

INSTITUTUL POLITEHNIC „TRAIAN VULĂ” TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ

Ing. Dumitru TOADRE

„CONTRIBUȚII PRIVIND STUDIUL DEFECTELOR DE TIPUL
CONDUCTOR ÎNTERIȘT SI CAZUT LA PĂMÎNT, ÎN REȚELE
ELECTRICE DE MEDIU TENSIUNE”

Teză de doctorat

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof.dr.ing. Constantin SORA

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA „POLITEHNICĂ”
TIMIȘOARA

- 1986 -

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ
Volumele 359 - H
Data

C U P R I N S

	<u>Pag.</u>
Introducere	5
1. Calculul nesimetrilor într-o rețea trifazată	9
1.1. Generalități	13
1.2. Nesimetrii transversale	18
1.2.1. Scurtcircuit monofazat prin rezistență de trecere mare	18
1.2.2. Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ prin rezistență de trecere mare	22
1.3. Nesimetrii longitudinale	24
1.3.1. Creșterea impedanței pe o fază	24
1.3.2. Creșterea impedanței pe două faze	26
1.4. Calculul nesimetrilor într-o rețea trifazată folosind operatorii și factorii complecși de nesimetrie..	28
1.4.1. Definirea factorilor și operatorilor complecși de nesimetrie	28
1.4.2. Calculul unui scurtcircuit monofazat folosind factorii și operatorii complecși de nesimetrie.	30
1.5. Nesimetrii multiple	33
1.5.1. Stabilirea ecuației generale	33
1.5.2. Elementele nesimetrice leagă între ele trei rețele simetrice	35
2. Analiza defectelor de tip conductor întrerupt și căzut la pământ	38
2.1. Conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator	38
2.1.1. Stabilirea expresiei tensiunii U_{hb} și a curentului I_n	38
2.1.2. Dependența tensiunii U_{hb} și a curentului I_n de condițiile în care are loc defectul	45
2.2. Conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă ...	52
2.2.1. Stabilirea expresiei tensiunii U_{hb} și a curentului I_n	52
2.2.2. Dependența tensiunii U_{hb} și a curentului I_n de condițiile în care are loc defectul	58
2.3. Simplu punere la pământ	61
2.3.1. Stabilirea expresiei tensiunii U_{hb} și a curentului I_n	61
2.3.2. Dependența tensiunii U_{hb} și a curentului I_n de condițiile în care are loc defectul	65
3. Metoda modelizării de analiză a defectelor de tip conductor întrerupt și căzut la pământ	69
3.1. Criterii de similitudino	70
3.1.1. Transformatoare	70
3.1.2. Lini electric	72
3.1.3. Mașini electrice	73
3.2. Model electrodinamic de rețea	76
3.2.1. Descrierea elementelor modelului	79

3.2.2. Calculul reactanței mutuale dintre bobinele utilizate pentru modelizarea liniei de medie tensiune	93
3.2.3. Determinări experimentale pe modelul de rețea...	100
4. Determinări experimentale în rețeaua reală de medie tensiune	105
4.1. Rezultatele măsurărilor efectuate în stația 110/20 kV Oriștie	105
4.2. Rezultatele măsurărilor efectuate în stația 110/20 kV Hirbonț	111
4.3. Rezultatele măsurărilor efectuate în stația 110/20 kV Simeria	115
5. Senzizarea defectelor de tip conductor întrerupt și căzut la pământ	120
5.1. Senzizarea neselectivă a punerilor la pământ	120
5.1.1. Senzizarea neselectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin rezistor	120
5.1.2. Senzizarea neselectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat	136
5.2. Senzizarea selectivă a punerilor la pământ	139
5.2.1. Senzizarea selectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat	139
5.2.2. Senzizarea selectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin rezistor	144
Concluzii	147
Bibliografie	154

