitoriu apare o supratensiune pe faza T (defectul are loc pe faza R) de 26% din tensiunea aceleiași faze în regim stabilizat. Această valoare este cea mai scăzută comparativ cu celelalte variante de tratare a neutrului. În ceea ce privește curentul de defect, în acest caz valoarea acestuia este mult mai mare (fig. 4.17), iar componenta aperiodică se amortizează într-un interval de timp mai mic de 10 ms.

Oscilogramele obținute prin simulare numerică, atunci când are loc o simplă punere la pământ într-o rețea în care neutrul este tratat prin bobină de compensare în paralel cu un rezistor sunt prezentate în fig. 4.18 și în fig. 4.19. În acest caz regimul tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ este identic cu cel în care neutrul este tratat prin bobină de compensare, deoarece în primele 100 ms neutrul rețelei este tratat numai prin bobină de compensare. Ulterior se conectează rezistorul în paralel cu bobina de compensare, dar din fig. 4.18 și 4.19 rezultă că la această conectare practic nu există regim tranzitoriu.

$\Sigma I_c = 23 \text{ A}$   
 $R_1 = 4 \Omega$   
 REZONANTA

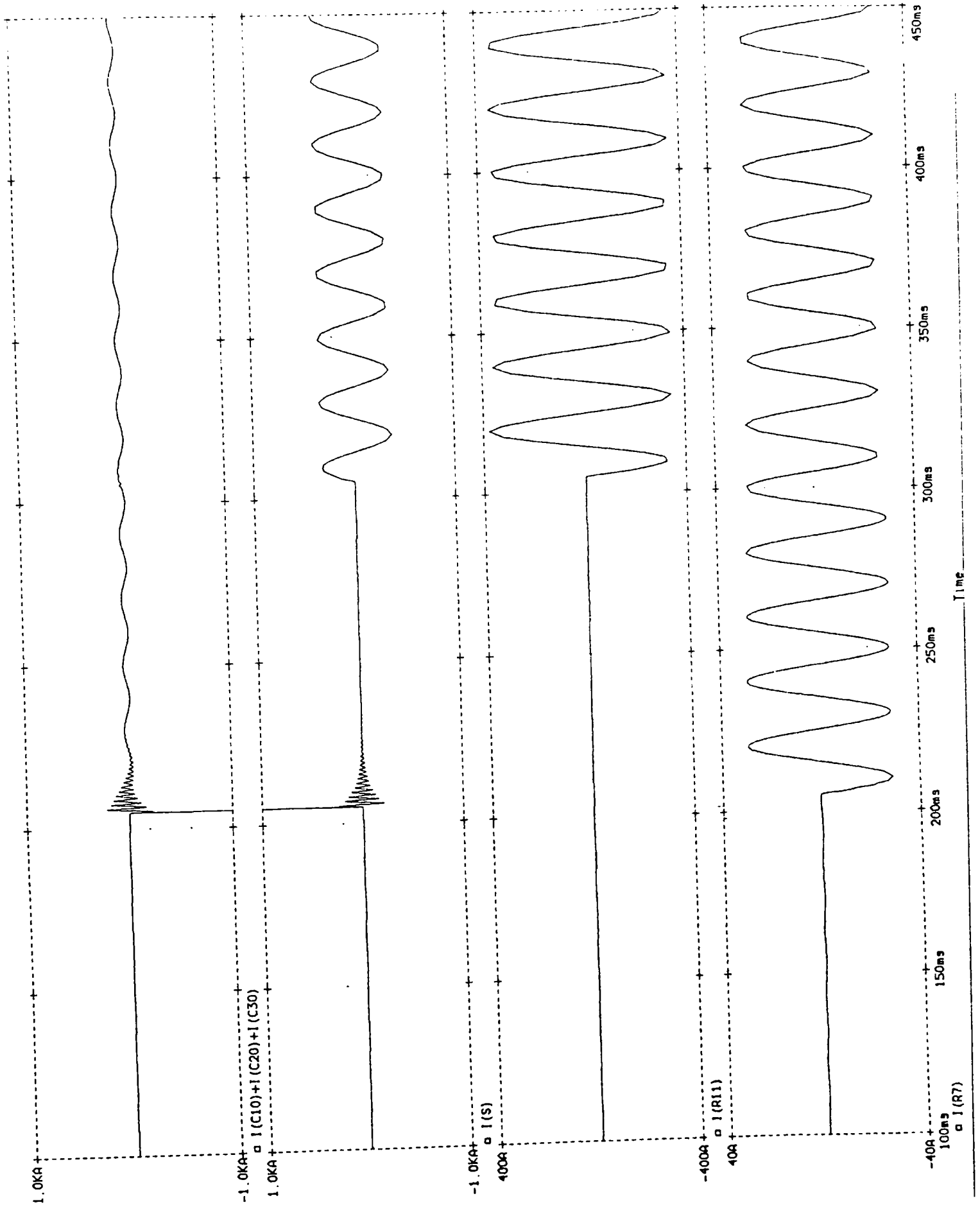
Fig. 4.8.  
 Tensiunile  $u_R$ ,  
 $u_S$ ,  $u_T$  și  $u_h$   
 (tensiunea  
 homopolara)





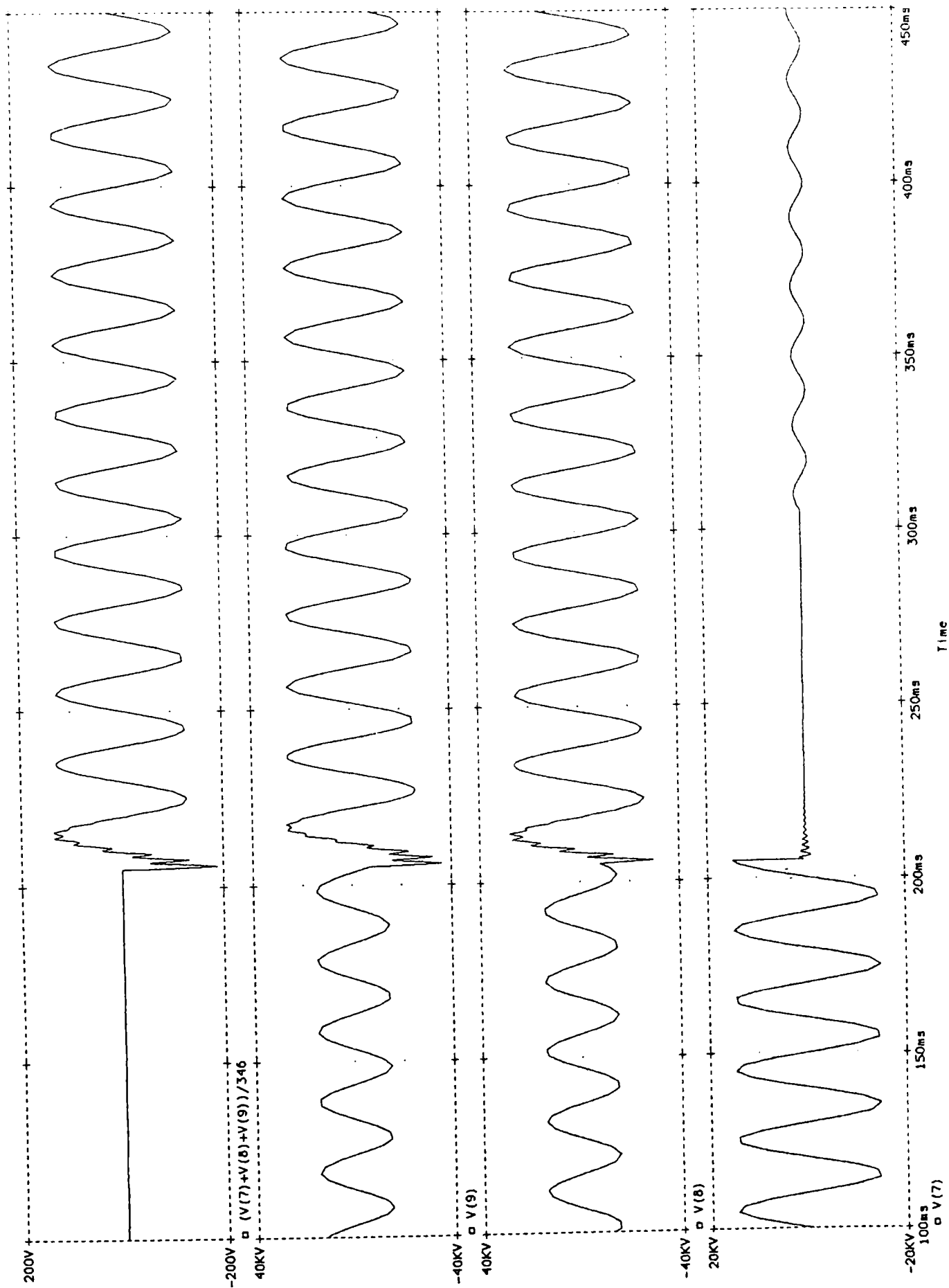
$\Sigma I_c = 23 \text{ A}$   
 $R_f = 4 \Omega$   
 REZONANTA

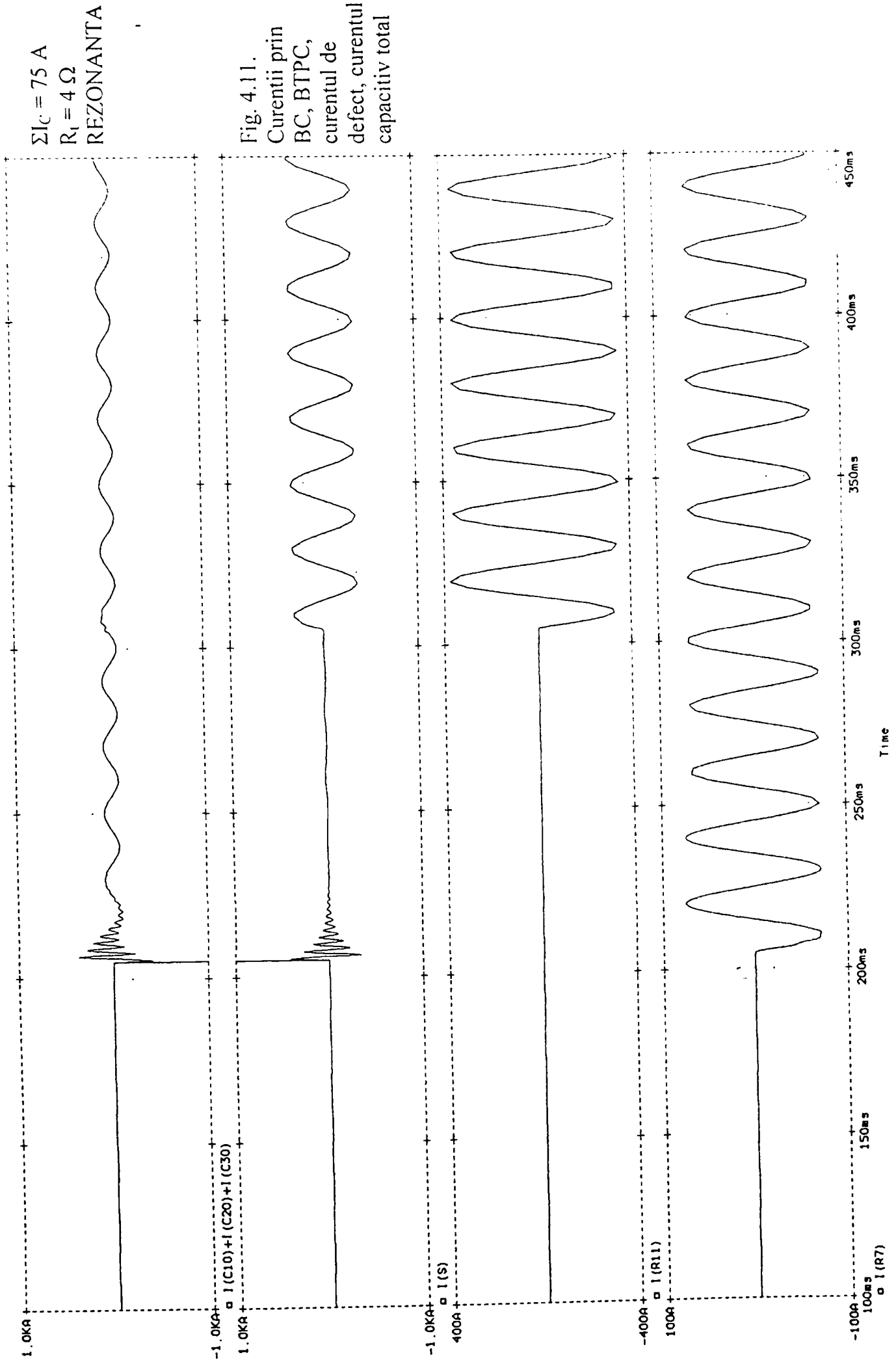
Fig. 4.9.  
 Curentii prin  
 BC, BTPC,  
 curentul de  
 defect si  
 curentul  
 capacitiv total

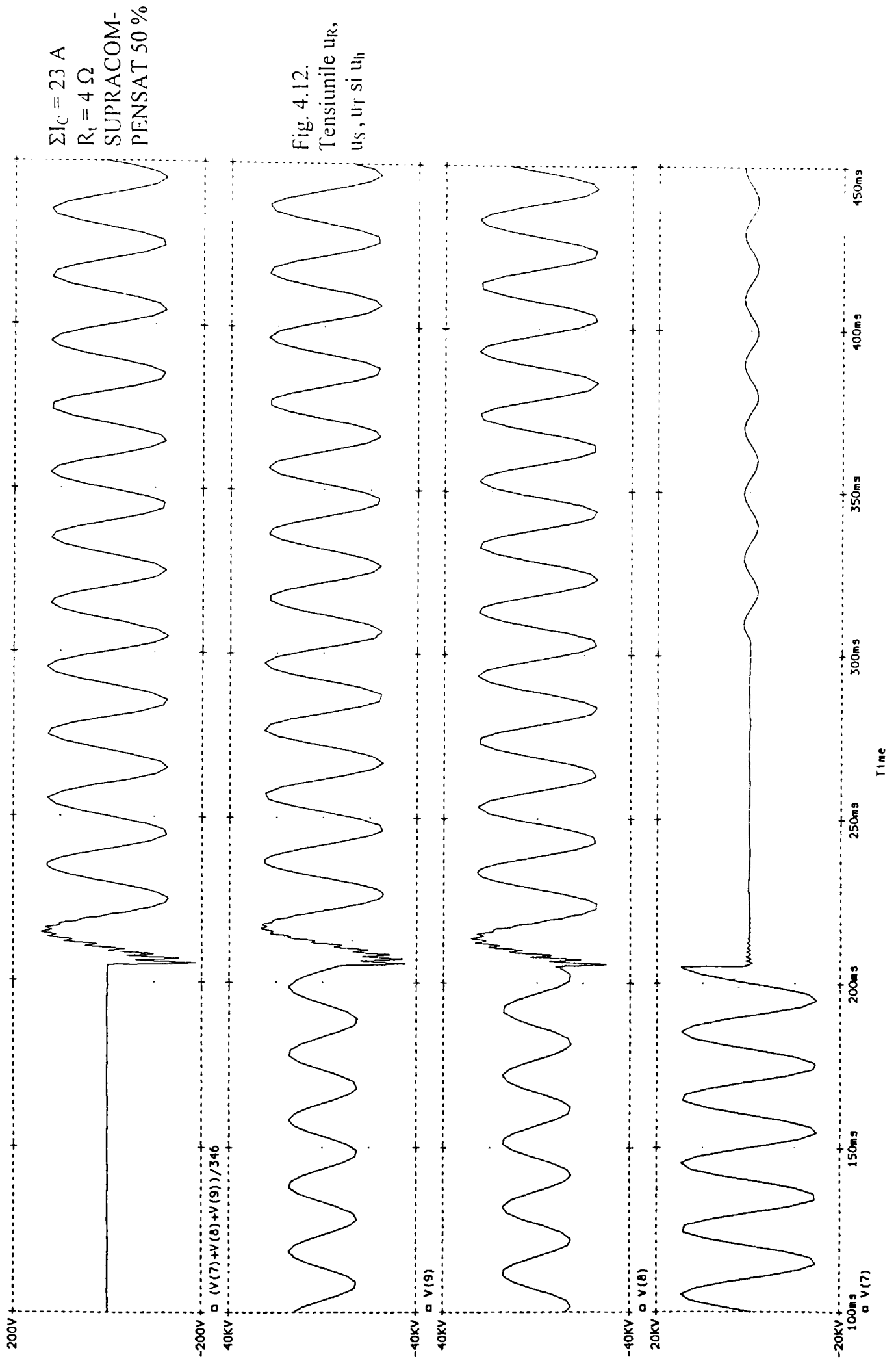


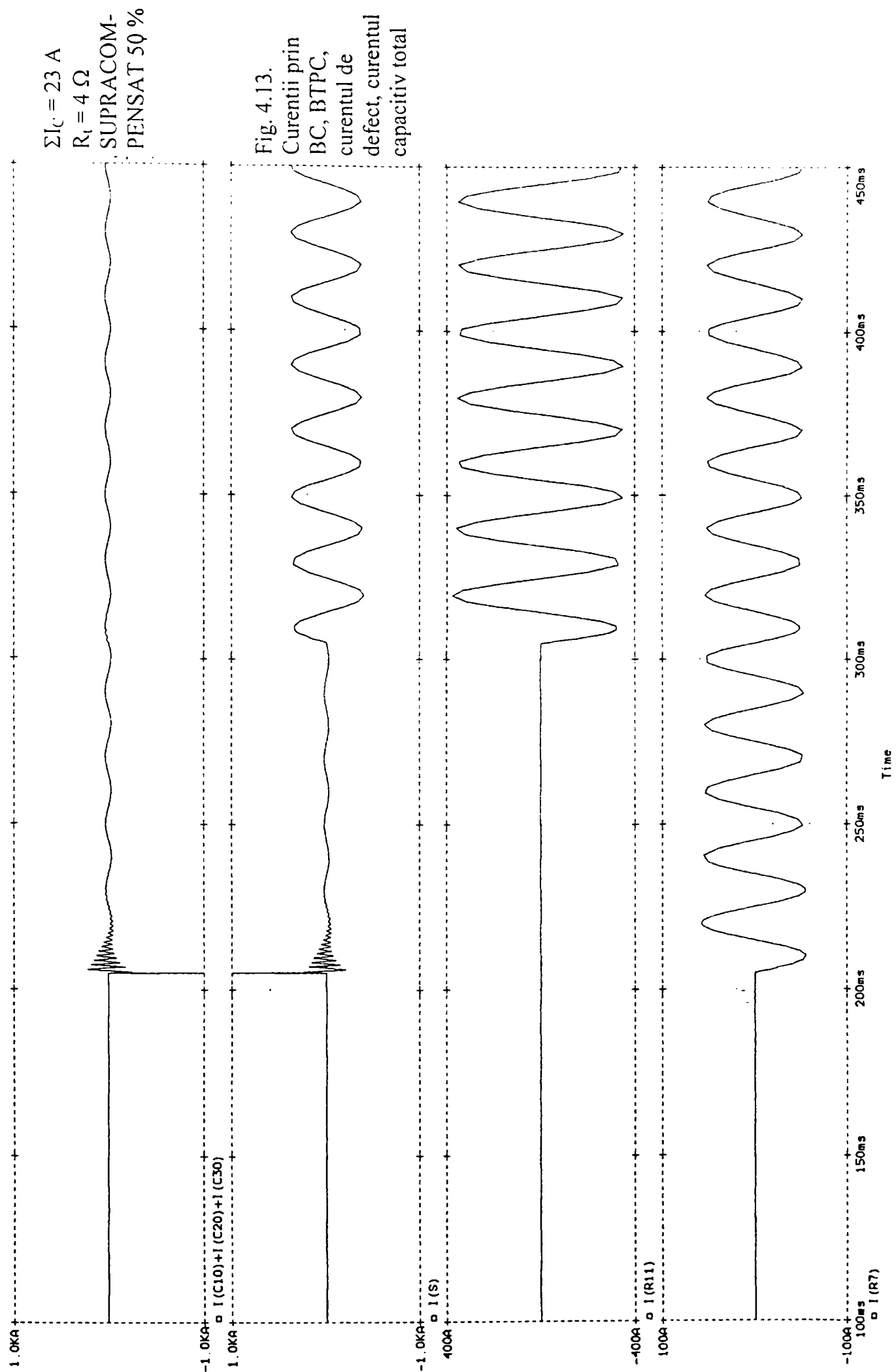
$\Sigma I_C = 75 \text{ A}$   
 $R_t = 4 \Omega$   
 REZONANTA

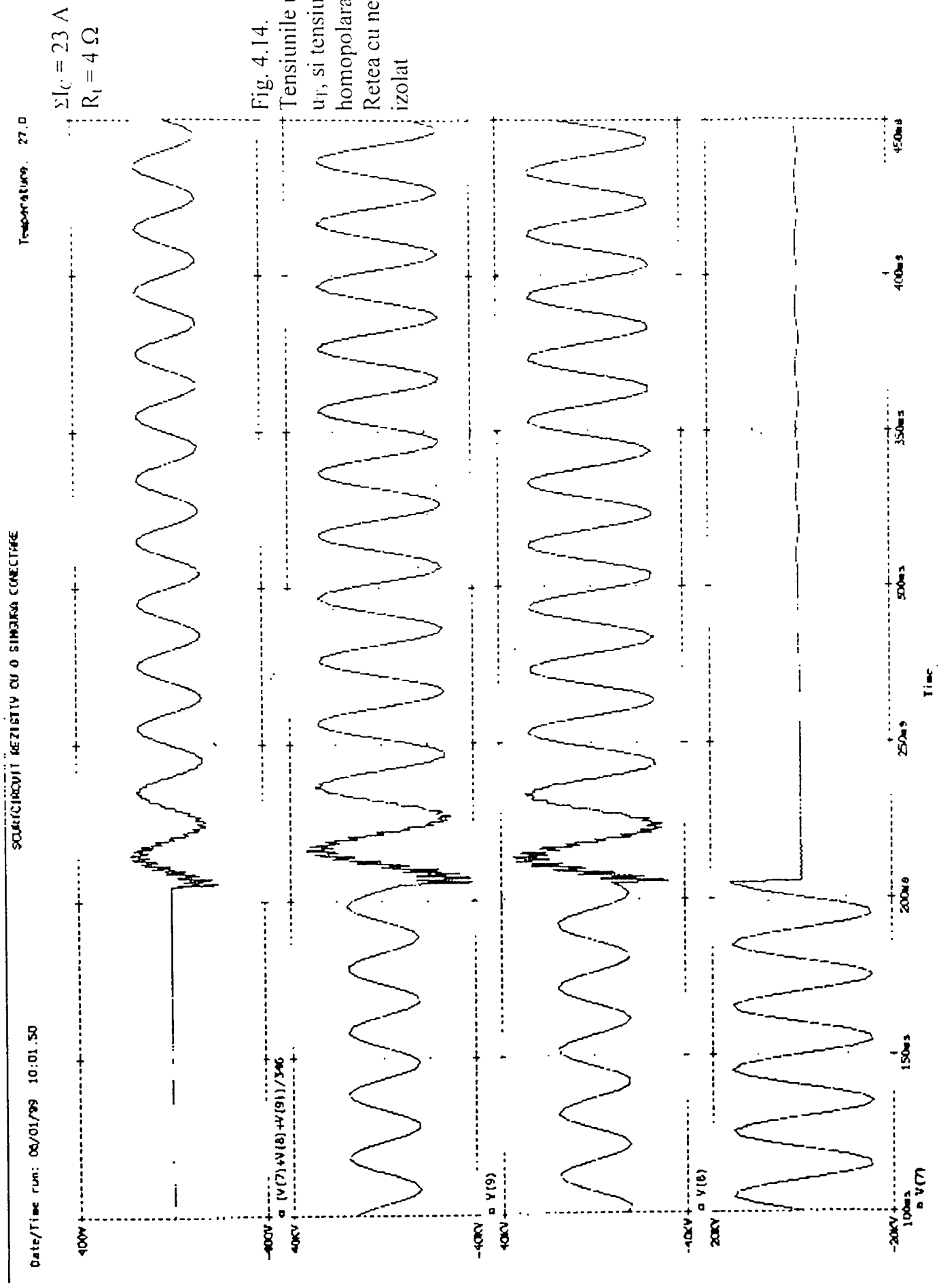
Fig. 4.10  
 Tensiunile  $u_R$ ,  
 $u_S$ ,  $u_T$  și  $u_h$











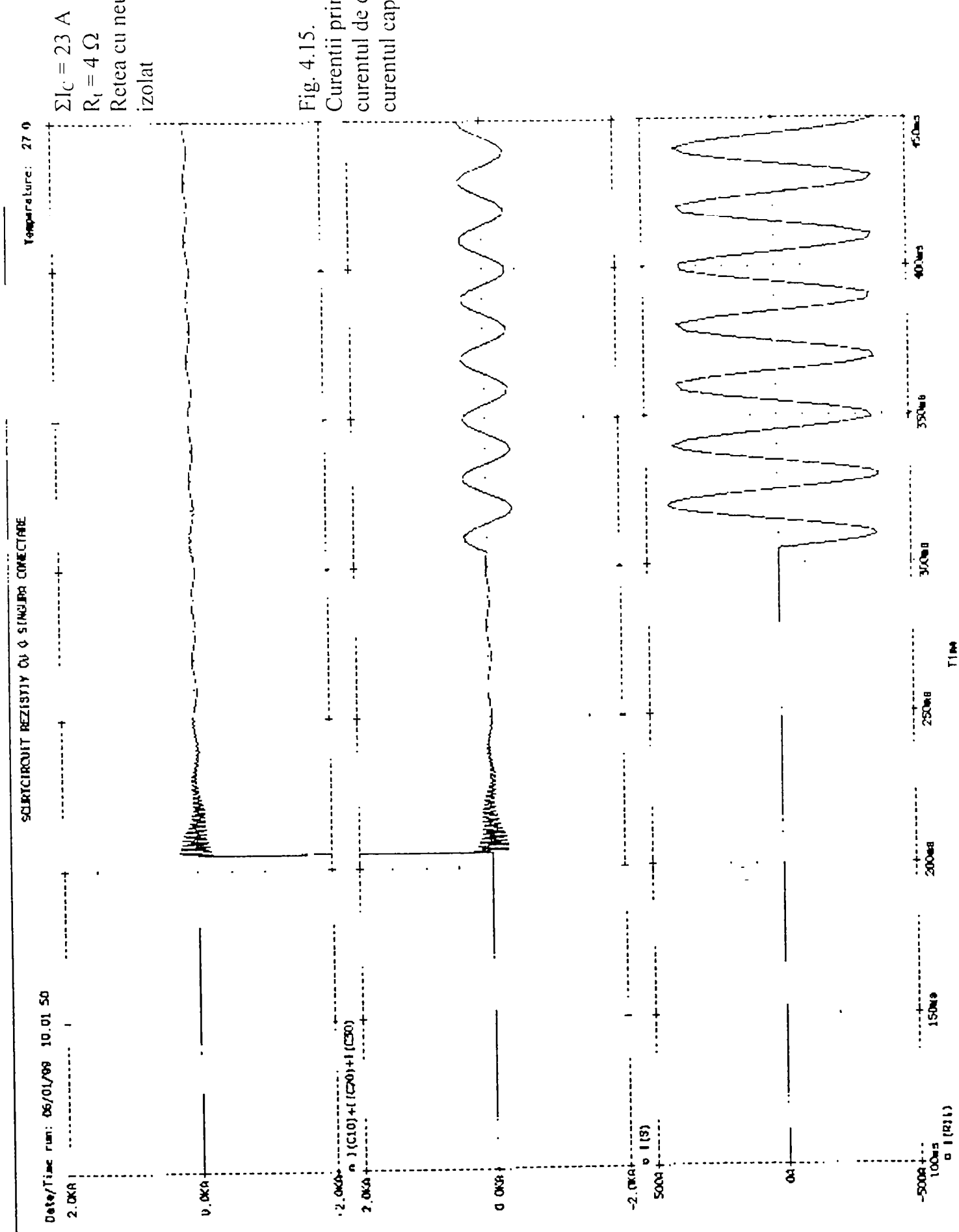


Fig. 4.15.  
 Curentii prin BTPC,  
 curentul de defect,  
 curentul capacitiv

Temperature: 27.0

$\Sigma I_C = 23 \text{ A}$

$R_1 = 4 \Omega$

Rețea cu neutrul tratat prin rezistor

SURT/CIRCUIT BEZISTIV CU O SINGURĂ CONECTARE

Date/Time run 06/01/99 10:20:22

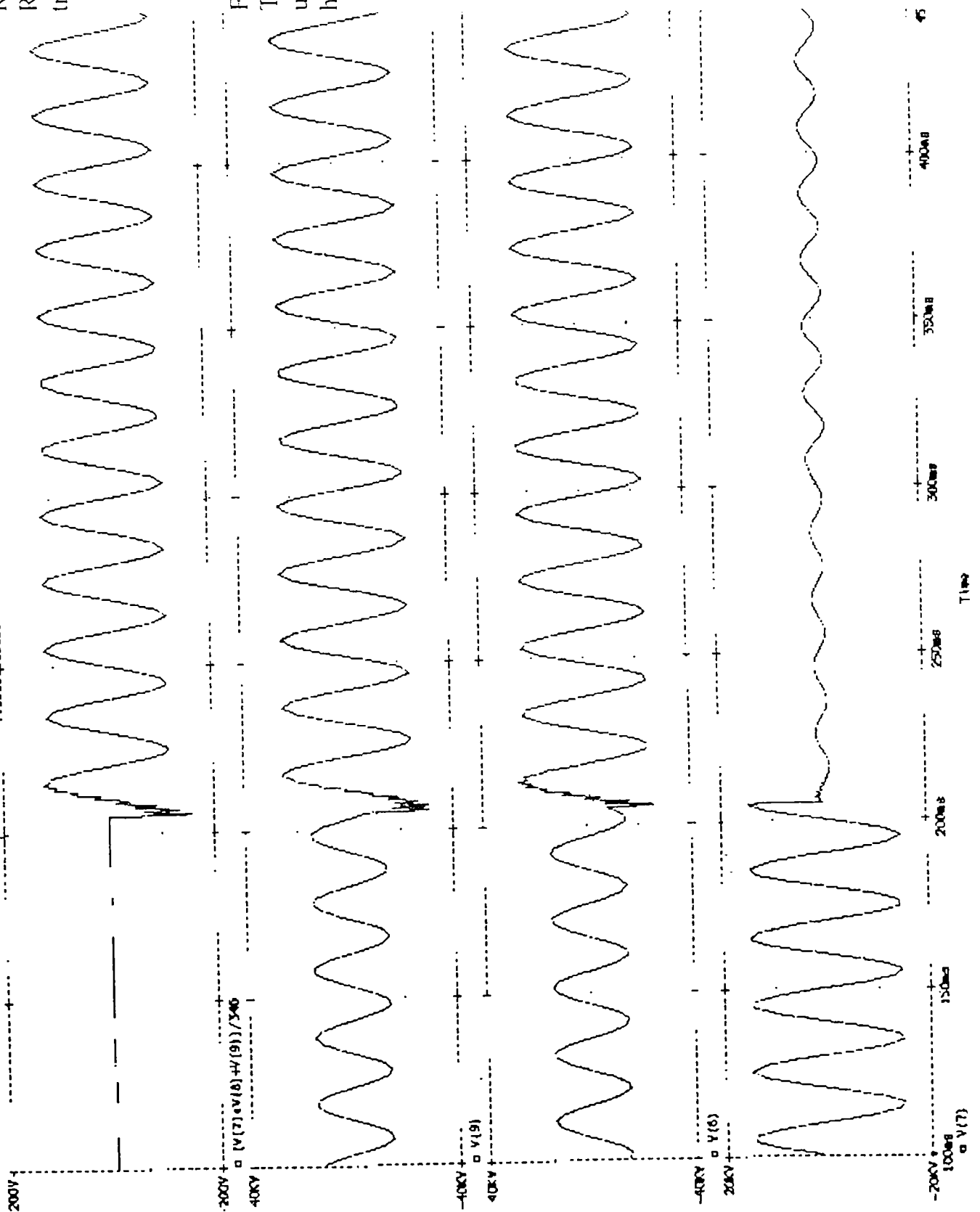


Fig. 4.16.

Tensiunile  $u_R$ ,  $u_S$ , și  $u_r$ , și tensiunea homopolara



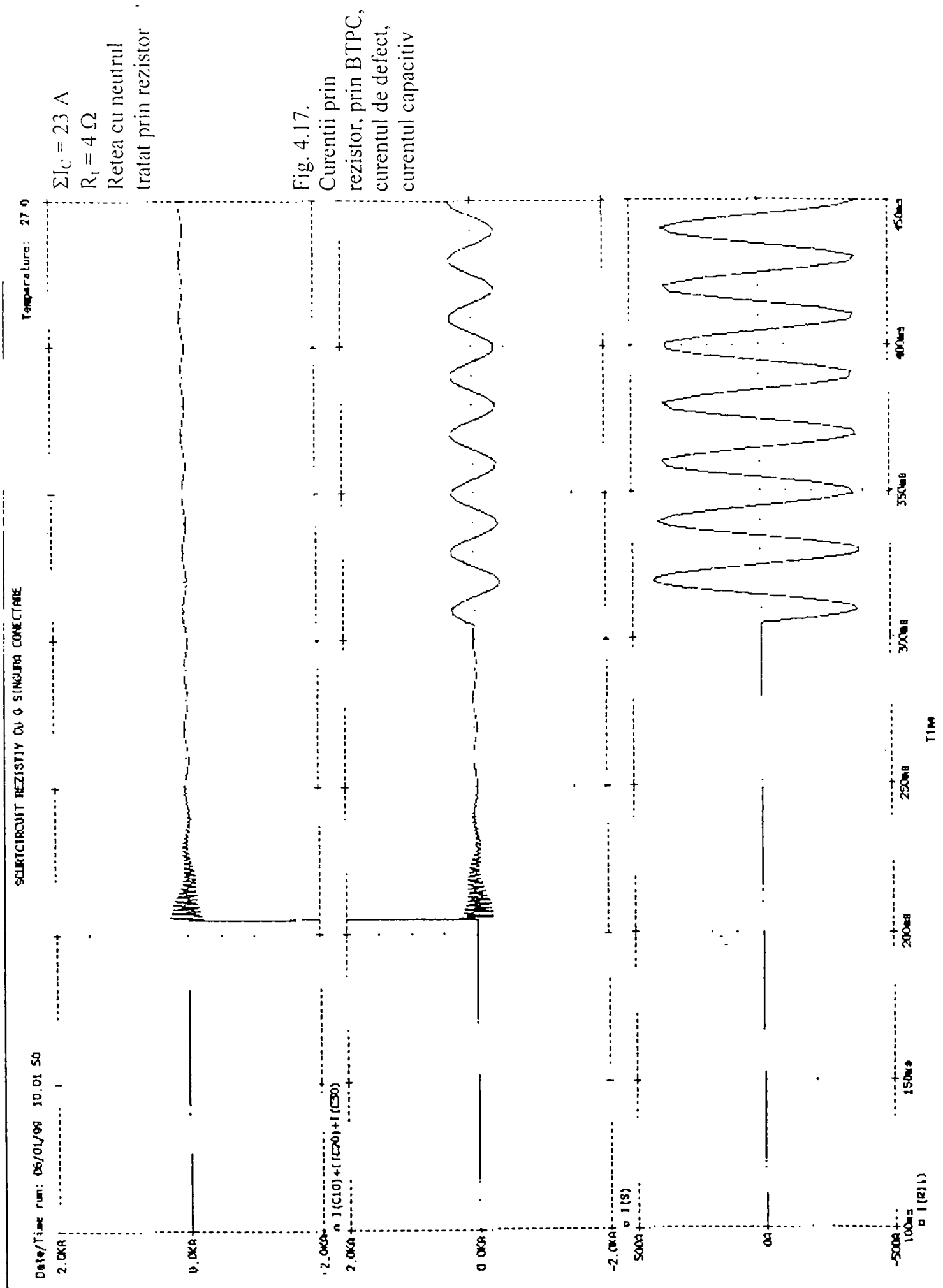


Fig. 4.17.  
 Curentii prin rezistor, prin BTPC, curentul de defect, curentul capacitiv

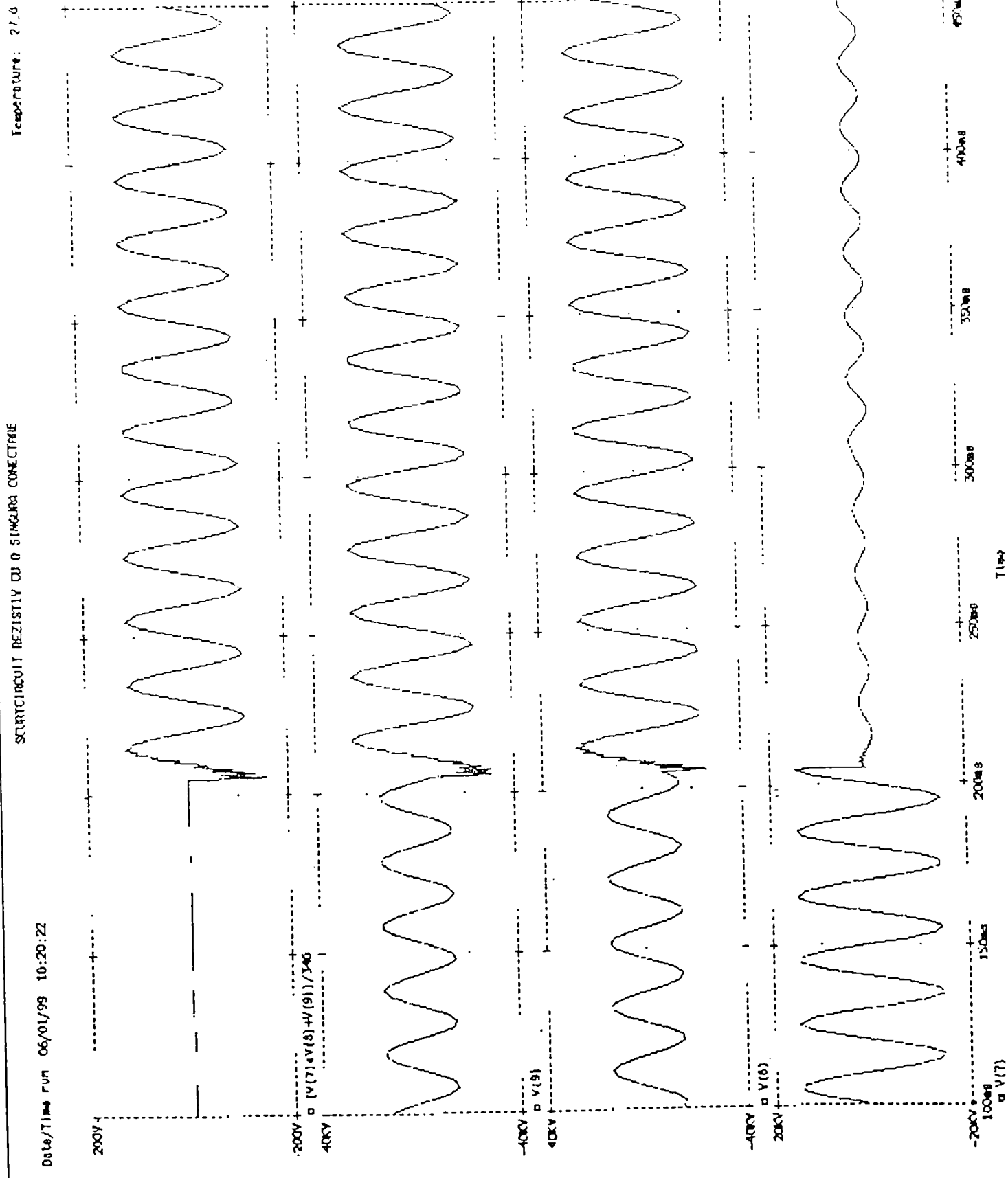


Fig. 4.18.  
 Tensiunile  $u_R$ ,  $u_S$ , și  $u_T$ , și tensiunea homopolara

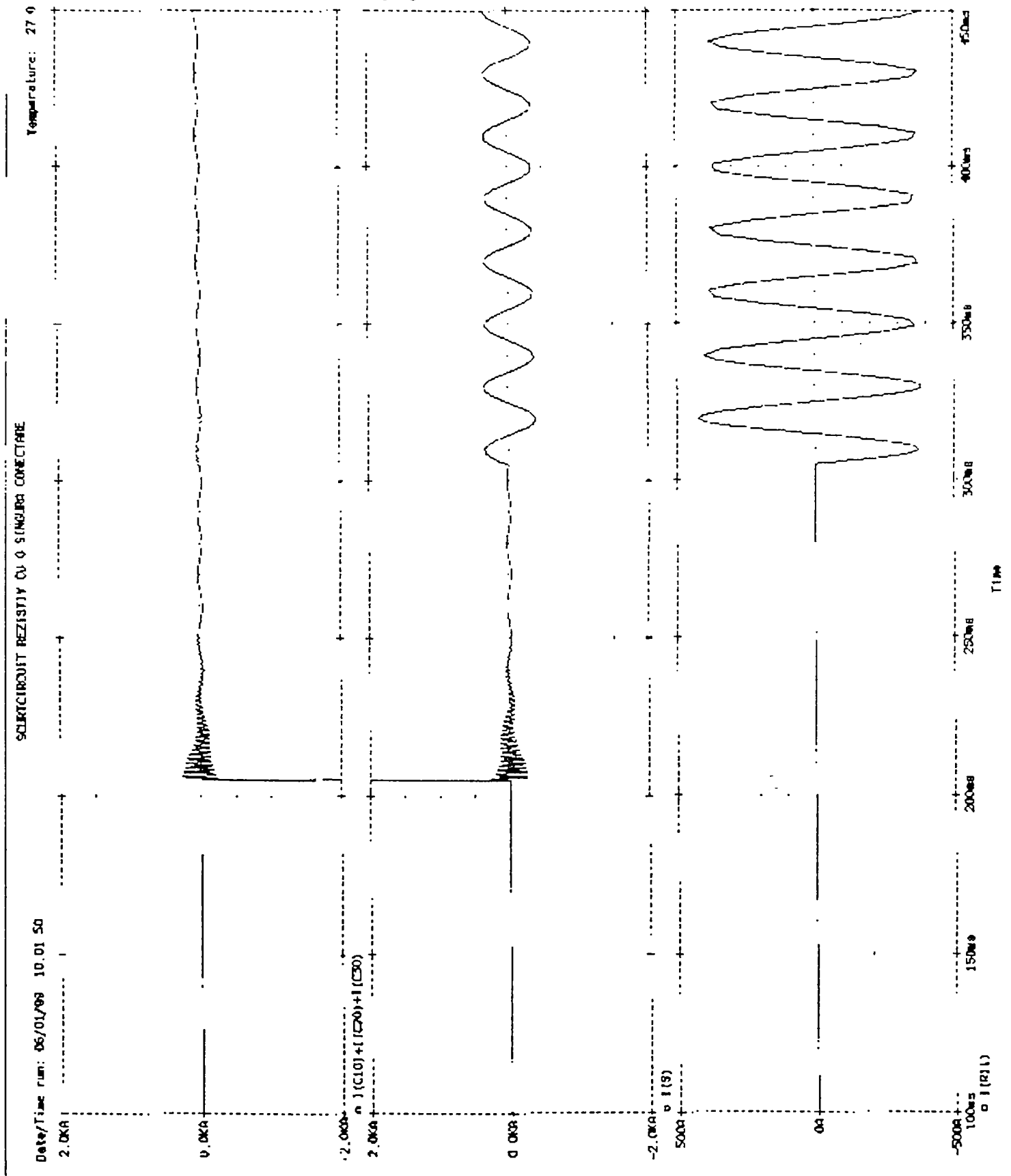


Fig. 4.19.  
 Curentii prin rezistor, prin BTPC, curentul de defect, curentul capacitiv

#### 4.4. Concluzii

În urma analizei regimului tranzitoriu provocat într-o rețea de medie tensiune, de simplele puneri la pământ rezultă următoarele concluzii mai importante:

a) Metoda simulării numerice permite analiza regimurilor tranzitorii provocate de simplele puneri la pământ, indiferent de varianta utilizată pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune. S-a putut analiza influența pe care o are asupra regimului tranzitoriu faza inițială a tensiunii, rezistența de trecere la locul de defect, curentul capacitiv total al rețelei de medie tensiune și modul de tratare al neutrului. Indiferent de soluția aleasă pentru tratarea neutrului regimul tranzitoriu cel mai pronunțat are loc atunci când faza inițială a tensiunii este aproximativ  $90^\circ$ , rezultat confirmat și de literatură [3, 40, 42, 76, 92, 106]. Rezistența de trecere la locul de defect are, de asemenea, un rol important limitând mult atât valoarea componentei aperiodice cât și timpul în care aceasta se amortizează. Influența acestui parametru asupra regimului tranzitoriu nu depinde de soluția aleasă pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune.

b) Atunci când neutrul rețelei de medie tensiune este tratat prin bobină de compensare și se funcționează în regim de rezonanță supratensiunile ce apar pe fazele fără defect în timpul regimului tranzitoriu pot ajunge la 28% din tensiunea acestor faze în regim de simplă punere la pământ stabilizat. Se constată de asemenea, că în această variantă de tratare a neutrului, curentul capacitiv total al rețelei de medie tensiune influențează în principal frecvența oscilațiilor amortizate, nu valoarea supratensiunilor. Dacă rețeaua funcționează în regim de supracompensare, regimul tranzitoriu provocat de simplele puneri la pământ, se atenuează (fig.4.12 și 4.13).

c) În cazul rețelei cu nulul izolat regimul tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ conduce la supratensiuni pe fazele fără defect cu 48% mai mari decât tensiunea fazelor respective când simpla punere la pământ a ajuns în regim stabilizat. Aceasta conduce la o solicitare suplimentară a izolației, deci la posibilitatea transformării simplei puneri la pământ într-un defect multiplu. De asemenea, din simularea numerică rezultă că amortizarea componentei aperiodice în acest caz are loc într-un timp mai lung decât în cazul când neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare. Dacă se are în vedere și faptul că valoarea curentului de defect în acest caz este mai mare decât atunci când neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare, rezultă că acest mod de tratare a neutrului nu este indicat a fi utilizat.