INTRODUCERE

În rețelele de distribuție de medie tensiune se întâlnesc pe plan mondial un număr foarte mare de trepte de tensiune [63]. Cele mai frecvent utilizate sînt treptele de 10 kV și 20 kV. Tendința actuală este de-a se generaliza utilizarea treptei de 20 kV. În unele țări europene pentru rețeaua de distribuție s-au generalizat următoarele tensiuni: în Franța - tensiunea de 20 kV; în U.R.S.S. - tensiunea de 10 kV și 20 kV funcția de putere consumatorilor; în R.F.G. - tensiunea de 10 kV; etc. [63]. La noi în țară tensiunile utilizate în rețelele de medie tensiune sînt 6 kV, 10 kV și 20 kV cu tendința de generalizare a tensiunii de 20 kV [146], [151]. În mod normal rețelele de distribuție funcționează radial [122], [151], deși sînt construite pentru a funcționa și buclat. Din acest motiv în prezenta lucrare se i-au în considerare numai rețele radiale, iar calculele și măsurătorile se efectuează în rețele de medie tensiune cu tensiunea 20 kV.

Ocreșterea siguranței în funcționare a rețelelor electrice de medie tensiune impune dotarea acestora cu astfel de protecții încît defectele să fie sesizate înainte de-a deveni nete, într-o fază cît mai incipientă [40], [42], [44], [64]. Este cunoscut faptul că în rețelele electrice (în special cele aeriene) multe scurtcircuite dispar prin scoaterea de sub tensiune a liniei cu defect (defecte autostingătoare). Pentru ca defectele autostingătoare să nu se transforme în scurtcircuite nete este necesar ca scoaterea de sub tensiune a liniei cu defect să se facă imediat după apariția defectului [50], [57], [68], [90]. Aceasta impune și analiza unor defecte care nu erau luate în considerare prin normativele în vigoare de la noi din țară (PE - 501/77; STAS 7334/78; STAS 832/78) la alegerea protecțiilor din rețelele de medie tensiune. Dintre aceste defecte o pondere mare o au simplele puneri la pămînt prin rezistență de trecere mare [57], [59], [61], [90] și defectele de tipul conductor întrerupt și căzut la pămînt [40], [42], [50], [143], [150].

În lucrare se studiază defectele de tipul conductor întrerupt și căzut la pămînt spre sursă sau spre consumator precum și simplele puneri la pămînt ca un caz particular al defectului conductor întrerupt și căzut la pămînt spre sursă. Se analizează modul cum condițiile în care au loc aceste defecte influențează valoarea tensiunii monopolare a barelor de medie tensiune la care este racordată linia cu defect și valoarea curentului ce se închide prin impedanța de tratare a

nulului rețelei de medie tensiune. Se stabilesc condițiile în care aceste defecte pot fi sesizate avându-se în vedere faptul că rețelele de medie tensiune pot fi cu nulul tratat cu bobină de stingere (rezonanță, supracooperat), cu rezistor sau izolat, prin protecțiile existente precum și ce completări sunt necesare a se efectua pentru ca să se micșoreze numărul situațiilor în care aceste defecte nu pot fi sesizate.

Studiul se efectuează utilizând metode analitice (metoda componentelor simetrice) și metoda modelizării. În acest sens s-a realizat un model de rețea în cadrul Laboratorului de Protecții și Automatizări Deva [123]. Rezultatele obținute prin metoda analitică și metoda modelizării se verifică prin măsurători efectuate în rețeaua reală de medie tensiune.

Defectele slabe (prin rezistență de trecere mare) sunt sesizate în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat controlându-se valoarea tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune (U_{hb}), iar în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor controlându-se valoarea curentului din rezistorul de tratare al nulului rețelei (I_n). Din acest motiv se analizează modul în care aceste două mărimi (U_{hb} și I_n) sunt influențate de condițiile în care are loc defectul. Consumatorii deformanți alimentați prin rețeaua de medie tensiune pot determina, în regim normal de funcționare, prin rezistorul de tratare al nulului un curent a cărui valoare poate ajunge până la 5A, dar acest curent conține în principal armonica a 3-a [39], [42], [59], [95], [113], [144], de aceea este necesar ca rețeaua să controlează valoarea acestui curent (RAP-1) [124] să fie prevăzută cu un filtru astfel încât să se controleze numai fundamentală acestui curent. Din același motiv și tensiunea homopolară a barelor de medie tensiune poate ajunge în regim normal de funcționare al rețelei la valori de (4-5)% din tensiunea de fază, dar și această tensiune conține în principal armonica a 3-a. În lucrare se dimensionează un filtru trece jos care să permită funcționarea rețelei (RAP-1) la un curent de 0,5A (50Hz), respectiv să nu funcționeze la un curent de 5 A (150 Hz), prin rezistorul de tratare al nulului, rețeaua fiind montată în secundarul unui transformator de curent cu raportul de transformare la.

În rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat punerile la pământ sunt sesizate selectiv controlându-se conținutul în armonici al curenților homopolari ai liniilor de medie tensiune [5], [63], [90], de aceea este necesar să se analizeze în ce măsură defectele studiate în lucrare conduc la modificarea

conținutului în armonici al curentului homopolar al liniei cu defect.

Elementele care se i-au în considerare la studiul acestor defecte sînt: extinderea rețelei de medie tensiune; extinderea liniei de medie tensiune în spatele defectului; structura și puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect; rezistența de trecere la locul de defect; modul de tratare al nulului rețelei de medie tensiune.

În calculele efectuate se consideră rețeaua ca funcționînd în regim permanent, cu defectul respectiv, de asemenea elementele din schemele de calcul se acceptă ca fiind liniare [5], [25], [34], [40], [62], [83], [86].

Determinările experimentale efectuate în rețeaua reală de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor [57], [59] au scos în evidență faptul că la calculul curentului de scurtcircuit monofazat, dacă scurtcircuitul are loc printr-o rezistență de trecere mare, este necesar să se i-a în considerare nesimetria sistemului de tensiuni de la locul de defect înaintea apariției defectului precum și nesimetria parametrilor transversali ai rețelei de medie tensiune. În lucrare s-au stabilit relații de calcul ale curentului de scurtcircuit ținîndu-se seama de aceste elemente, relații care particularizate conduc la cele date în literatură [2], [10], [21], [25], [26], [31], [38], [41], [54], [62], [63].

Teza conține 5 capitole. După capitolul introductiv, în capitolul 1 se stabilesc relații de calcul ale curenților de scurtcircuit luîndu-se în considerare nesimetria sistemului de tensiuni și a parametrilor transversali ai rețelei. Se abordează și problema defectelor multiple într-o rețea trifazată. În capitolul 2 se stabilesc expresiile analitice ale tensiunii U_{hb} și curentului I_n în cazul defectelor de tipul conductor întrerupt și căzut la pămînt spre sursă sau consumator și a simplilor puneri la pămînt. Se analizează modul în care aceste mărimi depind de condițiile în care se produc defectele respective. În capitolul 3 se prezintă metoda modelizării utilizată în studiul acestor defecte, prezentîndu-se modalul de rețea realizat și rezultatele obținute cu ajutorul modelului respectiv. Rezultatele obținute din măsurătorile efectuate în rețeaua reală de medie tensiune sînt prezentate în capitolul 4. Sesizarea defectelor de tip conductor întrerupt și căzut la pămînt și a punerilor la pămînt prin rezistență de trecere mare cu ajutorul protecțiilor existente și noi dispozitive în acest sens sînt prezentate în capitolul 5. În ultimul capitol se prezintă concluziile și contribuțiile autorului.

Unele probleme abordate în teză au constituit teme la 12 contracte de cercetare științifică [110], ..., [121], încheiate cu Centrala

Industrială de Rețele Electrice - București, Laboratorul de Protecții și Automatizări - Deva. Aceste cercetări au stat la baza realizării unor rețele precum și la elaborarea unor normative de proiectare și exploatare a rețelelor de medie tensiune.

x

x x

Elaborarea lucrării s-a făcut sub îndrumarea permanentă și generoasă a conducătorului științific prof.dr.ing. Constantin Boza, cărui 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 membrilor Laboratorului de Protecții și Automatizări - Deva și în special șefului de laborator ing.Vladimir Hristea a căror colaborare a fost esențială în efectuarea măsurătorilor în rețeaua reală precum și în realizarea modelului de rețea.

Sincere mulțumiri adresează autorul tov.prof.dr.ing.Nicolae Bogoșevici pentru discuțiile deosebit de utile purtate pe parcursul elaborării tezei, precum și pentru contribuția deosebită pe care a avut-o în formarea profesională a autorului. De asemenea, autorul aduce calde mulțumiri tov.conf.dr.ing.Mircea Nemeș pentru amabilitatea manifestată, precum și pentru sugestiile foarte utile efectuate privind conținutul tezei.