Valoarea mai mare a curentului de defect are implicații importante și asupra dimensionării instalațiilor de pământare, care devin mai scumpe, deoarece rezistențele de

dispersie ale prizelor de pământ trebuie să fie mai mici decât în cazul neutrului tratat prin bobină de compensare.

d) Tratarea neutrului rețelei de medie tensiune cu rezistor conduce la cele mai mici supratensiuni pe durata regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ.

Supratensiunile fazelor fără defect sunt cu 26% mai mari decât tensiunea acestor faze pe durata unei simple puneri la pământ ajunsă în regim stabilizat. În acest caz valoarea curentului de defect este mult mai mare decât atunci când neutrul rețelei este izolat, sau tratat prin bobină de compensare. Deși curentul de defect este mai mare dimensionarea instalațiilor de pământare se simplifică deoarece defectul este izolat, cu ajutorul protecțiilor într-un timp foarte scurt (sub 1s), ceea ce nu se poate face, în general, pentru neutru izolat sau tratat prin bobină de compensare.

e) În varianta de tratare a neutrului propusă de autor și atunci când neutrul este tratat prin bobină de compensare în paralel cu un rezistor, la apariția simplei puneri la pământ neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare. Deci regimul tranzitoriu provocat de simpla punere la pământ este același ca în cazul rețelei de medie tensiune având neutrul tratat prin bobina de compensare. Din analiza prin simulare numerică efectuată a rezultat că la conectarea bobinei trifazate de punct neutru (BTPC) în cazul soluției propuse de autor, respectiv a bobinei de punct neutru (BPN) înseriată cu un rezistor în varianta de tratare a neutrului  $(TSP + BC) \parallel (BPN + R_n)$  regimul tranzitoriu provocat este nesemnificativ. Deci putem concluziona că regimul tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ în acest caz este același cu cel din cazul când neutrul este tratat prin bobină de compensare. Creșterea curentului de defect până la 300A prin conectarea bobinei trifazate de punct neutru (BTPC) în cazul soluției propuse de autor, respectiv a rezistorului în varianta de tratare a neutrului  $(TSP + BC) \parallel (BPN + R_n)$  permite eliminarea defectului, prin intermediul protecțiilor, într-un timp foarte scurt (sub 1 s). Aceasta face ca din acest punct de vedere, soluția propusă de autor să se comporte ca cea în care neutrul a fost tratat prin rezistență. Dacă se are în vedere că soluția propusă de autor permite selectarea defectelor trecătoare de cele permanente, atunci putem afirma că această soluție este superioară variantelor de tratare a neutrului utilizată până în prezent. Rezultatele obținute din analiza numerică a regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ sunt confirmate în literatură [3, 14, 15, 34, 41, 51, 105, 106].

## Cap. 5. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ÎN REȚEAUA DE MEDIE TENSIUNE REALĂ

În vederea verificării rezultatelor obținute pe cale teoretico-numerică, s-a amenajat un sector experimental în stația 110/20 kV I.U.M. Tg-Jiu. Din această schemă se constată că pe bara I de 20 kV neutrul rețelei de medie tensiune poate fi tratat prin bobină de compensare, respectiv prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct de punct neutru (BTPC).

Sectorul experimental conceput permite producerea simplilor puneri la pământ pentru rețele de 20 kV având neutrul izolat, tratat prin bobină de compensare, respectiv neutrul tratat prin bobină de compensare (TSP + BC) în paralel cu bobina de punct neutru (BTPC). Deoarece bobinele de compensare sunt reglabile, se pot asigura, pentru funcționarea rețelei, regimurile de funcționare avute în vedere la efectuarea calculelor și anume :rezonanță; supracompensat 10%; subcompensat 10%; supracompensat 20%; supracompensat 50%.

Curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV poate fi modificat în trepte, de la 2,8 A până la 108,5 A.

În regim normal de funcționare curentul capacitiv total al liniilor racordate la bara I de 20 kV este 85,5 A, iar curentul capacitiv total al liniilor racordate la bara II de 20 kV este 23,9 A. Desigur, valoarea curentului capacitiv total al liniilor de 20 kV racordate la una din bare se poate modifica schimbând liniile racordate la bara respectivă sau modificând lungimea liniilor racordate la bara considerată.

În Anexa 1 este prezentat Standardul de firmă pentru bobina trifazată de punct neutru, din care rezultă caracteristicile tehnice și detaliile constructive ale bobinei. În fig. 5.1. este prezentată vederea de ansamblu a bobinei trifazată de punct neutru.

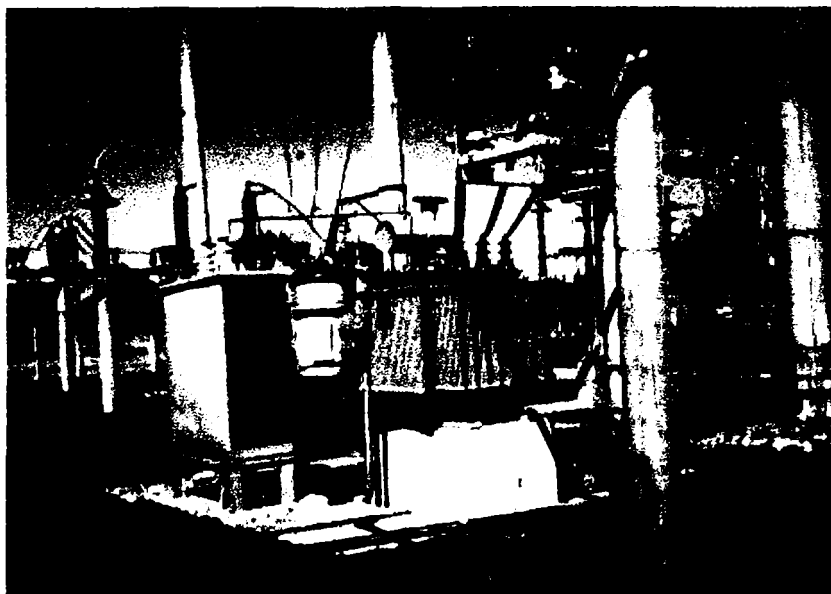


Fig. 5.1.

Pentru a evita transformarea simplelor puneri la pământ provocate în sectorul experimental, în defecte multiple s-a limitat durata acestora la un interval de 0,8 s. Măsurarea mărimilor s-a efectuat cu ajutorul unui osciloperturbograf numeric, echipat cu placa de achiziție National Instruments pe 16 biți. Clasa de precizie a osciloperturbografului utilizat este de 3%.

O vedere de ansamblu a montajului realizat este prezentată în fig. 5.2.



Fig. 5.2.

Simplele puneri la pământ s-au realizat la stâlpul nr. 6 al liniei de 20 kV Iepuri. Sincronizarea comenzilor de închidere al întreruptorului linie 20 kV Iepuri cu cea a pornirii osciloperturbografului s-a realizat cu ajutorul unui programator construit special pentru a se efectua astfel de măsurători. Tot cu ajutorul programatorului s-a asigurat și comanda pentru deconectarea întreruptorului liniei 20 kV Iepuri, după un interval de 0,8 s. Schema de racordare în instalații a aparaturii de măsură este prezentată în Anexa 2.

## 5.1. Rețea cu neutrul izolat

Schema monofilară a rețelei de 20 kV cu neutrul izolat este prezentată în figura 5.3.

Mărimile care s-au măsurat sunt:

- tensiunile de fază  $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$  din secundarul transformatoarelor de tensiune;
- tensiunea homopolară din secundarul filtrului homopolar;
- curentul de defect.

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul nr.5.1.

Curentul capacitiv total al rețelei de 20 kV are valoarea 23 A. Simplele puneri la pământ s-au realizat printr-o rezistență de trecere având, succesiv, valorile:  $R_t = 0$ ;  $R_t = 50 \Omega$ ;  $R_t = 100 \Omega$ ;  $R_t = 500 \Omega$ ;  $R_t = 1000 \Omega$ ;  $R_t = 2000 \Omega$ .

Simpla punere la pământ s-a realizat la stâlpul nr. 6 al liniei Iepuri, deci se poate considera că s-a produs chiar pe barele de 20 kV ale stației de transformare, ceea ce permite neglijarea impedanțelor de secvență ale liniei.

Tabelul nr.5.1. Simplă punere la pământ în rețea cu neutrul izolat

Condițiile în care are loc defectul		$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	50	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$ $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]		0	3	5	7	12	19	
	$U_S$ [V]		100	98	97	95	84	71,3	
	$U_T$ [V]		100	97	96	93	82	70,6	
	$U_h$ [V]	măsurat		102	101	97	68,3	42,7	23,1
		calculat		100	99,5	98	70,8	44,8	24,3
		$\epsilon\%$		2	1,5	1,03	3,66	4,92	5,19
	$I_d$ [A]	măsurat		23,4	21,5	20,8	14,8	9,4	5,1
		calculat		24	22,8	22,5	16,2	10,2	5,5
		$\epsilon\%$		2,56	6,05	8,17	9,46	8,51	7,84

Comparând rezultatele obținute din măsurători cu cele obținute teoretic se constată o diferență acceptabilă din punct de vedere tehnic, mai ales dacă se are în vedere precizia cu care se pot aprecia valorile parametrilor utilizați în calcule. Erorile mai mari obținute pentru curentul de defect se explică prin faptul că acesta este mai deformat decât tensiunile, ori în calculele efectuate s-a acceptat variație sinusoidală în timp, pentru tensiuni și curenți.



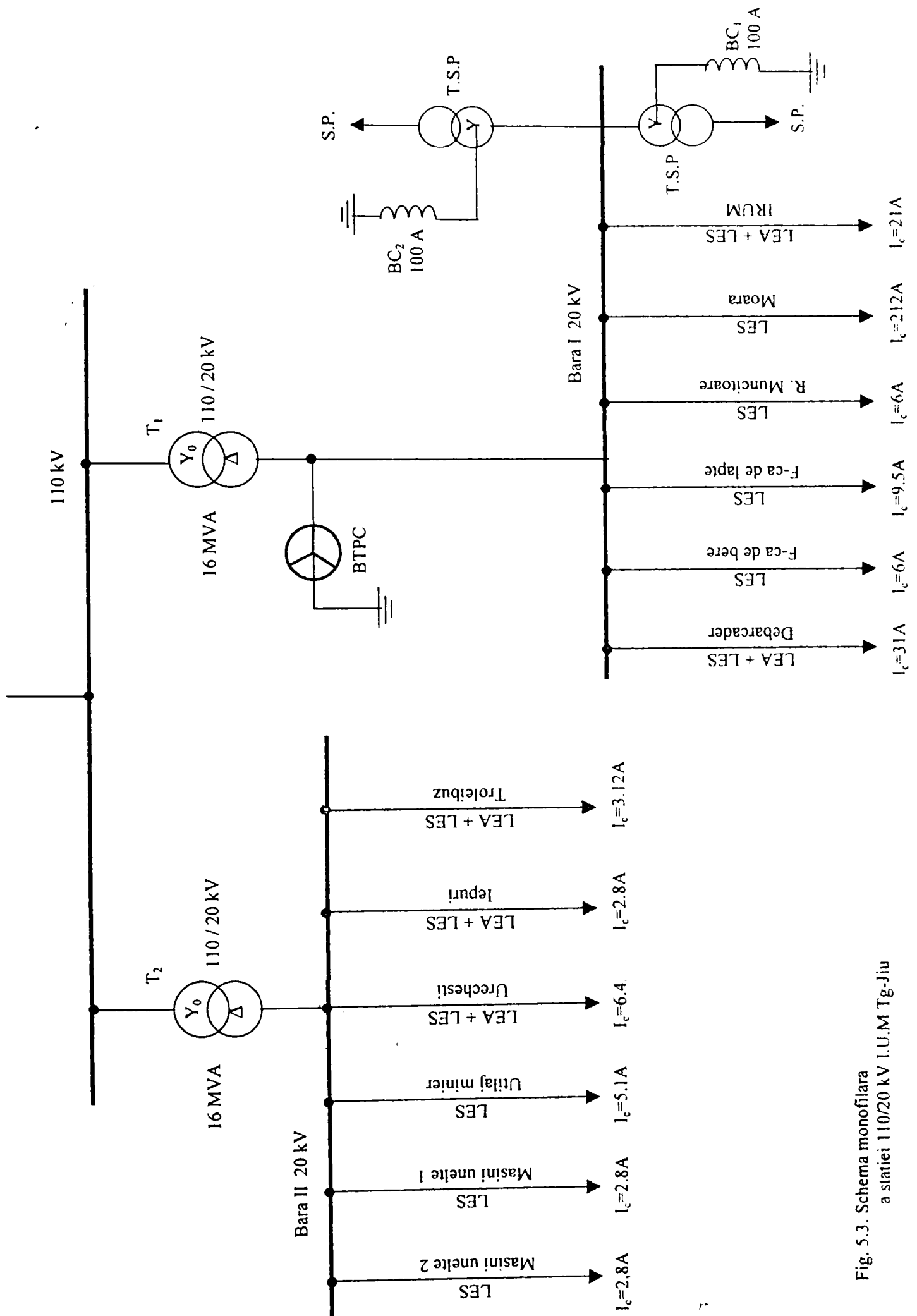


Fig. 5.3. Schema monofilara a statiei 110/20 kV I.U.M Tg-Jiu

## 5.2. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare

Pentru a se putea compara rezultatele obținute în cazul când rețeaua de 20 kV are neutrul tratat prin bobină de compensare cu cele obținute în cazul când rețeaua avea neutrul izolat s-a păstrat aceeași rețea de 20 kV, iar pe bară s-a conectat bobina de compensare, prin intermediul transformatorului de servicii proprii (TSP). S-au provocat simple puneri la pământ rețeaua funcționând în următoarele regimuri: rezonanță; supracompensat 10%; supracompensat 20%; supracompensat 50%; subcompensat 10%.

Rezultatele obținute pentru aceste cazuri sunt prezentate în tabelul nr. 5.2.....5.6.

Tabelul nr.5.2. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționând la rezonanță

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$ $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	0,46	2,28	4,4	8,4	
	$U_S$ [V]	100	99,8	99,5	99,2	97,3	
	$U_T$ [V]	100	99,6	98,8	98,7	96,7	
	$U_h$ [V]	măsurat	101	99,2	96,8	93,1	88,6
		calculat	100	99,5	97,6	95,3	91
		$\varepsilon\%$	0,99	0,3	0,83	2,36	5,1
	$I_d$ [A]	măsurat	0,95	0,94	0,93	0,92	0,89
		calculat	0,92	0,92	0,91	0,80	0,84
		$\varepsilon\%$	3,16	2,13	2,15	4,35	5,62

Tabelul nr.5.3. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționând supracompensat 10%

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$  $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\sum I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	1,31	6,35	12,2	21,8	
	$U_S$ [V]	100	100	98,9	96	88,3	
	$U_T$ [V]	100	99,5	97,8	96,5	86,7	
	$U_h$ [V]	măsurat	102	101	98,3	90,1	81,2
		calculat	100	99,4	96,5	92,3	83
		$\epsilon\%$	1,96	1,58	1,93	2,44	2,23
	$I_d$ [A]	măsurat	2,46	2,45	2,42	2,36	2,06
		calculat	2,65	2,62	2,54	2,44	2,18
		$\epsilon\%$	7,72	6,94	4,96	7,62	5,83

Tabelul nr.5.4. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționând supracompensat 20%

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$  $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\sum I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	2,87	13,5	23,4	38,1	
	$U_S$ [V]	100	102	97	87,4	77,2	
	$U_T$ [V]	100	101	96,3	86,5	78,3	
	$U_h$ [V]	măsurat	103	102	95,3	81,5	62,3
		calculat	100	99,2	93,7	84,3	65,7
		$\epsilon\%$	2,91	2,75	2,72	3,43	5,46
	$I_d$ [A]	măsurat	5,63	5,61	5,26	4,65	3,58
		calculat	5,79	5,74	5,41	4,87	3,81
		$\epsilon\%$	5,86	2,32	2,85	4,73	6,42

Tabelul nr.5.5. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționând supracompensat 50%

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$ $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	8,7	30,5	39,5	43,4	
	$U_S$ [V]	100	98,3	77,7	68,2	63,1	
	$U_T$ [V]	100	97,8	78,2	67,8	64,3	
	$U_h$ [V]	măsurat	102	101	67,2	41,3	22,5
		calculat	100	96,3	67,6	43,2	23,8
		$\epsilon\%$	1,96	4,65	2,38	4,6	5,78
	$I_d$ [A]	măsurat	17,9	16,7	11,5	7,3	4,12
		calculat	18,2	17,5	12,3	7,9	4,34
		$\epsilon\%$	1,68	4,79	6,96	8,22	5,34

Tabelul nr.5.6. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționând subcompensat 10%

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$ $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	1,33	6,5	12,6	23,4	
	$U_S$ [V]	100	99,8	98,9	97	88,7	
	$U_T$ [V]	100	99,7	98,6	96,2	86,8	
	$U_h$ [V]	măsurat	102	101,5	99,8	97	92
		calculat	100	99,6	97,7	94,7	87,7
		$\epsilon\%$	1,96	1,87	1,1	2,37	4,67
	$I_d$ [A]	măsurat	2,54	2,51	2,49	2,38	2,27
		calculat	2,67	2,67	2,62	2,52	2,34
		$\epsilon\%$	2,76	2,39	5,22	5,88	3,08

Din măsurătorile efectuate rezultă că pe durata unei simple puneri la pământ când neutrul rețelei de medie tensiune este tratat prin bobină de compensare, tensiunile fazelor fără defect sunt maxime dacă rețeaua funcționează la rezonanță. Acest rezultat confirmă pe cele obținute teoretic. Dacă rețeaua funcționează în regim de supracompensare 50%, din punct de vedere al variației tensiunii homopolare și a variației tensiunii fazelor fără defect în funcție de rezistența de trecere la locul de defect, situația este similară cu cea în care neutrul rețelei este izolat. Având în vedere condițiile simplificatorii acceptate în calculul tensiunii homopolare și al curentului de defect, eroarea maximă de 5,78% pentru tensiunea homopolară și de 8,22% pentru curentul de defect se încadrează în limitele obișnuite pentru astfel de măsurători.

### **5.3. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare (TSP+BC) în paralel cu bobina de punct neutru (BTPC)**

Conectarea bobinei de punct neutru (BTPC) în paralel cu bobina de compensare se realizează automat după un interval de timp prestabilit de la apariția defectului, motiv pentru care simplele puneri la pământ pentru acest mod de tratare a neutrului rețelei s-au realizat în aceleași condiții ca și în cazul în care rețeaua de 20 kV are neutrul tratat prin bobină de compensare.