Tuturor colegilor din colectivul de bazale electrotehnicii care l-au sprijinit în diferite ocazii, sub diverse forme și l-au încurajat pe toată durata elaborării lucrării autorul le adresează calde mulțumiri.

1. CALCULUL NESIMETRIILOR ÎN REȚELE TRIFAZATE

1.1. 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 [25], [62], [63]. Rețelele electrice de energie pot fi reprezentate prin grafuri constituite din noduri și ramuri [3], [27], [34], [53], [71], [77], [92]. Modelul matematic cel mai des folosit pentru descrierea rețelelor electrice este [34], [92]:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1' \\ U_2' \\ \vdots \\ U_n' \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

în care: I - este matricea coloană a curenților injectați de surse (sau absorbiți de consumatori) în nodurile rețelei; U' - este matricea coloană a tensiunilor nodurilor rețelei, față de un nod de referință care de regulă se consideră pământul; Y - este matricea pătratică a admitanțelor, conținând admitanțele legăturilor dintre noduri în termenii nedijagonal, respectiv suma admitanțelor cu semn schimbat ce leagă nodul respectiv cu celelalte noduri. Aceste ecuații sînt cunoscute sub numele de ecuații nodale.

În [34] se arată că analiza stărilor unui nod se poate face ușor aplicînd schemele R&I (rețea echivalentă independentă). În aceste scheme se elimină nodurile care nu sînt generatoare păstrîndu-se numai cele generatoare.

Echivalînd consumatorii cu impedanțe, se face o aproximație care este larg utilizată în sistemele electrice, servind în acest caz numai pentru reducerea schemei, și se pot scrie relații de forma [21], [25], [91]:

$$I_s = Y_s \cdot U_s \quad (1.2)$$

pentru nodul s .

Dacă se grupează în relațiile (1.1) nodurile în noduri generatoare plus nodul analizat (r astfel de noduri) și noduri consumatoare pentru care se pot scrie relații de forma (1.2) (c astfel de noduri), introducînd relațiile (1.2) în (1.1) se obține:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{X}_{gr} & \underline{X}_{gc} \\ \underline{X}_{or} & \underline{X}_{oc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_r \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Aplicând eliminarea Gauss se reduc toate nodurile o obținând o ecuație de formă:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_g \\ \underline{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{X}_{gg} & \underline{X}_{gj} \\ \underline{X}_{jg} & \underline{X}_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_g \\ \underline{U}_j \end{bmatrix}; \quad (1.4)$$

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

$$\underline{I}_j = \underline{X}_{j1} \cdot \underline{U}_1 + \underline{X}_{j2} \cdot \underline{U}_2 + \dots + \underline{X}_{jj} \cdot \underline{U}_j; \quad (1.5)$$

relație care permite asocierea unei scheme radiale.

Dacă din ecuația (1.4) se elimină și nodurile generatoare, după aceeași metodă se obține o schemă ce conține un singur nod. Deoarece rețeaua se consideră simetrică în ecuația (1.1) s-a operat cu o singură fază [34], [54], [55].

Reducând rețelele simetrice care sînt legate între ele prin elementul nesimetric la cîte un singur nod se obține schema simplificată reprezentată în fig.1.1.

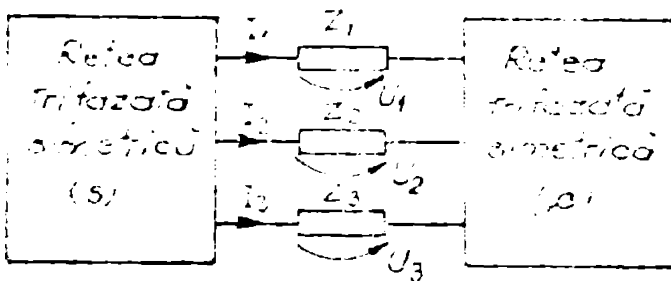


Fig.1.1. Schema simplificată de calcul a unei nesimetrii

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

$$\underline{U}_o = \{ [\underline{Z}_s] + [\underline{Z}_o] \} [\underline{I}] + \underline{U} \quad (1.6)$$

unde:

$$[\underline{U}_o]_t = [U_{o1} \ U_{o2} \ U_{o3}] ;$$

$$[\underline{I}]_t = [I_1 \ I_2 \ I_3] \quad (1.7)$$

$$[\underline{U}]_t = [U_1 \ U_2 \ U_3]$$

$$[\underline{Z}_s] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{114} + \underline{Z}_{141} & \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{142} + \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{114} & \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{114} + \underline{Z}_{113} + \underline{Z}_{143} \\ \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{121} + \underline{Z}_{124} + \underline{Z}_{141} & \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{142} + \underline{Z}_{124} & \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{124} + \underline{Z}_{143} + \underline{Z}_{123} \\ \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{134} + \underline{Z}_{141} + \underline{Z}_{131} & \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{134} + \underline{Z}_{132} + \underline{Z}_{142} & \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{134} + \underline{Z}_{143} \end{bmatrix};$$

$$(1.8)$$

$$[Z_0] = \begin{bmatrix} Z_{01} + Z_{04} + Z_{014} + Z_{041} & Z_{04} + Z_{014} + Z_{042} + Z_{012} & Z_{04} + Z_{014} + Z_{013} + Z_{043} \\ Z_{04} + Z_{021} + Z_{024} + Z_{041} & Z_{02} + Z_{04} + Z_{042} + Z_{024} & Z_{04} + Z_{024} + Z_{043} + Z_{023} \\ Z_{04} + Z_{031} + Z_{034} + Z_{041} & Z_{04} + Z_{032} + Z_{034} + Z_{042} & Z_{03} + Z_{04} + Z_{034} + Z_{043} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Semnificația mărimilor din relațiile (1.7), (1.8), (1.9) 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 tensiune pe elementul nesimetric;

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

Z_1 - matricea impedanță a rețelei simetrice (s);

Z_0 - matricea impedanță a rețelei simetrice (t);

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

În calculul nesimetriei folosim metoda componentelor simetrice. Folosind teorema substituției elementul nesimetric se înlocuiește cu surse a căror tensiună la borne sînt U_1, U_2 respectiv U_3 .

Obținerea componentelor simetrice ale tensiunilor și curenților, din tensiunile și curenții de fază se face înmulțind matricile coloană ale tensiunilor și curenților cu inversa matricii de transformare. Matricea de transformare respectiv inversa acesteia sînt [2], [54], [55], [62], [109]:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad [T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

unde $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ cunoscut sub denumirea de operator de rotație. Componentele simetrice ale tensiunilor și curenților au următoarele expresii:

$$[U]_S = [T]^{-1} \cdot [U]; \quad (1.11); \quad [I]_S = [T]^{-1} \cdot [I]; \quad (1.12)$$

Dacă înmulțim la stînga relația (1.6) cu inversa matricii de transformare se obține relația de legătură între componentele simetrice ale tensiunilor și curenților din schema prezentată în fig.1.1.

$$[U_0]_S = \left\{ [Z_1]_S + [Z_0]_S \right\} [I]_S + [U]_S; \quad (1.13)$$

Matricile componentelor simetrice ale impedanțelor au expresiile:

$$[\tilde{Z}_1]_S = [T]^{-1} \cdot [Z_1] \cdot [T]; \quad [\tilde{Z}_0]_S = [T]^{-1} \cdot [Z_0] \cdot [T] \quad (1.14)$$

Considerând matricile de secvență a impedanțelor ca avînd următoarea structură [2], [4], [8], [29]:

$$[\tilde{Z}]_S = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{hh} & \tilde{Z}_{hd} & \tilde{Z}_{h1} \\ \tilde{Z}_{dh} & \tilde{Z}_{dd} & \tilde{Z}_{d1} \\ \tilde{Z}_{1h} & \tilde{Z}_{1d} & \tilde{Z}_{11} \end{bmatrix}; \quad (1.15)$$

termenii matricilor de secvență $[\tilde{Z}_1]_S$ au expresiile date prin relațiile (1.16)