Deoarece diferențele între mărimile măsurate la acest mod de tratare al neutrului, atunci când rețeaua funcționează la rezonanța sau supracompensat sunt ne semnificative, se prezintă numai rezultatele obținute în cazul când rețeaua funcționa la rezonanță (tabelul nr.5.7), respectiv supracompensat 50% (tabelul 5.8).

Comparând valorile din tabelul 5.7 cu cele din tabelul 5.8 rezultă că atunci când neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru (soluție propusă de autor) practic nu prezintă importanță regimul în care funcționa rețeaua înaintea conectării bobinei de punct neutru.

Se remarcă, de asemenea, că tensiunile fazelor fără defect devin aproximativ egale cu cele din regim normal de funcționare, dacă rezistența de trecere la locul de defect depășește valoarea de  $500\Omega$ . În acest caz diferența maximă dintre tensiunea homopolară obținută prin calcul și cea determinată experimental este de 6,32%, iar pentru curentul de defect diferența maximă este de 6,04%. Ambele erori sunt acceptabile dacă se au în vedere ipotezele simplificatorii acceptate în calcule și clasa de precizie a aparaturii utilizate la măsurători.

Tabelul nr.5.7. Rețea cu neutrul tratat prin (TSP + BC) || (BTPC), anterior funcționând la rezonanță

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	50	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$ $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	45,3	48	52	54	56,7	
	$U_S$ [V]	100	75,6	69	60,5	59,2	58,5	
	$U_T$ [V]	100	74,5	68,2	58,3	58,9	58,2	
	$U_h$ [V]	măsurat	101	59,1	35,2	7,6	3,7	1,89
		calculat	100	60,2	36,1	7,9	3,96	1,97
		$\epsilon\%$	0,98	1,86	2,56	3,95	7,03	3,17
	$I_d$ [A]	măsurat	295	176	103	22,5	11,3	5,64
		calculat	300	181	108	23,7	11,9	5,97
		$\epsilon\%$	1,69	2,84	4,85	5,33	5,3	5,85

Tabelul nr.5.8. Rețea cu neutrul tratat prin bobină de compensare funcționând supracompensat 50%

Condițiile în care are loc defectul	$R_t$ [ $\Omega$ ]	0	50	100	500	1000	2000	
$Z_{dTr} = Z_{iTr} =$ $= (0,2 + j2,7) \Omega$ $Z_{dL} = Z_{iL} = Z_{hL} = 0$ $\Sigma I_c = 23 \text{ A}$ $R_p = 3,9 \Omega$	$U_R$ [V]	0	45,6	49	52	54	56,8	
	$U_S$ [V]	100	76,3	69,5	60,7	59,3	58,5	
	$U_T$ [V]	100	74,6	68,5	59,8	58,7	58,1	
	$U_h$ [V]	măsurat	102	54,8	32,9	6,95	3,48	1,78
		calculat	100	57,6	34	7,36	3,7	1,85
		$\epsilon\%$	1,96	5,11	3,34	5,89	6,32	3,93
	$I_d$ [A]	măsurat	304	178	106	22,6	11,4	5,63
		calculat	310	186	110	23,7	11,9	5,97
		$\epsilon\%$	1,97	4,49	3,77	4,86	4,38	6,04

#### 5.4. Determinarea experimentală a supratensiunilor de comutație în rețeaua de 20 kV cu neutrul tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina trifazată de punct neutru

Pentru determinarea experimentală a supratensiunilor de comutație ce apar în regim tranzitoriu în rețeaua mixtă de 20 kV a stației IUM 110/20 kV – Tg.Jiu s-au luat în considerare cazurile de defect:

- simplă punere la pământ prin arc electric;
- simplă punere la pământ (metalică) prin rezistență de trecere nulă considerat ca scurtcircuit net.

Pentru aceste două cazuri s-au stabilit următoarele regimuri:

- rețea supracompensată 10%;
- rețea la rezonanță.

Compensarea a fost realizată prin intermediul bobinei de stingere  $BC_1$  din stația IUM.

Pe (LEA + LES) 20kV Iepuri s-a pus la pământ faza T racordată la priza de pământ cu rezistența  $R_p = 3,9 \Omega$ .

Scurtcircuitarea fazei T s-a realizat pe stâlpul nr.6 al LEA + LES 20 kV, astfel:

- pentru scurtcircuitul prin arc s-a folosit conductor de CuEm cu diametrul de 0,3 mm (de diferite lungimi cu mai multe căi conductoare) ce a fost racordat la bornele unui eclator cu coarne fixat pe stâlpul nr.6;
- pentru scurtcircuitul net s-au folosit :
  - o clemă de legătură între coarnele eclatorului;
  - un conductor lung de cca 15-20 m întins pe pământ simulând o linie ruptă și căzută la pământ.

În regimul supracompensat s-au determinat experimental supratensiunile numai pentru scurtcircuitul prin arc, iar în regimul rezonant s-au determinat supratensiunile pentru scurtcircuitul net și cel prin arc electric.

Operațiile de conectare și deconectare a liniei LEA 20 kV s-au efectuat cu întreruptorul cu ulei puțin IO- 24 kV/1250 A din celula Iepuri a stației I.U.M. 110/20 kV.

##### 5.4.1.Schema circuitului de încercare

Schema monofilară a stației 110/20 kV IUM – Tg. Jiu, utilizată la încercări pentru măsurarea supratensiunilor de comutație în rețeaua de 20 kV cu neutrul tratat cu bobină trifazată BTPC în structura (TSP +BC)|| BPNC este prezentată în fig.5.4.

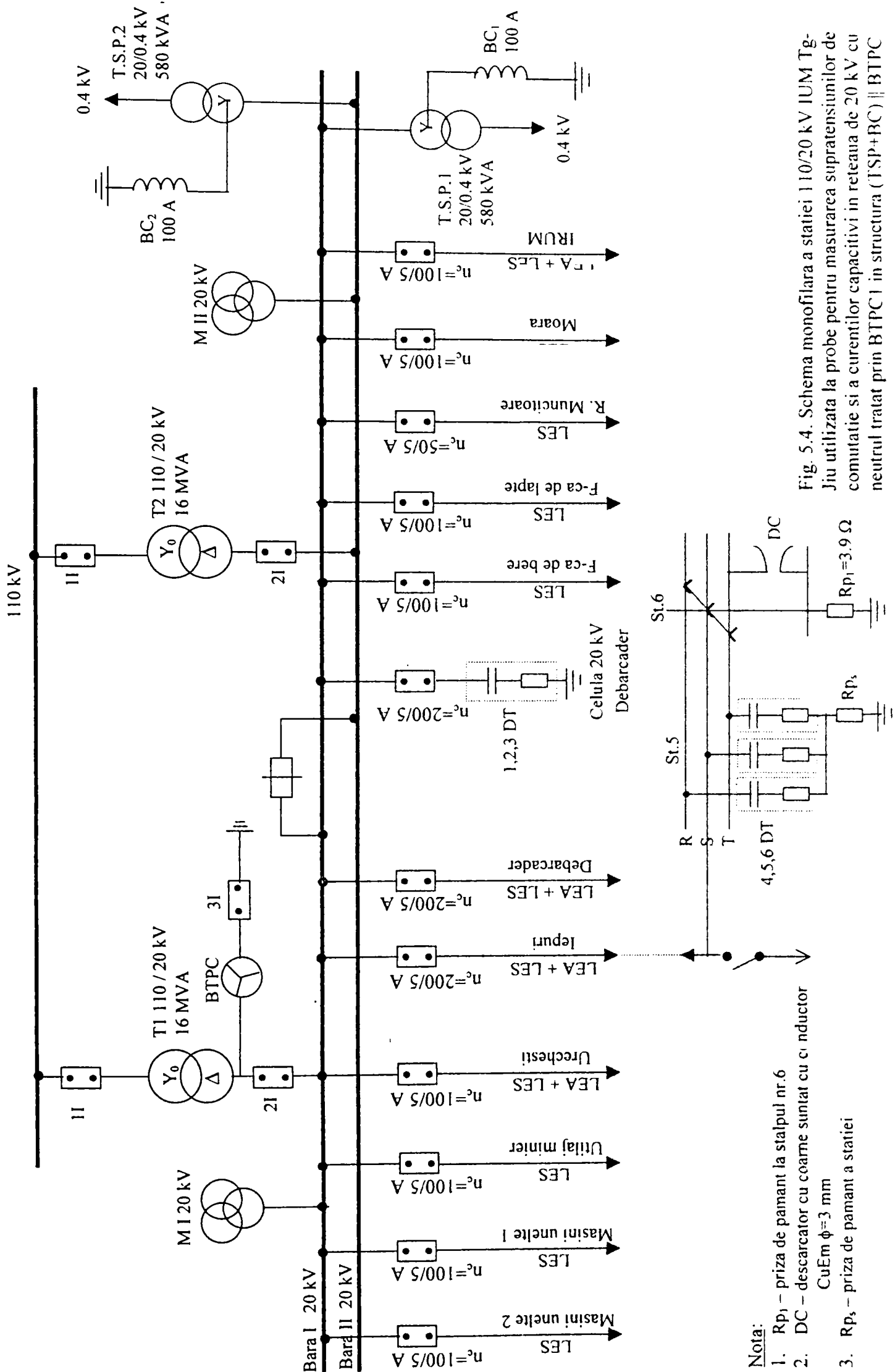


Fig. 5.4. Schema monofilara a stației 110/20 kV IUM Tg-Jiu utilizată la probe pentru măsurarea supratensiunilor de comutație și a curenților capacitivi în rețeaua de 20 kV cu neutrul tratat prin BTPTC în structura (TSP+BC) || BTPTC

**Nota:**

1. Rp<sub>1</sub> – priză de pământ la stalpul nr.6
2. DC – descarcător cu coarne sunțat cu conductor  
CuEm φ=3 mm
3. Rp<sub>s</sub> – priză de pământ a stației



Circuitul de încercare conform fig. 5.4 este format din linia aeriană LEA de 20 kV și cablurile LES de 20 kV. Curentul capacitiv al circuitului a fost de 75 A.

De pe linia de 110 kV, prin intermediul transformatorului trifazat (T1) de 110/20 kV, 16 MVA, conexiune  $Y_0d-11$  pe al cărui secundar este racordată prin intermediul separatorului STEP de 35 kV, bobina trifazată BPNC de 20 kV/300 A cu neutrul legat la pământ, comutabil cu întreruptorul (3I) cu SF6 tip HF- M 24 kV/1250 A/16 kA, se face alimentarea circuitului de încercare pe bara (I) de 20 kV cu întreruptorul (2I) tip IO-24kV/1250 A.

Pe bara (I) de 20 kV sunt conectate de asemenea linia și cablurile (LEA + LES): Urechești, Iepuri, Troleibuz, Debarcader, IRUM și LES: Mașini Unelte 1, Mașini Unelte 2, Utilaj Minier, Fabrica de Bere, Fabrica de Lapte, România Muncitoare și Moara. Transformatorul TSP<sub>1</sub> este de 630 kVA, 20kV/0,4kV, conexiune  $Y_0Z_0-5$ , iar bobina de stingere (BC<sub>1</sub>) este de 100 A,  $20\sqrt{3}$  kV, 1160 kVA.

#### 5.4.2. Schema circuitului de comandă și măsurare

La încercările din stația IUM 110/20 kV s-au măsurat și înregistrat: tensiunile aplicate, supratensiunile de comutație la deconectare și tensiunile de revenire, curent de defect și tensiunea de referință a rețelei utilizând simultan două sisteme de măsurare:

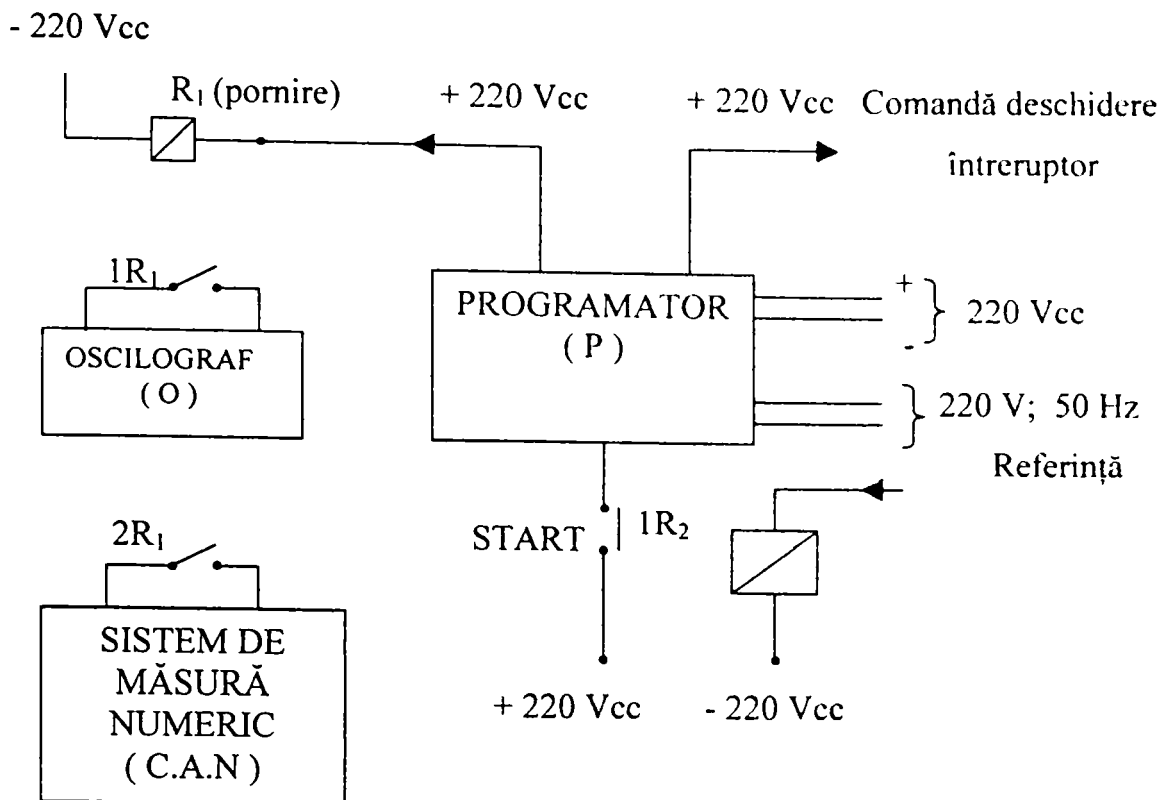
- sistemul analogic care utilizează lanțul de măsurare format din: divizoare capacitive, cabluri coaxiale, amplificatoare, oscilograf magnetoelectric;
- sistemul numeric care utilizează lanțul de măsură format din: divizoare capacitive, izolatori galvanici, calculator Notebook echipat cu placă de achiziție National Instruments, 12 biți.

**Obs.** Sistemul numeric a fost utilizat pentru a verifica influența câmpurilor electromagnetice exterioare asupra lanțului de măsură.

Conform schemei de încercare din fig.5.4 tensiunile și supratensiunile de comutație se măsoară față de pământ cu divizoare capacitive de 24 kV. Bornele de ieșire ale divizoarelor capacitive au fost legate la centura de pământare a stației având rezistența de  $0,1 \Omega$ .

Tensiunile și supratensiunile din amonte de locul defectului s-au măsurat cu divizoarele 1, 2, 3DT montate în celula Debarcader, iar cele din aval cu divizoarele 4, 5, 6DT montate în aval de defect pe linia LEA 20 kV Iepuri la stâlpul nr.5.

Semnalele de măsură culese de pe divizoare, conform schemei din fig. 5.6 sunt transmise prin cablurile coaxiale la sistemele de măsură analogic și numeric, în prealabil fiind adaptate de amplificatoare Hewlett Packard pe intrările oscilografului magnetoelectric (cu bucle), și calculatorului Notebook pentru înregistrări simultane. Eroarea lanțului de măsură este de 3%.



P - PROGRAMATOR ( $U_{\text{comandă}} = 220 \text{ Vcc} / 3 \text{ A}$ ; precizia comenzii - 10 ms.  $100 \mu\text{s}$ .<sup>4°</sup> el)

O - OSCIOLOGRAF magnetoelectric H117-15 kZ, 12 canale

CAN - Calculator Notebook

Fig.5.5 Schema bloc a circuitului de comandă pentru măsurarea și înregistrarea supratensiunilor de comutație

Schema circuitului de comandă pentru măsurarea și înregistrarea supratensiunilor de comandă este prezentată în fig.5.5. Schema este formată din programatorul P (LMP) și relele R1, R2 ce au rolul de a transmite comenzile: de declanșare întreruptor IO-24 kV/1250 A din celula Iepuri și de sincronizare la înregistrarea tensiunilor pe osilograf și achiziția de date.

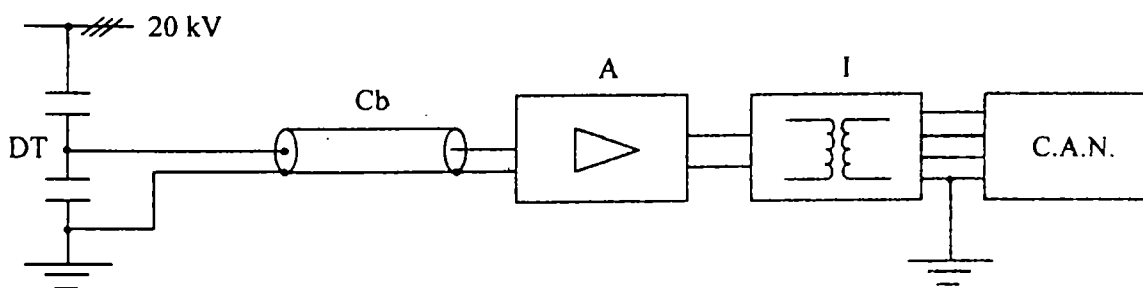


Fig.5.6. Schema circuitului de măsură și înregistrare a supratensiunilor de comutație cu sistemul numeric

DT - Divizor capacitiv: 24 kV/40 V; 366,6 pF/0,2  $\mu\text{F}$

Cb - Cablu coaxial:  $Z = 75 \Omega$ ;  $L = 50 \text{ m}$

- A - Amplificator Hewlett Packard:  $k_A = \times 2$ ;  $f = 1$  MHz
- I - Izolator galvanic: 1,5 kV; 10 kHz
- CAN - Calculator NoteBook echipat cu placă de achiziție (rata de eșantionare 5 kHz; 12 biți).

Startul programatorului P (LMP) a fost dat de programatorul P1 (ELCO-Deva) cel cu care se efectuează și anclanșarea întreruptorului (3E) cu SF6 HFM 20 kV/630 A.

### 5.4.3. Rezultatele încercărilor și măsurărilor

Încercările au constat în efectuarea conectării LEA + LES prin anclanșarea întreruptorului IO-24 kV/1250A – celula Iepuri cu programatorul P1 (ELCO – Deva), urmată la 0,1 s de anclanșarea întreruptorului monopolar (3I) de pe neutrul bobinei BTPC prin programatorul P1, pe defect de simplă punere la pământ și de declanșarea întreruptorului IO – 24 kV/1250 A din celula Iepuri comandat de programatorul P(LMP) pentru deconectarea liniei (LEA/LES) după 0,1 s de la anclanșarea întreruptorului 3I (existând ca rezervă și comanda prin programatorul P1 la cca 0,6 s după conectarea LEA 20 kV Iepuri pe defect)

Deconectarea liniei s-a efectuat pe maximul tensiunii de referință ( $\psi - 90^\circ$ el) considerat ca momentul cel mai sever de apariție a supratensiunilor de comutație [3].

Pe calculator s-au înregistrat următoarele mărimi:

- tensiunile aplicate în amonte și aval:  $U_{1aR}$ ;  $U_{1aS}$ ;  $U_{1aT}$ ;  $U_{2aR}$ ;  $U_{2aS}$ ;  $U_{2aT}$ ;
- supratensiunile de comutație în amonte și aval:  $U_{1sR}$ ;  $U_{1sS}$ ;  $U_{1sT}$ ;  $U_{2sR}$ ;  $U_{2sS}$ ;  $U_{2sT}$ ;
- tensiunile de revenire în amonte:  $U_{1rR}$ ;  $U_{1rS}$ ;  $U_{1rT}$ ;
- curentul de defect  $I_d$ ;
- tensiunea de referință a sursei;
- baza de timp.

Rezultatele măsurărilor obținute prin prelucrarea oscilogramelor înregistrate pe calculator sunt prezentate în tabelul 1.

Prelucrarea datelor s-a efectuat pe baza unui program LABVIEW, de care dispune Laboratorul de mare putere de la Electroputere Craiova.

Rezultatele măsurătorilor obținute prin prelucrarea oscilogramelor înregistrate pe calculator

Nr. crt.	Incert.	U <sub>1aR</sub>	U <sub>1rR</sub>	U <sub>1sR</sub>	k1	U <sub>2aR</sub>	U <sub>2sR</sub>	k2	I <sub>d</sub>	Conductor n x Φ/L	Regim de comutație
		U <sub>1aS</sub>	U <sub>1rS</sub>	U <sub>1sS</sub>		U <sub>2aS</sub>	U <sub>2sS</sub>				
		U <sub>1aT</sub>	U <sub>1rT</sub>	U <sub>1sT</sub>		U <sub>2aT</sub>	U <sub>2sT</sub>				
		V	V	Vmax	u.r.	V	Vmax	u.r.	A		
1.	I - 1/1	12487	12477	23549	1,88	10207	14811	1,45			
		12466	12482	18084	1,45	10024	14502	1,44	2,4	1 x 0,3/55	
		12344	12311	18002	1,46	11104	16141	1,46			
2.	I - 1/2	21035	12399	29778	2,4	18257	25485	1,395			
		20795	12391	29201	2,36	17123	24076	1,4	328	2 x 0,3/40	
		-	12665	28674	2,27	297	-	-			
3.	I - 1/3	12443	12443	18050	1,45	11508	16916	1,47			
		12375	12375	18005	1,46	-	-	-	3,36	1 x 0,3/40	Rețea supracompensată 10% în regim de scurtcircuit prin arc electric
		12277	12277	17929	1,46	12037	17452	1,45			
4.	I - 1/4	12454	12431	18230	1,470	11623	17344	1,485			
		12415	12401	18002	1,450	11536	16808	1,46	1,64	2 x 0,3/40	
		12318	12309	18016	1,460	12542	18218	1,45			
5.	I - 1/5	21048	12422	29476	2,37	20066	27870	1,39			
		20843	12413	29296	2,36	20049	28787	1,43	330	2 x 0,3/30	
		-	12268	28848	2,35	269	-	-			
6.	I - 2/1	12393	12375	17949	1,45	11922	17556	1,47			
		12351	12351	17926	1,45	12346	18038	1,46	1,95	2 x 0,3/30	rețea la rezonanță cu scurtcircuit prin arc electric
		12239	12233	17734	1,44	12909	18724	1,45			
7.	I - 2/2	20955	12129	34507	2,845	20769	29621	1,43			
		20716	12371	30179	2,43	20989	30206	1,44	327,9	3 x 0,3/30	
		-	12374	28268	-	367	-	-			
8.	I - 3/1	20896	12349	35115	2,845	21150	30621	1,45			rețea la rezonanță cu scurtcircuit net la pământ
		20776	12341	29372	2,38	22457	31827	1,41	326,9	clemă fixă	
		-	12211	28565	2,33	187	-	-			
9.	I - 4/1	20339	12077	35985	2,97	21730	33956	1,56			rețea compensată la rezonanță cu conductor căzut la pământ
		14270	12455	20968	1,68	15868	22700	1,43	226	conductor L = 15 - 20 m	
		7025	12238	27493	2,24	8117	10730	1,32			

Notații:

I – 1/1 – 5 – încercarea în regim de scurtcircuit prin arc electric – rețea supracompensată 10%

I – 2/1 – 2 – încercarea în regim de scurtcircuit prin arc electric - rețea la rezonanță

I – 3/1 – încercarea în regim de scurtcircuit net – rețea la rezonanță

I – 4/1 - încercarea în regim de scurtcircuit cu conductor căzut la pământ – rețea la rezonanță

$$k1 = U_{1sR}/U_{1rR}$$

$$k2 = U_{2sR}/U_{2aR}$$

$\Phi$  – diametrul conductorului de CuEm

L – lungimea conductorului de CuEm

n – numărul de conductoare conectate în paralel

În Anexa 3 sunt prezentate oscilogramele obținute la probele I – 1/2, I – 1/5, I – 2/2, I – 3/1, I – 4/1 din tabelul 5.9.

Comparând oscilograma nr.4 din anexa 3 obținută experimental cu cele din fig. 3.18 și 3.19 obținute prin simulare numerică se constată o concordanță satisfăcătoare, în ceea ce privesc valorile maxime ale tensiunilor fazelor fără defect și a constantelor de timp.

Se relevă faptul că la conectarea bobinei trifazate de punct neutru regimul tranzitoriu este mult mai redus decât la apariția simplei puneri la pământ.

## 5.5. Concluzii

În urma verificărilor experimentale efectuate în sectorul experimental amenajat în stația de transformare 110/20 kV IUM- Tg.Jiu rezultă următoarele concluzii mai importante:

a) Diferențele dintre valorile mărimilor obținute experimental, respectiv prin calcul în cazul unei simple puneri la pământ în regim stabilizat (tabelele 5.1....5.8 ) sunt sub 10%. Aceasta atestă faptul că modelul matematic utilizat în studiu este corespunzător și de asemenea, condițiile simplificatorii admise pentru stabilirea acestuia sunt acceptabile.

b) Din tabelele 5.7 și 5.8 rezultă că tensiunea fazelor fără defect în cazul unei simple puneri la pământ, pentru soluția de tratare a neutrului propusă de autor sunt mult mai mici, la aceeași rezistență de trecere la locul de defect decât în cazul rețelei cu nulul izolat (tabelul 5.1) respectiv cu nulul tratat prin bobină de compensare (tabelele 5.2 ..... 5.6).

c) Supratensiunile de comutație măsurate în amonte de simpla punere la pământ sunt mai mari decât în aval. Astfel factorul maxim de supratensiune în aval obținut experimental este 2,97 u.r. față de 1,56 u.r. cât s-a obținut același factor în aval (tabelul 5.9).

d) Dacă rețeaua funcționa înaintea conectării bobinei de punct neutru (BTPC) în regim de supracompensare 10%, supratensiunile de comutație, determinate experimental, în amonte, au

fost mai mici decât în regim de rezonanță, factorul de supratensiune atingând valoarea maximă 2,4 u.r. (tabelul 5.9).

e) Valorile supratensiunilor de comutație sunt influențate de durata arcului electric prin care are loc simpla punere la pământ, de rezistența de trecere la locul de defect și regimul în care funcționează rețeaua (tabelul 5.9).

f) În cazul în care neutrul rețelei de medie tensiune este tratat prin bobină de compensare factorul de supratensiune este mai mare decât în varianta de tratare a neutrului propusă de autor.

În literatură [3, 48, 52, 112, 142] se precizează că la o simplă punere la pământ prin arc electric factorul de supratensiune în cazul rețelelor cu neutrul tratat prin bobină de compensare este  $\leq 3,15$ , ori același factor determinat experimental în varianta de tratare a neutrului propusă de autor nu depășește valoarea de 2,85. Acest rezultat este confirmat și în lucrarea [3] unde se arată că supratensiunile de comutație au valorile cele mai scăzute atunci când neutrul rețelei este tratat prin rezistor sau printr-o impedanță de valoare scăzută, varianta în care se încadrează și soluția propusă de autor.

## Cap.6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Introducerea în studiul simplelor puneri la pământ a coeficientului  $K_{Uh}$  permite determinarea operativă a valorilor mărimilor ce caracterizează o simplă punere la pământ. Deoarece acest coeficient depinde de condițiile în care se produce simpla punere la pământ (rezistența de trecere la locul de defect -  $R_t$ , curentul capacitiv total al rețelei de medie tensiune  $\sum I_c$ , soluția adoptată pentru tratarea neutrului, regimul în care funcționează rețeaua de medie tensiune rezonanță, supracompensat, subcompensat) este necesar să se cunoască aceste dependențe. Având expresiile de calcul ale acestui coeficient pot fi trasate aceste dependențe pentru fiecare stație de transformare existentă în administrarea unei Sucursale de Distribuție a Energiei Electrice. Punând la dispoziția proiectanților și a inginerilor din exploatare aceste dependențe, se poate determina foarte simplu valoarea tuturor mărimilor ce caracterizează o simplă punere la pământ deci pot fi stabilite reglajele protecțiilor astfel încât simplele puneri la pământ să poată fi sesizate selectiv (cea ce permite deconectarea liniei cu defect într-un timp scurt) eliminând posibilitatea transformării unei simple puneri la pământ în defect multiplu.

În cazul rețelelor de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de compensare (TSP+BC) în paralel cu bobina de punct neutru (BTPC) metoda de tratare a neutrului propusă de autor coeficientul  $K_{Uh}$  nu este influențat de regimul în care funcționează rețeaua înaintea conectării bobinei de punct neutru, dacă valoarea curentului capacitiv total al rețelei este sub 40 A. La valori mai mari ale curentului capacitiv total, coeficientul  $K_{Uh}$  depinde de regimul în care funcționează rețeaua numai dacă supracompensarea depășește 20%. Astfel de situații în exploatare nu reprezintă o regulă ci excepții, deci se poate afirma că în stabilirea dependenței coeficientului  $K_{Uh}$  în funcție de rezistența de trecere ( $R_t$ ) considerând că rețeaua funcționează la rezonanță înaintea conectării bobinei de punct neutru, nu conduce la erori inadmisibile din punct de vedere tehnic.

Pentru o rezistență de trecere  $R_t=50 \Omega$  coeficientul  $K_{Uh}$ , în funcție de soluția adoptată pentru tratarea neutrului are valorile ( Cap. 3, fig. 3.3 ... 3.15):

- 0,999 -dacă rețeaua are neutrul izolat sau tratat prin bobină de compensare (fig.3.3 și 3.5);
- 0,45 -dacă neutrul rețelei este tratat prin rezistor sau prin bobină de compensare în paralel cu rezistor [(TSP+BC) || (BPN + $R_n$ )] (fig. 3.4 și 3.10);
- 0,63 -dacă neutrul rețelei este tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru [(TSP+BC) || (BTPC)] (fig. 3.13).

Dacă rezistența de trecere devine 100  $\Omega$  valorile coeficientului  $K_{Uh}$  devin:

- 0,995 -dacă neutrul rețelei este izolat sau tratat prin bobină de compensare (fig. 3.3 și 3.5);
- 0,3 -dacă neutrul este tratat prin rezistor sau bobină de compensare în paralel cu rezistor (fig. 3.4 și 3.10);
- 0,38 -dacă neutrul este tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru (fig. 3.13).

Când rezistența de trecere are valoarea 500  $\Omega$  coeficientul  $K_{Uh}$  devine:

- 0,88 -dacă rețeaua are neutrul izolat (fig. 3.3);
- 0,08 -dacă rețeaua are neutrul tratat prin rezistor sau prin bobină de compensare în paralel cu rezistor (fig. 3.4 și 3.10);
- 0,97 -dacă neutrul este tratat prin bobină de compensare (fig. 3.5 ... 3.9);
- 0,08 -dacă neutrul este tratat prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru (fig. 3.13 ... 3.15).

Din studiul efectuat rezultă că soluția aleasă pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune are o mare importanță asupra solicitării izolației fazelor fără defect, pe durata unei simple puneri la pământ. Din acest punct de vedere soluțiile de tratare a neutrului prin rezistor, prin bobina de compensare în paralel cu rezistor, prin bobină de compensare în paralel cu bobină

de punct neutru sunt net superioare celor de tratare a neutrului prin bobină de compensare sau neutru izolat.

Soluția de tratare a neutrului propusă în lucrare (bobină de compensare în paralel cu o bobină de punct neutru) are practic aceleași performanțe tehnice cu soluția bobina de compensare în paralel cu rezistor. Dacă se ține seama de faptul că valoarea cheltuielilor scad cu aproximativ 40% la soluția propusă față de soluția bobină de compensare în paralel cu rezistor și de faptul că se îmbunătățește fiabilitatea instalațiilor soluția de tratare a neutrului propusă de autor are avantaje certe. De altfel, experiența de exploatare a evidențiat faptul că rezistorul utilizat în tratarea neutrului în timp se poate întrerupe, ceea ce reprezintă un defect grav, deoarece neutru rețelei rămâne izolat, cu consecințele ce decurg din această situație. Pentru semnalizarea unui astfel de defect este necesară realizarea unei instalații speciale ceea ce implică cheltuieli suplimentare.

Deci renunțarea la rezistor în favoarea bobinei trifazate de punct neutru este o soluție mai avantajoasă.

Analiza prin simulare numerică a regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ a permis stabilirea modului în care diverse mărimi influențează evoluția în timp a tensiunilor și curenților. În cazul unei simple puneri la pământ printr-un arc electric continuu sau o punere netă la pământ, valorile maxime ale tensiunii fazelor fără defect depind în principal de faza inițială a tensiunii, respectiv de valoarea tensiunii în momentul apariției defectului. Desigur această creștere importantă a tensiunii fazelor fără defect creează condițiile transformării simplei puneri la pământ într-un defect multiplu, cu consecințe grave asupra instalațiilor aferente liniilor de medie tensiune. În cazul în care neutru rețelei este tratat prin bobină de compensare regimul în care funcționează rețeaua nu influențează semnificativ evoluția tensiunilor și curenților pe durata regimului tranzitoriu. Este important de remarcat faptul că o rezistență de trecere la locul de defect cu o valoare mai mare de  $20 \Omega$  diminuează puternic regimul tranzitoriu la apariția unei simple puneri la pământ, ceea ce permite ca acesta să poată fi neglijat.

Într-o astfel de situație tensiunea fazelor fără defect devine egală cu tensiunea de linie dacă rețeaua are neutru izolat sau tratat prin bobină de compensare. În cazul în care neutru este tratat prin rezistor sau combinat (bobină de compensare în paralel cu rezistor, respectiv bobină de compensare în paralel cu bobină de punct neutru) și rezistența de trecere la locul de defect are o valoare mai mare de  $300 \Omega$ , respectiv tensiunea fazelor fără defect se modifică nesemnificativ comparativ cu regimul normal de funcționare pe durata unei simple puneri la pământ. Desigur, în acest caz, din punct de vedere al solicitării izolației, se poate funcționa timp mai îndelungat cu o simplă punere la pământ. Totuși, într-o astfel de situație nu este de dorit să se funcționeze timp îndelungat cu o simplă punere la pământ, datorită valorilor ridicate ale curenților de defect și a riscului de a se produce electrocutări, prin creșterea tensiunilor de atingere și de pas peste valorile admise prin norme. Studiul regimului tranzitoriu a evidențiat faptul că acesta poate fi semnificativ la apariția simplei puneri la pământ, dar este total nesemnificativ în momentul conectării bobinei de punct neutru în paralel cu grupul (TSP+BC). Deci conectarea bobinei de punct neutru nu poate conduce la apariția unor valori mari a tensiunii fazelor fără defect ci, dimpotrivă micșorează semnificativ tensiunea acestor faze față de cazul când neutru rețelei este tratat prin bobina de compensare, dacă rezistența de trecere la locul de defect depășește valoarea de  $20 \Omega$ .

Dacă faza inițială a tensiunii la apariția defectului este aproximativ  $90^\circ$  supratensiunile fazelor fără defect pot ajunge până la 48% din tensiunea acestor faze când simpla punere la pământ a ajuns în regim stabilizat (fig. 4.14)

Rezultatele obținute prin măsurătorile efectuate în sectorul experimental conceput în acest sens au confirmat cele obținute prin calcul analitic, respectiv simulare numerică.

Măsurarea supratensiunilor de comutație la deconectarea întreruptorului liniei pe care s-a produs simpla punere la pământ, în sectorul experimental, a pus în evidență faptul că în varianta de tratare a neutrului propusă de autor acestea au valori mai mici (tabelul 5.9) ceea ce este confirmat și de datele din literatură [3, 14, 15, 29, 41, 105, 106].



O concluzie importantă a studiului realizat în lucrare constă în aceea că indiferent de soluția aleasă pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune funcționarea cu simplă punere la pământ timp îndelungat este extrem de periculoasă datorită condițiilor create pentru a se transforma într-un defect multiplu.

Principalele contribuții originale pe care apreciez că le-am adus în legătură cu problemele abordate în lucrare sunt:

- sistematizarea studiului bibliografic la zi în legătură cu soluțiile actuale de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune, evidențiindu-se calitățile și neajunsurile fiecăreia din aceste soluții;
- conceperea schemelor circuitelor primare a soluției de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune combinat prin bobină de compensare (TSP + BC) în paralel cu bobina de punct neutru (BTPC);
- conceperea temei de proiectare a bobinei de punct neutru, astfel încât curentul de defect la o simplă punere la pământ să fie 300 A;
- stabilirea unor relații de calcul analitic a defectelor din rețelele electrice, utilizând metoda componentelor simetrice, luându-se în considerare nesimetria tensiunilor de la locul de defect înaintea apariției acestuia și a dezechilibrului parametrilor transversali ai rețelelor electrice;
- definirea unui coeficient  $K_{Uh}$  care permite determinarea operativă a tensiunilor și curenților ce caracterizează o simplă punere la pământ;
- stabilirea parametrilor ce influențează valorile coeficientului  $K_{Uh}$  funcție de soluția aleasă pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune;
- stabilirea parametrilor ce influențează valoarea tensiunii fazelor fără defect pe durata regimului tranzitoriu provocat de o simplă punere la pământ într-o rețea de medie tensiune;
- conceperea și realizarea sectorului experimental în care rețeaua de medie tensiune are neutrul tratat comutabil prin bobină de compensare, respectiv prin bobină de compensare în paralel cu bobina de punct neutru.
- conceperea schemelor și efectuarea măsurărilor în sectorul experimental conceput în acest sens pentru a verifica rezultatele obținute analitic respectiv prin simulare numerică.

În urma analizei modului de comportare al rețelelor de medie tensiune pe durata unei simple puneri la pământ, atât în regim tranzitoriu cât și în regim stabilizat, în funcție de soluția aleasă pentru tratarea neutrului, rezultă că varianta propusă de autor este superioară celor utilizate până în prezent.

**BIBLIOGRAFIE**

1. Albert H., Florea I., Iordănescu I. *Alimentarea cu energie electrică a întreprinderilor industriale*; Editura tehnică. București, 1979.
2. Anderson E.I. *Étude des surtensions internes dans les réseaux MT*; Bulletin de la Direction des Études et Recherches – EdF nr.1/2, 1983.
3. Anderson E.I., Maziarz S. *Surtension apparaissant lors des défauts monopolaires et bipolaires à la terre dans les réseaux MT*; Bulletin de la Direction des Études et Recherches – EdF nr.2, 1984
4. Antoniu I.S. *Chestiuni speciale de electrotehnică*; Ed. Acad. R.P.R., Bucuresti, 1956.
5. Arafteh S.A., Schinzinger R. *Estimation algorithms for large scale power systems*; I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.6, 1979, p. 1968 – 1980.
6. Arie A., Dumitriu C. *Folosirea componentelor simetrice ale liniilor electrice compensate pentru calculul căderilor de tensiune în liniile electrice necompensate*; Conf. Națională de electrotehnică și energetică Timișoara, sept.1982, vol.10, p.27 – 37.
7. Bălan Gh. *Influența tratării neutrilor asupra siguranței în funcționare a rețelelor de medie tensiune*; Teză de doctorat. I.P. – Bucuresti, 1978.
8. Balzer G. *Măsurători de impedanță în rețele de joasă tensiune pentru stabilirea curenților de scurtcircuit*; Lucrare de dizertație, Universitatea tehnică din Darmstadt, 1977.
9. Balzer G., HeiB W.A. *Influence du régime du neutre sur les tensions et courants en cas de défaut*; Simpozionul Internațional “Neutre MT: Quel devenir?” 7- 8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
10. Bercovici M., Arie A. *Aplicarea unor operatori de ortogonalitate pentru determinarea defectelor nesimetrice, multiple în rețele electrice*; Studii și cercetări de energetică și electrotehnică, nr.2, 1968, p.403 – 425.
11. Bercovici M., Arie A., Poată Al. *Rețele electrice. Calculul electric*; Ed. Tehnică, București, 1974.
12. Bercovici M., Arie A., Tudose M. *Aspecte privind aplicarea teoriei componentelor simetrice în analiza regimurilor nesimetrice ale rețelelor electrice*; Bul. șt. și tehn.al I.P. București, XXIX, nr.4, 1967, p.101 – 131.
13. Bergeal J., F. Sultanem *Neutre moyenne tension et normes internationales*; R.E.E., nr.2, 1996.
14. Buta A., ș.a. *Câteva observații în legătură cu optimizarea funcționării rețelelor cu neutrul tratat prin bobină de stingere*; Simpozionul național de rețele electrice, Cluj – Napoca, 1996.
15. Bergeal J., Sultanem F. *Neutre MT et Normalisation: Le point de vue du normalisateur*; Simpozionul Internațional “Neutre MT: Quel devenir ?” 7-8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța sau *Neutre moyenne tension et normes*

- internationales*– Revue de L'électricité et de L'électronique REE, nr.2, feb. 1996
16. Berthet L., Meunier R. *Maintien de la fourniture pendant un défaut monophasé MT: l'expérience acquise au poste de Guebwiller*; Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir?" 7-8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
  17. Berthet L., R.Meunier *Maintien de la fourniture pendant un défaut monophasé moyenne tension*; R.E.E., nr.2, 1996.
  18. Blume W., *Computer Circuit Simulation*; Byte, July, 1986, p.165.
  19. Bogoevici N., Toader D. *Nesimetria tensiunilor la o rețea electrică trifazată în regim de scurtcircuit monofazat*; Simpozionul național al rețelelor electrice, oct.1984, Timișoara, vol.III, p.92 – 104.
  20. Chua, L.O., Lin P.M., *Computer-aided analysis of electronic circuits*; Prentice-Hall, 1975.
  21. Clarke Ed. *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice*; Traducere selectivă din lb. Engleză (S.U.A.). Ed. Tehnică București, 1973.
  22. Clement M., Daniel D.,Bergeal J. *Évolution du régime de neutre moyenne tension à Électricité de France*;
  23. Clement M., Tromeur B. *Évolution de neutre MT à EDF sur les réseaux ruraux. La conduite du changement*; Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir?" 7-8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
  24. Crișan O. *Sisteme electroenergetice*; Ed. Did.și ped. București,1979
  25. Curelaru Al. *Probleme de stații și rețele electrice*;Ed. Scrisul Romanesc , Craiova,1979
  26. Dabkowski J. *The calculation of magnetic coupling from overhead transmission lines*; I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.8, 1981, p. 3850-3861.
  27. Dawalabi .F, Mukhedkar D. *Parametric Analysis of grounding grids*; I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.5, 1979, p. 1855-1866.
  28. Dawalabi .F, Mukhedkar D. *Soil effects on ground fault currents*; I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.7., 1981, p.3442-3451.
  29. Deri A.,Tevan G., Sem-lyen A., Castanheira A. *The complex ground return plane – a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return*; I.E.E.E.Transaction on P.A.S. nr.8 ,1981, p.3686-3699.
  30. Dimo P. *Modele REI și indicatori de stare. Sisteme energetice interconectate*; Ed. Acad. R.S.R. București, 1979
  31. Dordea T. *Mașini electrice*; Editura didactică și pedagogică București, 1970.

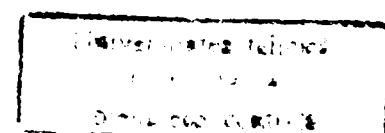
32. Drăgan G. *Supratensiuni interne în sistemele electroenergetice*; Ed.Tehnică București, 1975
33. Drăgan G., Adămuț I., Petcu M. *Analogie computer investigation into surges appearing on opening capacitive and inductive circuits*: Rap. CIGRE. 1966.
34. Druml Ge. *Détection des défauts à la terre très résistans sur les réseaux compensés*: R.E.E., nr.2, 1996.
35. Dufornet D. *Modélisation de l'arc. Aplication à la coupure des disjoncteurs H.T.*; Rev. Gen. Electr. nr.1, 1982, p. 26-31.
36. Faletti N. *La mise à la terre du neutre des réseaux de distribution à moyenne tension*;L'Energia Electrica nr. 5 , 1975, p. 421-430.
37. Fawraud J. *Calcul des courants de court-circuit*: E.D.F., Paris, 1967.
38. Fawraud J. *Fonctionnement et protection des réseaux de distribution*; E.D.F., Paris, 1967.
39. Fawraud J. *Fonctionnement et protection des réseaux de distribution*; 1979, Centre de Formation des Mureaux, EDF – GDF, Service de la Formation Professionnelle.
40. Fickert L., Schweer A. *Détection et localisation des défauts à la terre*; R.E.E.. nr.2, 1996.
41. Fickert L., Schweer A. *Le régime du neutre sur les réseaux MT et son influence sur la qualité de distribution d'énergie st sur l'exploitation de réseau*;Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir?" 7 – 8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
42. Fronticelli G. *Considerations, tendances, essais et expérience d'exploitation relatifs aux réseaux à moyenne tension à neutre isolé*; L'electrotecnica nr.4, 1964, p.252-261.
43. Gavrilă G. *Contribuții privind studiul fenomenelor electromagnetice tranzitorii în bobine și transformatoare*; Teză de doctorat. I.P.București, 1985.
44. Gavrilaş N., Gușa M. *Considerații privind tratarea neutrului rețelelor electrice în cabluri*; Prima conf. a Energ. din România , oct.1975, București.
45. Gheorghiu I.S., Fransua A.S. *Tratat de mașini electrice vol.III Mașini asincrone*; Ed. Acad. R.S.R., București, 1971.
- 46.. Gheorghiu I.S., Fransua A.S. *Tratat de mașini electrice vol.IV Mașini sincrone*; Ed. Acad. R.S.R., București, 1972.
47. Goia L., Bălan Gh., Tănăsescu Al., Ișvan T. *Tratarea neutrului rețelelor de medie tensiune*; Ed.Tehnică , București, 1985.
48. Gregoire J. L., Klaja D. *Neutre MT et exploitation a EDF*; Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir ?" 7-8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.

49. Griffel D., Harmand Y., Bergeal J. *Nouvelles techniques de mise à la terre des neutres sur les réseaux MT*; RGE nr. 11, decembrie 1994
50. Griffel D., Berthet L., Bergeal J. Un bon réseau doit garder les pieds sur terre: EDF – DER. Epure. nr.47, iulie 1995
51. Handschin E., Koning D. *Le traitement du point neutre dans les réseaux de moyenne tension*; Revue de L'électricité et de L'électronique REE. nr.2. feb.1996
52. Handschin E., Koning D. *Le traitement du point neutre dans les réseaux de moyenne tension*; R.E.E. nr.2, 1996, pag.20.
53. Handschin E., Koning D. *Neutre MT – Les bases*; Simpozionul International "Neutre MT: Quel devenir?" 7 – 8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
54. Happ H. *Diakoptica – metodă de analiză a sistemelor complexe*; Traducere din limba engleză. Ed.Tehnică, București 1975.
55. Haubrich H.J., Schmitt O. *Influence des couplages entre-systemes sur la capacité d'extinction des défauts des réseaux de distribution*; Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir?" 7 – 8 noiembrie 1995. Mulhouse – Franța
56. Hobson J.E., Whitehead D.L. *Simmetrical components*; Electrical Transmission and distribution Reference Book, Westinghouse, Pittsburg, 1964.
57. Hortopan Gh. *Modelul geometric și electromagnetic al transformatorului*; Electrotehnica nr.9, 1961, p.381-386.
58. Hristea Vl. *Relevé de courant directionnel homopolar*; Simpozionul Național de Rețele Electrice, Oct.1984, Timișoara, vol.2, p.28-105.
59. Iacobescu G., Iordănescu I., Tudose M. *Rețele și sisteme electrice*; Editura didactică și pedagogică, București, 1979.
60. Iacobescu Gh., Iordănescu I., ș.a. *Rețele electrice*; Ed. Didactică și Pedagogică București, 1981.
61. Ionescu G., Baciu A. *Rețele electrice de distribuție*; Ed.Tehnică, București, 1981.
62. Ionescu Tr. *Tendențe și concepții noi în structura și analiza rețelelor de distribuție din marile orașe*; Prima Conf. a Energ. din România. Oct.1975, București.
63. Junber M., Th. Connor *Changement du mode de mise à la terre du neutre moyenne tension d'un réseau régional*; R.E.E., nr.2, 1996.
64. Junker M., Connor T. *Changement du mode de mise à la terre du neutre moyenne tension d'un réseau régional – L'exemple de réseau 20 kV de Rhénanie du Nord – Westphalie*; Revue de L'Électricité et de L'Électronique REE, nr.2, feb.1996 și Simpozionul International "Neutre MT: Quel devenir?" 7 – 8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.

65. Juston Ph., Griffel D. *Mise à la terre du neutre MT des réseaux ruraux. La solution française ;* Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir ?" 7-8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
66. Juston Ph., Griffel D. *Puneri la pământ în rețele electrice rurale;* (traduceri din Revue de l'Électricité et de l'Électronique, nr.2/1996). Buletin informativ F.R.E. Baia Mare, nr.5, 1996, pag.45.
67. Koppl G., Frey F. *Les réseaux 65 kV en Valais. Concept pour l'amélioration de la structure et de la possibilité d'interconnexion;* Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir?" 7 – 8 noiembrie 1995, Mulhouse – Franța.
68. Koppl Ge., Fr. Frey *Interconnexion des différents régimes du neutre d'un réseau régional;* R.E.E., nr.2, 1996.
69. Lacroix B.,  
Roudaire J.F. *Les équipements de mise à la terre et de protection;* R.E.E., nr.2, 1996.
70. Lindeman D. *Prescriptions de sécurité pour les lignes électrique aériennes de distribution a basse et moyenne tension;* U.I.P.D. d'Énergie Électrique, Paris, 1972.
71. Linder, A.C. *Un autotransformateur à couplage en zig-zag met à la terre le neutre d'un réseau de distribution;* Electrical World, nr.16, oct. 1961.
72. Manea A. *Protecția selectivă a rețelelor electrice de medie tensiune cu neutrul izolat împotriva punerilor la pământ;* Prima Conf.a Energ. din România, oct. 1975, București.
73. Marched A.S., Tench G.A., Kundur P. *Accurate calculation of asymmetrical fault currents in complex power systems;* I.E.E.E. Transaction on P.A.S, nr.8 , 1981, p.3785-3803.
74. Maurin J. *Apport des charges tournantes au courant de court-circuit des réseaux moyenne tenssion;* Rev. Gen. De Électr., nr.9, 1970, p.708-714.
75. Meliopoulos A.P., Webb R.P., Joy E.B. *Computer simulation of faulted URD cables. Analysis and results;* I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.4, 1981, p.1545-1561.
76. Michalik M., W. Reizant *Optimization of MV network neutral point earthing mode with respect to transient ground-fault overvoltage;*
77. Mocanu C. *Teoria circuitelor electrice;* Ed. Did. și Ped., București, 1979.
78. Moretti M. *Le problème du neutre dans les réseaux à moyenne tenssion;* L'Electrotecnica, nr.8, 1963, p.559-566.
79. Nahman J., Salamon D. *Analytical expressions for the resistance of grounding grids in nonuniform soil;* I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.4, 1984, p. 880-885.
80. Nemeș M. *Analiza fenomenelor tranzitorii de comutație în rețelele electrice cu elemente terminale de tip reactor transversal și autotransformator;* Teză de doctorat I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1975.

81. Neunstocklin V., Behrens H.H. *Régime de neutre dans les installation industrielles moyenne tension; Simpozionul Internațional "Neutre MT: Quel devenir? 7 – 8 noiembrie 1995. Mulhouse – Franța.*
82. Novac I. *Mașini electrice; Lit. U.R. Timișoara. 1978.*
83. Olefs E. *Choix de régimes du neutre moyenne tension sur sites industriels; R.E.E., nr.2, 1996.*
84. Paris L., Reggiani F., Camellini E. *L'évolution du réseau de distribution primaire en relation à la continuité du service et au niveau des courants de court-circuit; I.E.E. Conference Publication nr. 99. C.I.R.E.D., London, 1973.*
85. Pelissier R. *Les réseaux d'énergie électrique; Dunod technique, Paris, 1976.*
86. Peterson H. A. *Transients in power systems; Willey and sons. Inc.N.Y. 1951*
87. Poată Al., Arie A. ș.a. *Transportul și distribuția energiei electrice; Ed.Did. și Ped. București, 1981.*
88. Poată Al., Crișan O., ș.a. *Transportul și distribuția energiei electrice; Ed. Didactică și Pedagogică București, 1981.*
89. Pop E., Stoica V. *Măsurări în energetică; Ed. Facla, Timișoara. 1981.*
90. Potoloea E. *Calculul regimurilor de funcționare ale sistemelor electroenergetice; Ed. Tehnică, București, 1977.*
91. Rüdénberg R. *Fenomene tranzitorii în sistemele electroenergetice; Editura tehnică, București, 1959.*
92. Rueger M., Stolte E. *Realisation optimale du point neutre dans les réseaux à moyenne tension; Elektrizität – wirtschaft, vol.69, nr.21, 1970 , p.565-570.*
93. Sarmiento H.G., Fartin J., Mukhedkar D. *Substantion ground impedance. Comparative field measurements with high and low current injection methods; I.E.E.E. Transaction on P.A.S., nr.7, 1984, p.1677-1683.*
94. Savin GH., Rosman H. *Circuite electrice neliniare și parametrice; Ed.Tehnică, București, 1973.*
95. Scheiber E., Lixăndroiu D. *Mathcad. Prezentare și probleme rezolvat; Ed. Tehnică București, 1994.*
96. Selischi Al. *Alegerea reactanțelor pentru transformatoarele de alimentare ale serviciilor interne; Energetica nr.5 , 1976, p.172-175.*
97. Șora C. *Bazele electrotehnicii; E.D.P. București, 1982.*
98. Șora C., Toader D., Hărăguș St. *Modelarea și simularea unor subsisteme energetice neliniare în regim de avarie; Protocol Grant nr. 7004/1997, U.P. Timișoara.*

99. Stănciulescu Fl. *Analiza și simularea sistemelor neliniare*; Ed. Acad. R.S.R., București, 1974.
100. Stein M., Vatră F., Radu C., Butănescu Gh., Voiculescu A., Poenaru A., Fulea C. *Utilizarea întrerupătoarelor de șuntare, o soluție de creștere a performanțelor tehnologice și de fiabilitate a rețelelor electrice de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistență*; Simpozionul Național de Rețele Electrice – SNRE'96. 3 – 4 octombrie 1996. Cluj Napoca.
101. Sabath J., ș.a. *Analog computer study of switching surge transient systems*; IEEE-Trans. Pow. App. and Syst. nr.1, 1966.
102. Sufrim M., Hristea Vl., Ceuță M. *Noi prevederi în concepția de realizare a rețelelor de medie tensiune cu neutrul legat la pământ prin rezistori*; Simpozionul Național în probleme de energetică și proiectare, oct.1985, Bacău.
103. Toader D. *Analiza și dimensionarea optimală a unui sistem de filtrare în scop de protecție în rețele de medie tensiune*; Bul. Șt. și Tehn. al IPTVT Timișoara, 26(40) – Fasc.1, 1981, p.33-40.
104. Toader D. *Distribuția curenților la o simplă punere la pământ într-o rețea de 20 kV*; Bul. Șt.al U.P. Timișoara, 1995, p.27.
105. Toader D., Hărăguș Șt. *Numerical modelling of transient phenomena triggered by a single-grounding fault in a medium voltage power network*; Analele Univ. Oradea, 1999.
106. Toader D., Hărăguș Șt. *Numerical simulation of transient phenomena triggered by single-grounding faults*; Acta universitas cibiniensis, electrotechnics, electronics and computer sciences, 1998, p.52.
107. Toader D., Hărăguș Șt. *The calculus of capacitive currents on the functional phases in the condition of a simple grounding*; Analele Univ. Oradea, 1997, p.126.
108. Toader D., Hărăguș Șt. *The influence of operating regime on the voltage and currents in a medium voltage distribution network during a single grounding fault*; Acta Cibiniensis Electrotechnic Electronics and Computer Science, 1998.
109. Toader D., Hărăguș Șt. *Variation of homopolar voltage power network with switchable neutral compensation*; Analele Univ. Oradea, 1999.
110. Toader D., Hristea Vl. *Calculul curentului de scurtcircuit monofazat prin rezistența de trecere foarte mare în rețele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor*; Energetica nr.5,1986, p. 228-233.
111. Toaxen V.ș.a *Bobina de punct neutru cu comutare automată prin întreruptor*; Propunere Brevet Invenție OSIM.
112. Toaxen V., Curcanu G. *Study and experiments of medium voltage network neutral pointing earthing mode*; Procedeeng, SIELA'99, 22-28 mai 1999 Plovdiv, Bulgaria.
113. Toaxen V., ș.a. *Contribuții la concepția și aplicarea sistemului de tratare combinată a*





- *neutrului rețelei aeriene sau mixte de 20kV*; Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice; martie 1998.
114. Toaxen V., ș.a. *Calculul conductoarelor de curent pentru instalațiile criogenice*; Colocviu național de criogenie, crio-electrotehnică și electrotehnică aplicată, 29-30 mai 1980, vol I, Craiova.
115. Toaxen V., ș.a. *Unele rezultate experimentale referitoare la comportarea unor dielectrici solizi la temperatura azotului lichid*; Colocviu național de criogenie, crio-electrotehnică și electrotehnică aplicată, 29-30 mai 1980, vol I, Craiova.
116. Toaxen V., ș.a. *Unele probleme ale proiectării criotransformatoarelor rezistive*; Colocviu național de criogenie, crio-electrotehnică și electrotehnică aplicată, 29-30 mai 1980, vol I, Craiova.
117. Toaxen V., ș.a. *Particularități constructive și rezultate experimentale obținute la încercarea transformatoarelor criorezistive cu azot lichid*; Simpozionul național al rețelelor electrice 6-8 octombrie 1982, Craiova.
118. Toaxen V., ș.a. *Probleme de proiectare a bornelor de ieșire ale criotransformatoarelor*; Conferința națională de electrotehnică și electroenergetică; Timișoara 16-18 septembrie 1982 vol III.
119. Toaxen V., ș.a. *Sistem de protecție electrică și termică pentru transformatoare criorezistive*; Colocviu național de crio-electrotehnică III, 1983 .
120. Toaxen V., ș.a. *Probleme de proiectare a bornelor de ieșire ale criotransformatoarelor*; Electrotehnica 34, nr. 2, februarie 1986.
121. Toaxen V., ș.a. *Some consideration on computing characteristic quantities for a single-grounding fault in a medium voltage power network*; Conferința internațională de energetică , Timișoara, nov. 1999.
122. Toaxen V., ș.a. *Numerical simulation of transient phenomena triggered by an intermittent earthing arc in a medium voltage power network*; Conferința internațională de energetică , Timișoara, nov. 1999
123. Tuinenga P.W. *SPICE – A guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice*; Prentice – Hall, 1988.
124. Verma R., Mukhedkar D. *Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids*; I.E.E.E. ; Transaction on P.A.S. nr.3, 1981, pag.1023-1038.
125. Verschoore J. *Choix du régime de neutre d'un réseau industriel haute tension I à 36 kV*; RGE nr.11, nov. 1980.
126. Vlach J., Opal A. *Modern CAD Methods for Analysis of Switched Networks*; IEEE Trans. On Circ. And Syst., no.8, August, 1997.
127. \*\*\* *Application guide on method of neutral grounding of transmission systems*; AIEE Comitee Report PAS part. III 1953.

128. \*\*\* *Calculul și proiectarea sistemelor electroenergetice*; Editura tehnică. București, 1971.
129. \*\*\* *Cercetări, experimentări și propuneri de asimilare pentru stabilirea soluțiilor de tratare a neutrului rețelelor de servicii proprii din termocentrale prin rezistență. Faza B1 – Actualizarea studiului privind stadiul actual al problemelor legate de funcționarea rețelelor de servicii proprii cu neutrul legat la pământ prin rezistență*; Studiu elaborat de ISPE în 1987.
130. \*\*\* *Concepția de dezvoltare a rețelelor electrice orășenești. Îmbunătățirea structurii rețelelor de distribuție*; Directive tehnice nr.239/7, 1977, CIRE și ICEMENERG București.
131. \*\*\* *Directive privind trecerea rețelelor de medie tensiune existente la soluția cu neutrul legat la pământ prin rezistență ohmică*; Circulară tehnică CIRE nr.3 CT 88 – 82.
132. \*\*\* *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*; Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh Pennsylvania, SUA, 1964.
133. \*\*\* *Guide Technique de la Distribution. Instalation de comande et de contrôle*; E.D.F. Paris, 1971.
134. \*\*\* *Guide technique de la distribution. Réglage des protection*; E.D.F. Paris, 1972.
135. \*\*\* *Harmoniques dans les réseaux moyenne et haute tension provoquées par des appareils à commande par contrôle de phase*; I.E.E. Conf. Publication nr.99, C.I.R.E.D., London, 1973.
136. \*\*\* *Soluții pentru reducerea numărului de întreruperi în alimentarea consumatorilor din rețelele electrice aeriene de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistență*; Lucrare elaborată de SIER în 1995.
137. \*\*\* IE – Ip – 35/1 – 82. *Îndreptar de proiectare pentru rețele de medie tensiune cu neutrul legat la pământ prin rezistor. Stații de transformare*; CIRE – SCP, București, 1982.
138. \*\*\* IE – Ip – 35/2 – 82. *Instalații de legare la pământ în rețele aeriene de medie tensiune*; CIRE – SCP, București, 1982.
139. \*\*\* IE – Ip – 35/3 – 83. *Instalații de legare la pământ în rețele subterane de medie tensiune*; CIRE – SCP, București, 1983.
140. \*\*\* PE – 147/83. *Instrucțiuni de proiectare privind tratarea neutrului în rețele de medie tensiune*; CIRE – SCP, București, 1983.
141. \*\*\* PE – 501/85. *Normativ pentru proiectarea protecțiilor prin relee și automatizărilor instalațiilor electrice ale centralelor și stațiilor*; CIRE – SCP, București, 1985.
142. \*\*\* PE-109/92. *Normative privind alegerea izolației, coordonarea izolației și protejarea instalațiilor electroenergetice împotriva supratensiunilor*.

**ANEXA 1**  
**STANDARD DE FIRMĂ**  
**BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV**

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP" T" nr: 197/1998	
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Înlocuiește: Fila                      1/9	
AVIZAT BENEFICIAR.  <b>1.GENERALITĂȚI</b>  1.1. Obiect Prezentul standard se referă la bobina trifazată de legare la pământ, în ulei, cu înfășurări din cupru, cu răcire naturală a uleiului, la frecvența de 50Hz.  1.2. Domeniu de aplicare Bobina este utilizată pentru a crea noul artificial în rețele de 20 kV la F.D.E.E.Tg.Jiu.  1.3. Documente de referință STAS 1703/1,2,3,4,5,7-80-Transformatoare de putere. STAS 1703/6-77-Transformatoare de putere. STAS 10381/1,2,3,4-76- Transformatoare. Terminologie generală. Subansamble și părți componente. Mărimi caracteristice. Funcționare. Încercări. STAS 811-83-Uleiuri electroizolante STAS 10307-75-Fiabilitatea produselor industriale. Indicatori de fiabilitate STAS 6692-83-Protecție climatică. Tipuri de protecție climatică. STAS 8009-80-Protecția suprafețelor climatice. Acoperiri prin vopsire. Metode de verificare. STAS 6391/1-86-Treceri izolate pentru tensiuni alternative peste 1 kV. Condiții tehnice de calitate. STAS 10911-77-Fiabilitate, mentenabilitate și disponibilitate. Culegerea datelor privind comportarea în exploatare a produselor industriale. STAS 7222-90-Acoperiri metalice. Metode de verificare a aderenței. STAS 6854-90-Acoperiri metalice. Determinarea grosimii stratului prin metoda cu picături. SR EN 60529;1995-Grade de protecție asigurate prin carcasă. Clasificare. Metode de verificare. SRISO 2409-1994-Vopsele și lacuri. Încercarea la carioiaj. CEI-289-Bobine de reactanță. CEI 76/1,2,4,5-76- Transformatoare de putere. CEI 76/3-80-Transformatoare de putere. Nivele de izolație și încercări dielectrice.		APROBAT. Dep. Strategie Dezvoltare <b>MANAGER</b> ing. V.Scarlat	
Elaborat de S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA ACP Trafo	Data aprobării  24.09.1998	Data intrării în vigoare  Septembrie 1998	

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPOTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP'T nr: 197/1998	
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Înlocuiește:	
		Fila	2/9

## 1.4. Notare

Exemplu de notare  
BTP-ONAN-20kV

## 1.5. Tipuri reprezentative

Produsul se execută într-un singur tip constructiv pentru 20 kV.

## 1.6. Terminologie

Conform STAS 10381/1--- 4-76

## 1.7. Clasificare

Nu este cazul

## 1.8. Simbolizare

Simbolizarea produsului se face conform documentelor în vigoare în vederea emiterii comenzilor necesare.

B-Bobina

T-trifazată

P-Împământare

ONAN-circulație naturală a uleiului și aerului conform STAS 1703/2-80

20- tensiune nominală

kV-unitate de măsură a tensiunii

## 1.9. Codificare

Produsul se codifică la la producător printr-un grup de șapte caractere.

## 1.10. Durata de viață

Durata normală de funcționare (utilizare) este de 30 ani

## 1.11. Cerințe de mediu înconjurător

1.11.1. Funcționare în exterior în zone de climat N, STAS 6692-83

1.11.2. Categoria de exploatare 1, STAS 6692-83

1.11.3. Umiditate relativă la 25°C 70-90%

1.11.4. Temperatura mediului ambiant -minimă -35°C

-maximă +40°C

1.11.5. Altitudine maximă în timpul utilizării: 1000 m

## 1.12. Cerințe constructive, funcționale și de altă natură

1.12.1. Circuitul magnetic se realizează din tablă silicoasă laminată la rece, cu cristale orientate.

1.12.2. Înfășurarea este din conductor de cupru izolat cu hârtie.

1.12.3. Cuva, capacul, conservatorul se execută din tablă de oțel. Etanșarea capacului se face cu garnitura. Sistemul de răcire este constituit din radiatoare. Cuvă este prevăzută cu urechi de ridicare.

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPOTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP" T" nr: 197/1998	
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE	Înlocuiește:	
	LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Fila	3/9

1.12.4. Șchelele metalice se realizează din profile de oțel U. Șchelele sunt prevăzute cu găuri pentru manevrarea părții active, iar la partea inferioară cu tălpi pentru așezarea în cuva bobinei.

1.12.5. Uleiul utilizat este de tip Tr 30 conform STAS 811-83 sau Tr 25 A.

1.12.6. Bobina este prevăzută cu treceri izolate conform STAS 6391/1-86. Trecerile izolate sunt montate pe capac și etanșate cu garnitură. Linia de fugă a trecerii de 24 kV este de 440 mm.

1.12.7. Nivelul de ulei este indicat de o nivelă de ulei prevăzută pe conservator.

1.12.8. Bobina se montează pe calea de rulare și are posibilitate de blocare a roților.

1.12.9. Bobina este prevăzută cu următoarele accesorii:

- conservator de ulei cu nivelă de ulei și buson de umplere
- filtru silicagel
- releu de gaze cu 2 flotoare
- termometru cu cadran
- robinet pentru golirea cuvei și pentru luarea probelor de ulei
- borne de legare la pământ
- supapă de siguranță cu acționare rapidă
- cărucior cu roți rabatabile în două direcții perpendiculare
- eticheta cu date tehnice
- trafo de curent montat pe neutrul de 20 kV CIT 0,5TF-50/5/5 A, 10P10, 30 VA
- cutie exterioară montată pe cuvă prevăzută cu 4 borne pentru racordarea înfășurărilor secundare ale transformatoarelor de curent.

## 2. CONDIȚII TEHNICE DE CALITATE ȘI CRITERII DE ACCEPTARE

### 2.1. Materiale

2.1.1. Materialele și semifabricatele din care se execută bobina sunt conform cu documentația și tehnologia fabricantului.

### 2.2. Dimensiuni și mase. Valorile informative ale dimensiunilor și greutateilor sunt:

- lungime	mm	1830
- lățime	mm	1280
- înălțime	mm	1945
- greutate totală	kg	2650
- greutate ulei	kg	580

### 2.3. Caracteristici constructive, funcționale, fizice, mecanice

2.3.1. Tensiunea nominală a rețelei	kV	20
2.3.2. Tensiunea maximă în regim de durată	kV	22
2.3.3. Frecvența nominală	Hz	50
2.3.4. Conexiune	-	ZN
2.3.5. Curent de defect de scurtă durată	A	300/5s
Ciclul de funcționare garantat la defect de scurtă durată		3 șocuri de 5 s cu intervale de 1 s
2.3.6. Curent maxim de defect de lungă durată	A	50/2h
2.3.7. Impedanța homopolară	Ω/fază	115
2.3.8. Pierderi la mers în gol la tensiune și frecvența nominală	W	350

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPOTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP™ nr: 197/1998	
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Înlocuiește:	
		Fila	4/9

2.3.9. Curent de mers în gol la tensiune și frecvență nominală	A	0,4
2.3.10. Pierderi în înfășurări în regim de funcționare la defect de lungă durată	W	10000/2h
2.3.11. Supratemperatura înfășurării după o solicitare de lungă durată	°C	65
2.3.12. Supratemperatura maximă a uleiului	°C	60
2.3.13. Suprapresiunea de încercare la etanșitate	Pa	$0,2 \times 10^5$
2.3.14. Suprapresiunea de încercare a cuvei	Pa	$0,5 \times 10^5$
2.3.15. Abateri limită de la valorile garantate sunt conform CEI 76.		

2.4. Condiții privind aptitudinile de funcționare

Bobina poate funcționa numai după ce s-a făcut inspecția privind montajul general și amplasarea la locul de funcționare, cu respectarea instrucțiunilor și procedeelelor indicate în cartea tehnică a mașinii, elaborată de proiectant și pusă la dispoziție de fabricant odată cu livrarea produsului.

2.5. Condiții privind securitatea, sănătatea sau calitatea vieții persoanei.

Bobina este prevăzută cu borne de punere la pământ.

Gradul de protecție al bobinei este IP54 pentru partea activă și IP00 pentru ieșiri conform STAS 5325-79.

Accesul la bobină este permis numai când aceasta este scoasă de sub tensiune

2.6. Condiții privind funcționarea în timp la acțiunea factorilor mediului înconjurător.

Bobina trebuie să reziste în exploatare, în perioada transportului (efectuat în condițiile precizate la pct.5.2. precum și în perioada depozitării (efectuată în condițiile precizate la pct.5.3.) la acțiunea îndelungată a factorilor climatici precizate la pct.1.11.

2.7. Condiții privind acțiunea produsului asupra mediului înconjurător

Bobina în exploatare normală nu are acțiune dăunătoare asupra mediului înconjurător

2.8. Condiții privind protecția contra coroziunii în funcționarea de durată

2.8.1. Protecția suprafețelor exterioare se face prin vopsire în sistemul practicat de fabricant. Grosimea stratului de vopsea va fi de minim 80 μm.

2.8.2. Protecția electrochimică a organelor de ansamblare, se face conform NP1-1/87 și desenelor de execuție.

2.9. Condiții privind fiabilitatea și mentenabilitatea

2.9.1. Din punct de vedere al construcției bobina este un produs reparabil.

2.9.2. Indicatorii de fiabilitate previzionali sunt:

- MTBF=49500 ore
- nivel de încredere=0,8
- rata defectării= $0,202 \times 10^{-4}$
- disponibilitate A=0,995
- media timpului de reparații MTR=249 ore

2.9.3. Testele se efectuează pe baza datelor din exploatare.

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPOTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP" T" nr: 197/1998	
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Înlocuiește: Fila 5/9	

2.9.4. Prelucrarea datelor din exploatare se face de către fabricant.

2.9.5. Condițiile de mentenabilitate se găsesc în cartea tehnică a produsului.

### 3.REGULI DE VERIFICAREA CALITĂȚII

Produsul care face obiectul prezentului standard se supune următoarelor încercări cuprinse și în tabelul 1 din prezentul standard de firmă:

- de tip
- individuale
- speciale
- fiabilitate

Încercările de tip se execută pe tipuri reprezentative la asimilarea în fabricație a bobinei, după modificările de materiale sau modificări introduse în construcția și în proiectul tehnologic care pot influența caracteristicile bobinei.

Încercările individuale sunt acelea care se execută pe fiecare bobină.

Încercările speciale sunt acelea care se execută la cererea beneficiarului.

Încercările de fiabilitate sunt de determinare și verificare a conformității indicatorilor de fiabilitate.

Încercările de tip și individuale sunt cele prevăzute în tabelul 1.

Nr.crt.	Denumirea lucrării	Condiții tehnice		Metode de încercare		Categoriile de încercare	
		Cf.CEI (STAS)	Cf.S F	Cf.CEI (STAS)	Cf.S F	Tip	Individuale
0	1	2	3	4	5	6	7
3.1. Încercări preliminare							
3.1.1.	Măsurarea rezistenței de izolație a înfășurării	STAS 1703/1-80	-	STAS 1703/7-80	-	x	x
3.1.2.	Măsurarea rezistenței ohmice a înfășurării în c.c.	STAS 1703/1-80 CEI-76 par.8.2.	-	STAS 1703/7-80	-	x	x
3.2. Încercări dielectrice							
3.2.1.	Încercarea cu tensiune aplicată (TA)	STAS 1703/3-80 CEI 76-3	-	STAS 1703/3-80	-	x	x
3.2.2.	Încercarea cu impuls de tensiune de trăsnet ITT cu unda plină	STAS 1703/3-80 CEI 76-3	-	STAS	-	x	-



M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA		STANDARD DE FIRMĂ			S.F.EP" T" nr: 197/1998		
		BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV			Înlocuiește:		
					Fila	6/9	
0	1	2	3	4	5	6	7
3.2.3.	Încercarea cu impuls de tensiune de trăsnet ITT cu unda tăiată	"	-	"	-	x	-
3.2.4.	Încercarea cu tensiune indusă (TI) fără măsurarea descărcărilor parțiale	STAS 1703/3-80 CEI 76-3	-	STAS 1703/3-80	-	x	-
3.3. Încercarea la mers în gol							
3.3.1.	Măsurarea pierderilor la mers în gol	STAS 1703/7-80	2.3.8.	STAS 1703/7-80 CEI 76-1	-	x	x
3.3.2.	Măsurarea curentului de mers în gol	"	2.3.9.	"	-	x	x
3.4. Încercarea la scurtcircuit							
3.4.1.	Măsurarea pierderilor la scurtcircuit în regim de funcționare la defect de lungă durată	STAS 1703/7-80 CEI 76/1-80 par.8.4.	2.3.10	STAS 1703/7-80	-	x	x
3.5. Încercarea la încălzire							
3.5.1.	Determinarea supratemperaturii înfășurării și a uleiului după o solicitare de defect de lungă durată	STAS 1703/1-80 CEI 76-3 par.41.6.	2.3.11 2.3.12	STAS 1703/2-80 CEI 76-2	-	x	-
3.6. Alte verificări							
3.6.1.	Încercarea la ținare la curent de defect de scurtă durată	CEI 76-5 par.2.2.	-	-	4.1.4.	x	-
3.6.2.	Măsurarea impedanței homopolare	CEI 76-1 par.41.5	2.3.7.	CEI 76-1 par.8.7.	-	x	x
3.6.3.	Verificarea etanșeității la ulei a cuvei	-	2.3.13	STAS 1703/7-80	-	x	-
3.6.4.	Verificarea rezistenței mecanice a cuvei	-	2.3.14	STAS 1703/7-80	-	x	-
3.6.5	Verificarea acoperirilor de protecție: -vopsire -acoperire de protecție	- -	2.8.1 2.8.2	- -	4.1.2 4.1.3.	x x	x -

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP™ nr: 197/1998
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Inlocuiește: Fila   7 9

0	1	2	3	4	5	6	7
3.6.6.	Determinarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice tgδ și a rigidității dielectrice a uleiului (înainte de umplerea bobinei și la 72 h după umplere)	811/83	-	6799/81	-	x	x
3.6.7.	Verificarea dimensiunilor	-	2.2	-	4.1.1.	x	x
3.6.8.	Încercări pe trafo de curent	Caiet de sarcini producător		Caiet de sarcini producător		x	x

#### 4. METODE DE ÎNCERCARE

4.1. Metodele de verificare sunt conform STAS 1703/2,3,4,5,7-80, CEI 289 cu precizările și completările din prezentul standard de firma.

4.1.1. Condiția tehnică de pct.2.2. se verifică prin măsurare conform documentației.

4.1.2. Condiția tehnică de la pct.2.8.1 se verifică la încercările de tip și individuale astfel:

- aspect conform STAS 8009-80
- aderență conform SR ISO 2409-1994
- grosime conform SR ISO 2808-1993

Se acceptă dacă nu apar modificări de peliculă (basicari, exfolieri)

4.1.3. Condiția tehnică de la 2.8.2 se verifică la încercările de tip, astfel

- aspect conform STAS 7222/90
- aderența conform SR EN ISO 2819-1996
- grosime conform STAS 6854-90

4.1.14. Condiția tehnică de la pct. 2.3.5. se verifică prin calcul.

4.2. Încercările de fiabilitate, de determinare se vor efectua la 2 ani după punerea în funcțiune, iar cele de verificare din 5 în 5 ani prin urmărire în exploatare conform STAS 10911/77 și STAS 10307/75.

#### 5. MARCARE, CONSERVARE, AMBALARE, TRANSPORT, DEPOZITARE, DOCUMENTE DE ÎNȘOȚIRE, INVENTAR DE LIVRARE

##### 5.1. Marcare

Bobina este prevăzută cu eticheta indicatoare marcată conform STAS 1703/1-80. Marcarea bornelor de punere la pământ se face cu semnul convențional.

##### 5.2. Ambalare, transport

Bobina se livrează nambalată. Transportul se face conform indicațiilor din cartea tehnică.

##### 5.3. Depozitarea și conservarea

Depozitarea și conservarea se face în conformitate cu cartea tehnică a produsului.

##### 5.4. Documente de însoțire

- raport de încercare
- certificat de garanție

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP" T" nr: 197/1998			
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Înlocuiește:			
		Fila	8/9		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- declarația de conformitate</li> <li>- cartea tehnică</li> <li>- raport de urmărire în exploatare conținut în cartea tehnică</li> <li>- inventar de livrare</li> </ul> <p>Bobina se livrează complet montată, însoțită de documentele precizate la pct 5.4.</p> <p style="text-align: center;"><b>6. TERMEN DE GARANȚIE</b></p> <p>Termenul de garanție pentru bobină este de 12luni de la data punerii în funcțiune, dar nu mai mult de 18 luni de la livrare cu respectarea instrucțiunilor din cartea tehnică a produsului.</p> <p style="text-align: center;"><b>7. ANEXE</b></p> <p style="text-align: center;">Anexa 1- Indicatorul modificărilor</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">           Inginer șef, Ing. Morariu N.         </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">           Șef secție, ing. Matei I             Șef proiect ing. Răduț C.         </td> </tr> </table> <p>Unități participante la elaborare:</p>				Inginer șef, Ing. Morariu N.	Șef secție, ing. Matei I  Șef proiect ing. Răduț C.
Inginer șef, Ing. Morariu N.	Șef secție, ing. Matei I  Șef proiect ing. Răduț C.				
Elaborat de S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA ACP Trafo	Data aprobării 24.09.1998	Data intrării în vigoare Septembrie 1998			

M.I.-D.S.E.E. S.C.ELECTROPUTERE S.A. CRAIOVA	STANDARD DE FIRMĂ	S.F.EP" T" nr: 197/1998	
	BOBINĂ TRIFAZATĂ DE LEGARE LA PĂMÂNT 20 kV	Înlocuiește:	
		Fila	9/9

Anexa 1.

## INDICATORUL MODIFICĂRILOR

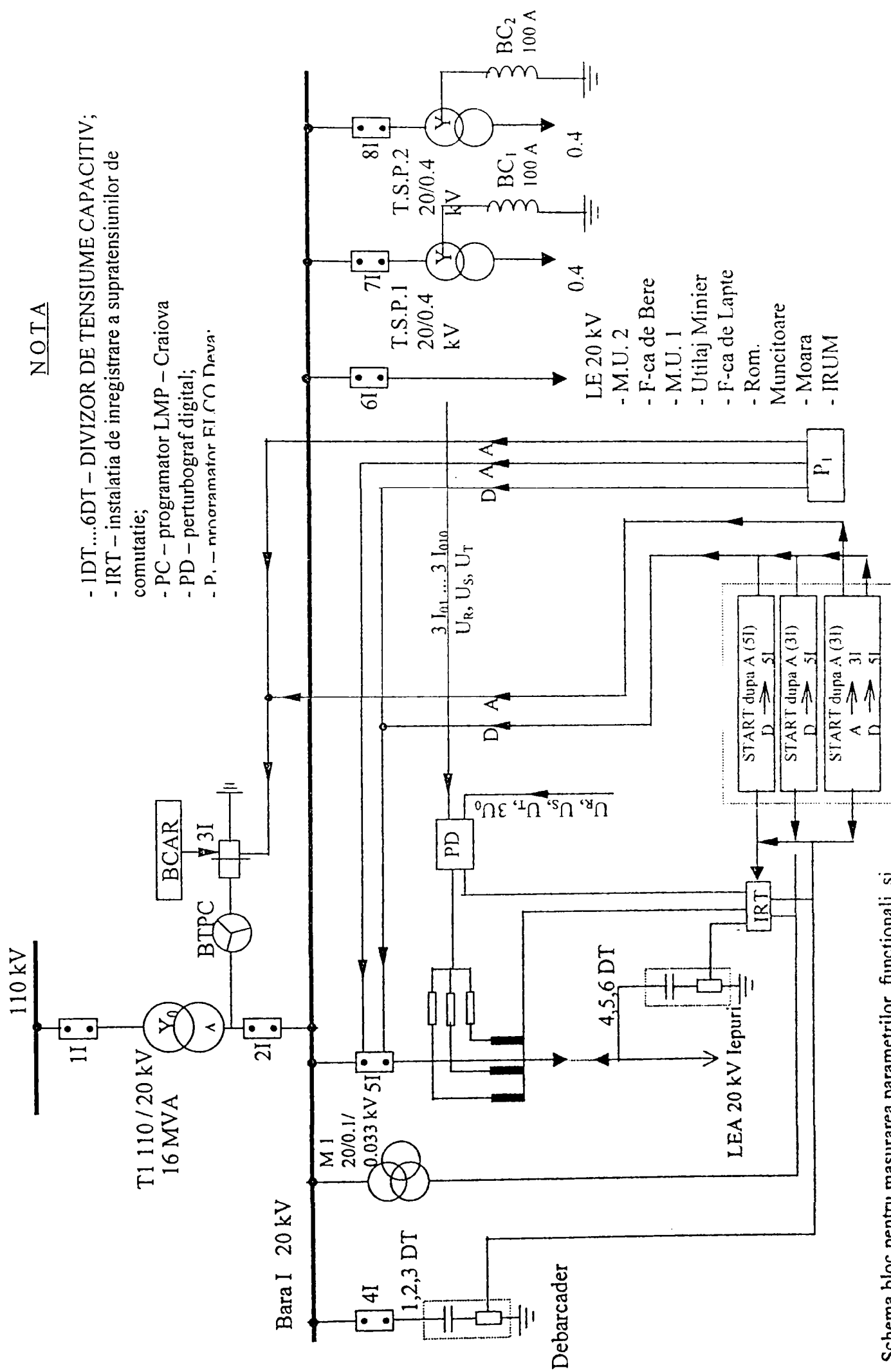
Nr.înreg.	Nr.document și data intrării în vigoare	Titlul documentului	Înregistrat de :	Semnătura și ștampila
-----------	--	---------------------	------------------	--------------------------

## **ANEXA 2**

Schema bloc pentru măsurarea parametrilor funcționali și supratensiunilor de comutație la defecte cu s.p.l.p. în rețeaua mixtă cu bobină BTPC<sub>1</sub> în structura (TSP+BC)|| BTPC

NOTA

- 1DT...6DT – DIVIZOR DE TENSIIUNE CAPACITIV;
- IRT – instalatia de inregistrare a supratensiunilor de comutatie;
- PC – programator LMP – Craiova
- PD – perturbograf digital;
- P<sub>1</sub> – programator FI.CC Deva.

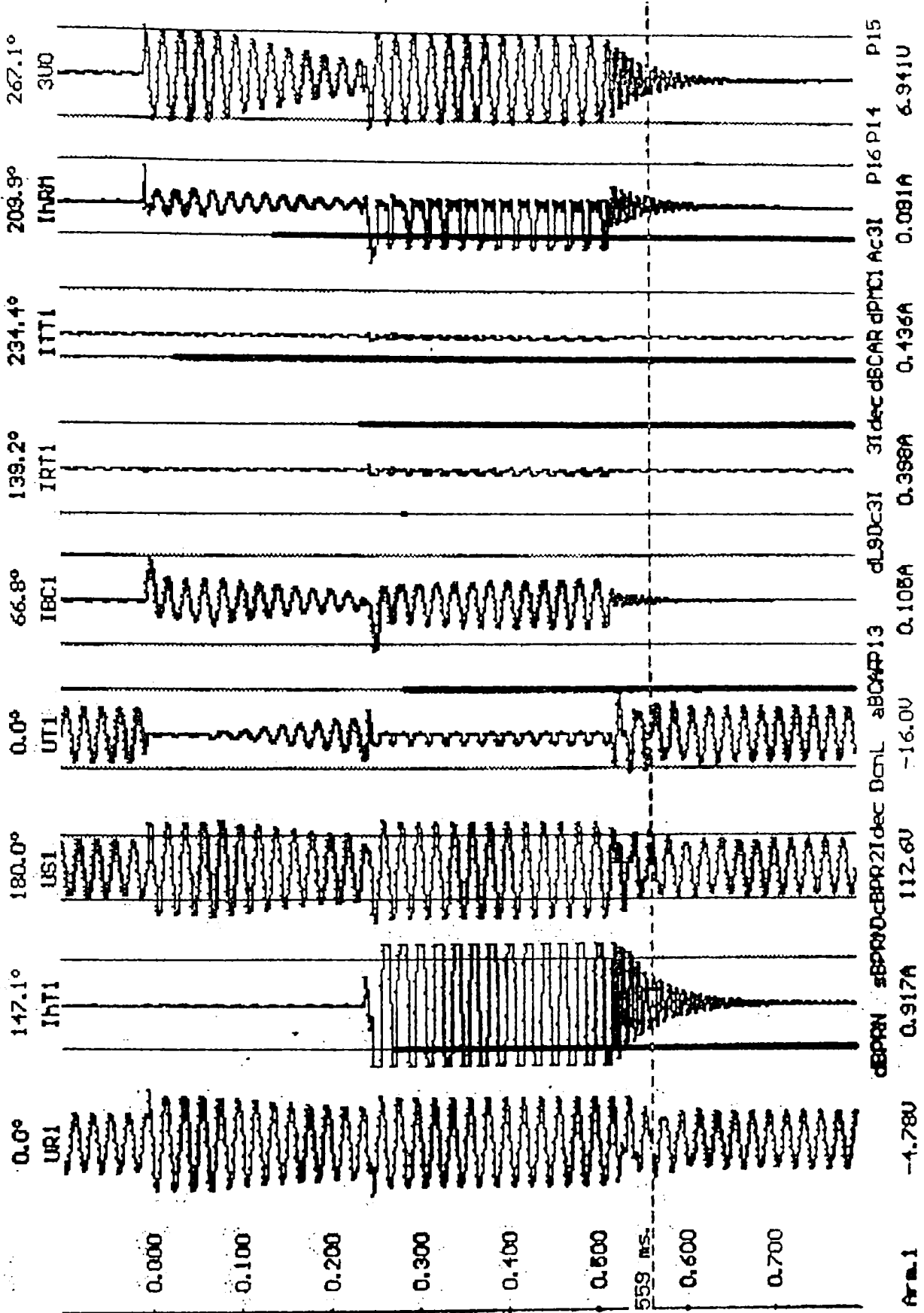


Schema bloc pentru masurarea parametrilor functionali si supratensiunilor de comutatie la defecte cu s.p.l.p. in retea mixta cu bobina BTPC<sub>1</sub> in structura (TSP+BC) || BTPC

**ANEXĂ 3**  
Oscilograme obținute din măsurători în sectorul experimental

PDM A PDM-0326 - PDM A 06-09-1998 17:37:09

No info available

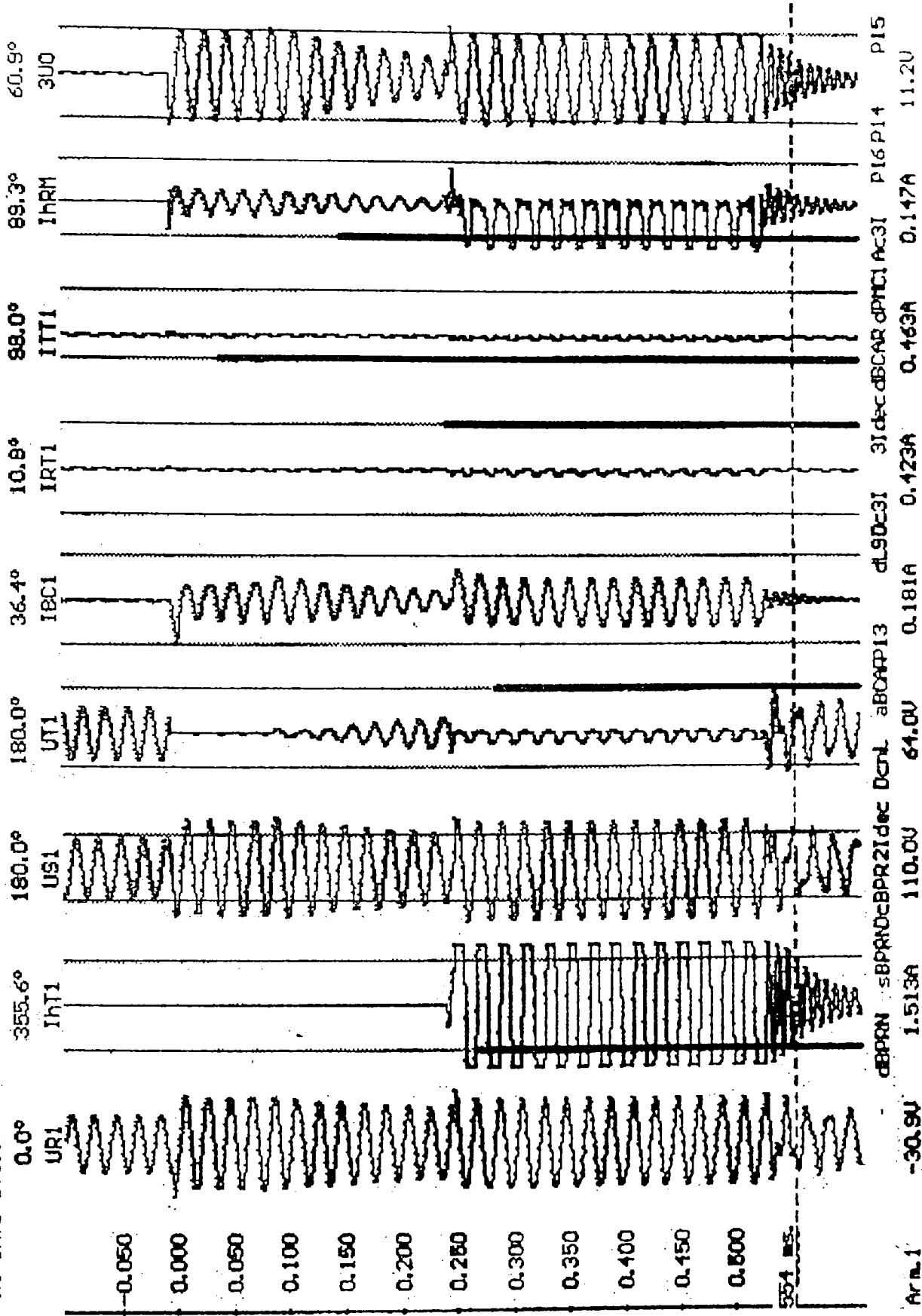


Proba I - 1/2



POM A POM-0326 - POM A 06-09-1999 19:16:29

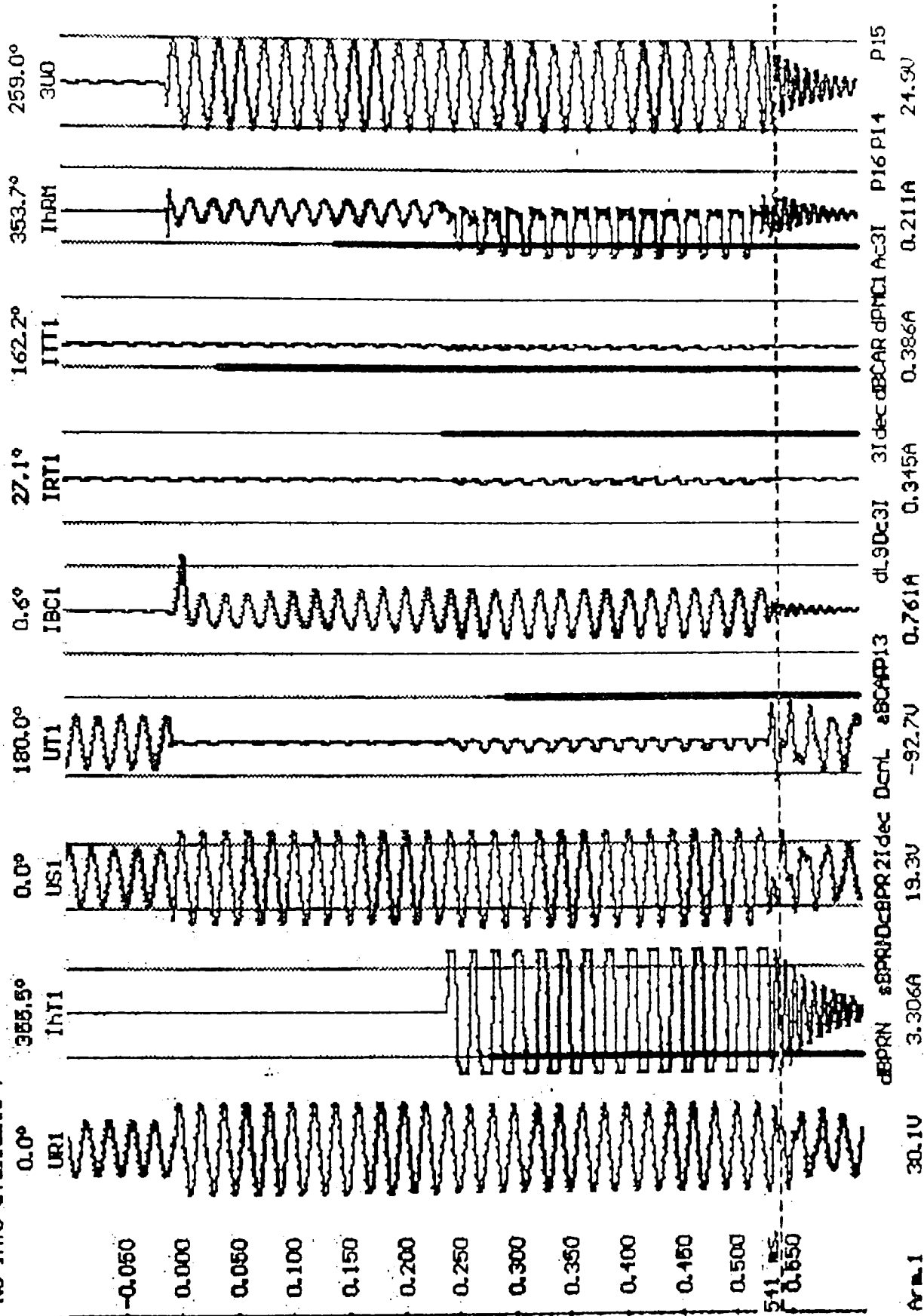
No info available!



Proba I - 1/5

PDM A PDM-0326 - PDM A 06-09-1999 20:02:08

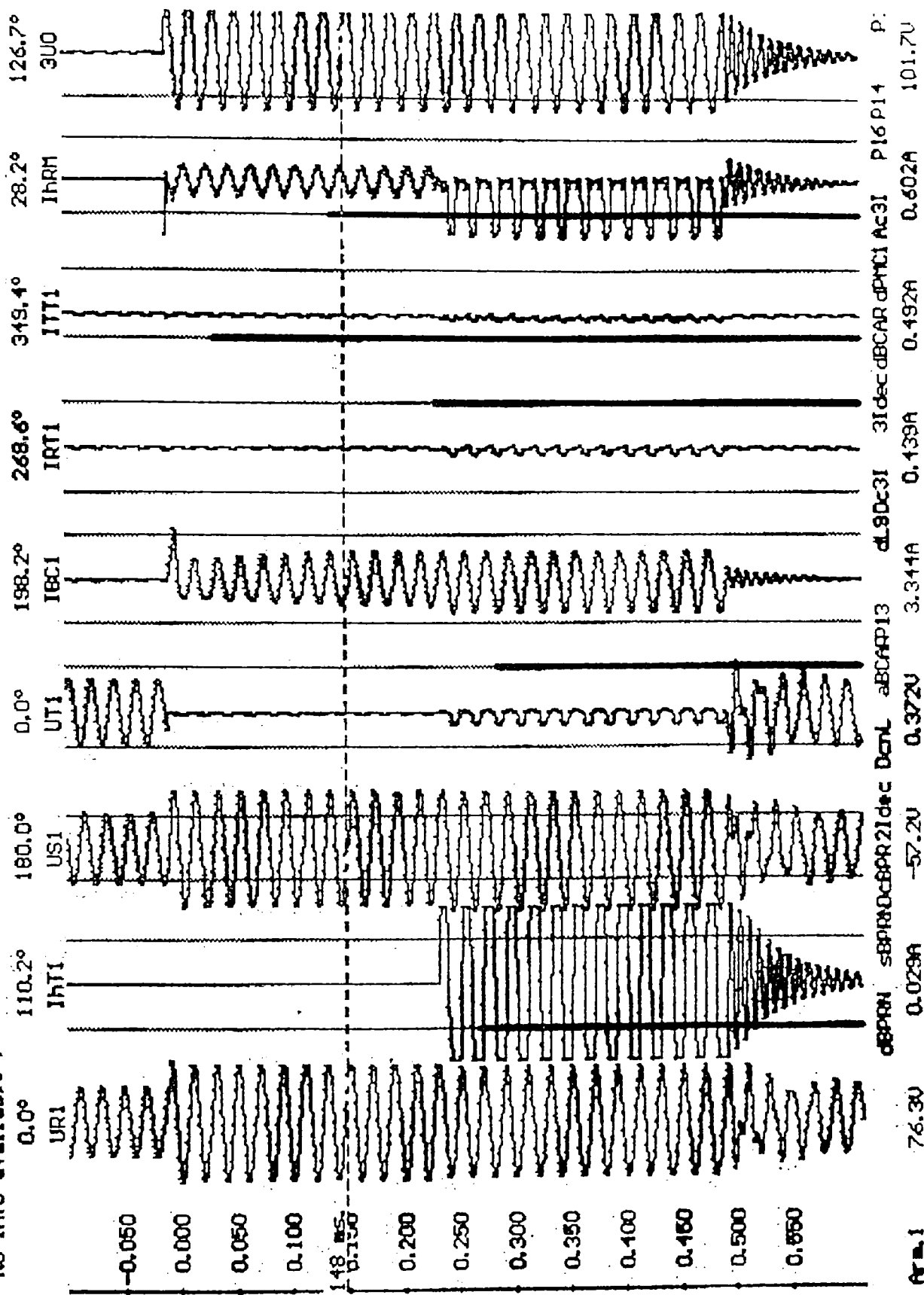
No info available!



Proba I - 2/2

POM A POM-0326 - POM A 06-09-1999 20:16:10

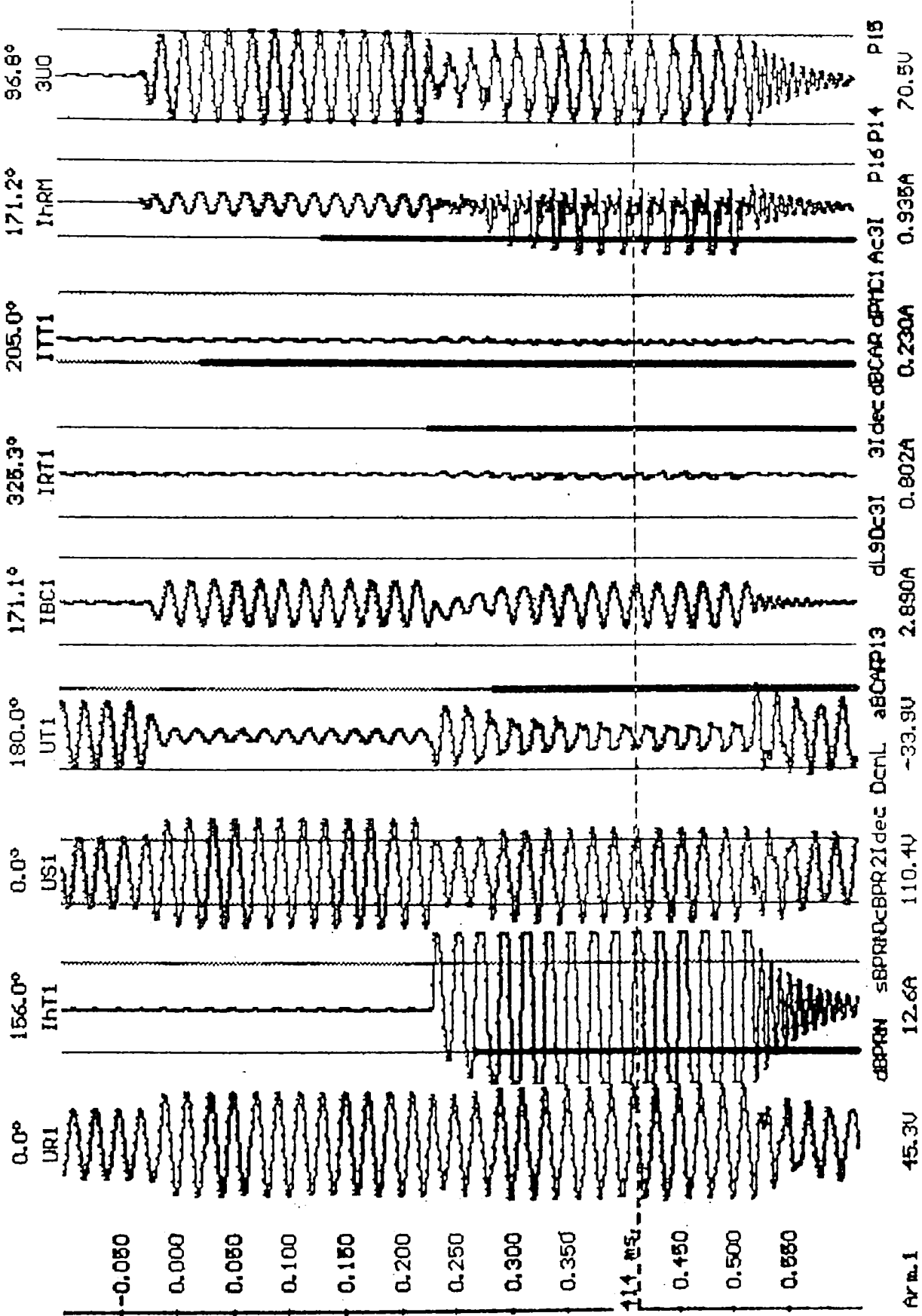
No info available



Proba I - 3/1

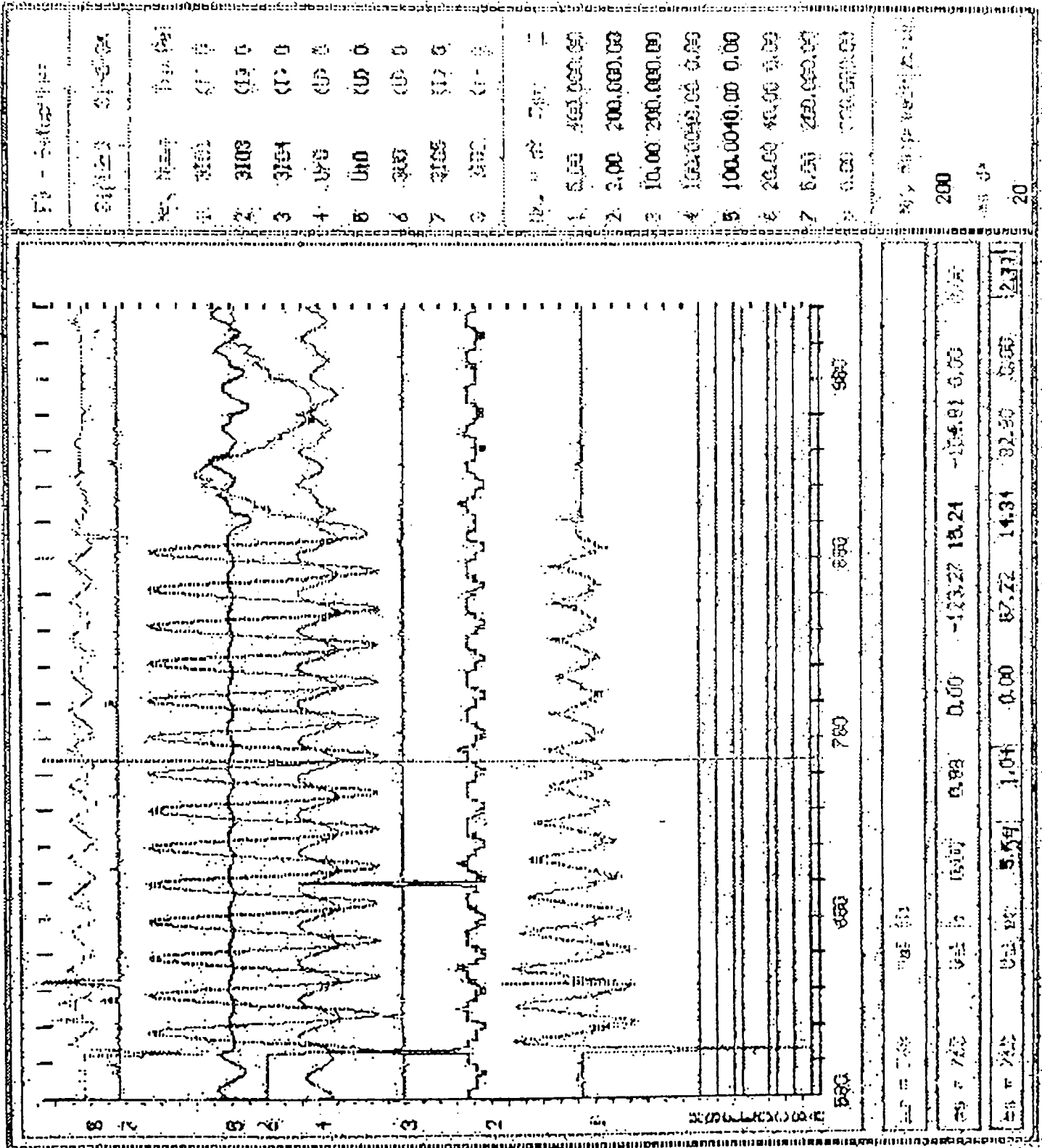
PDM A PDM-0326 - PDM A 06-09-1999 20184122

No info available |



Proba I - 4/1

$\Sigma I_c = 23 \text{ A}$   
 $R_l = 3,9 \Omega$   
 Retea cu nulul  
 izolat



86  
 87