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{hhh} &= \frac{1}{3} \left[(\tilde{Z}_{11} + \tilde{Z}_{12} + \tilde{Z}_{13}) + 3\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{141} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{143} \right] + \\ &+ (3\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{112} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{143} + \tilde{Z}_{141} + \tilde{Z}_{123} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{131}) + \\ &+ (3\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{113} + \tilde{Z}_{143} + \tilde{Z}_{121} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{141} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{132} + \tilde{Z}_{142})]; \\ \tilde{Z}_{hhd} &= \frac{1}{3} \left[\tilde{Z}_{11} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{141} + a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{12} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{124}) + a(\tilde{Z}_{13} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{143}) + \right. \\ &+ a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{112} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{114}) + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{143} + \tilde{Z}_{123}) + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{141} + \\ &+ \tilde{Z}_{131} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{121} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{141} + a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{132} + \tilde{Z}_{142}) + \\ &+ a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{113} + \tilde{Z}_{143})]; \\ \tilde{Z}_{hh1} &= \frac{1}{3} \left[\tilde{Z}_{11} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{141} + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{12} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{124}) + \right. \\ &+ a^2(\tilde{Z}_{13} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{143}) + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{112}) + \\ &+ a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{143} + \tilde{Z}_{123}) + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{141} + \tilde{Z}_{131} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{121} + \\ &+ \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{141} + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{132} + \tilde{Z}_{142}) + a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{113} + \tilde{Z}_{143})]; \\ \tilde{Z}_{hdh} &= \frac{1}{3} \left[\tilde{Z}_{11} + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{141} + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{12} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{124}) + a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{13} + \right. \\ &+ \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{143}) + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{112} + \tilde{Z}_{142} + \tilde{Z}_{114} + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{143} + \tilde{Z}_{123}) + \\ &+ a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{141} + \tilde{Z}_{131}) + a(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{121} + \tilde{Z}_{124} + \tilde{Z}_{141}) + \\ &+ a^2(\tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{134} + \tilde{Z}_{132} + \tilde{Z}_{142}) + \tilde{Z}_{14} + \tilde{Z}_{114} + \tilde{Z}_{113} + \tilde{Z}_{143}]; \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} Z_{1ad} = & \frac{1}{3} [Z_{11} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{141} + Z_{14} + Z_{12} + Z_{142} + Z_{124} + Z_{13} + Z_{14} + Z_{134} + Z_{143} + \\ & + a^2 (Z_{112} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{14} + Z_{124} + Z_{143} + Z_{123} + Z_{14} + Z_{134} + Z_{141} + Z_{131}) + \\ & + a (Z_{14} + Z_{121} + Z_{124} + Z_{141} + Z_{14} + Z_{134} + Z_{132} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{113} + Z_{143})] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{1a1} = & \frac{1}{3} [Z_{11} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{141} + a^2 (Z_{12} + Z_{14} + Z_{142} + Z_{124}) + a (Z_{13} + Z_{14} + \\ & + Z_{134} + Z_{143}) + a (Z_{112} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114}) + Z_{14} + Z_{124} + Z_{143} + Z_{123} + \\ & + a^2 (Z_{14} + Z_{134} + Z_{141} + Z_{131}) + a (Z_{14} + Z_{121} + Z_{124} + Z_{141}) + Z_{14} + Z_{134} + \\ & + Z_{132} + Z_{142} + a^2 (Z_{14} + Z_{114} + Z_{113} + Z_{143})] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{11h} = & \frac{1}{3} [Z_{11} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{141} + a^2 (Z_{12} + Z_{14} + Z_{142} + Z_{124}) + \\ & + a (Z_{13} + Z_{14} + Z_{134} + Z_{143}) + Z_{112} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114} + a^2 (Z_{14} + Z_{124} + Z_{143} + Z_{123}) + \\ & + a (Z_{14} + Z_{134} + Z_{141} + Z_{131}) + a^2 (Z_{14} + Z_{121} + Z_{124} + Z_{141}) + \\ & + a (Z_{14} + Z_{134} + Z_{132} + Z_{142}) + Z_{14} + Z_{114} + Z_{113} + Z_{143}] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{11d} = & \frac{1}{3} [Z_{11} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{141} + a (Z_{14} + Z_{12} + Z_{142} + Z_{124}) + a^2 (Z_{13} + Z_{14} + \\ & + Z_{134} + Z_{143}) + a^2 (Z_{112} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114}) + Z_{14} + Z_{124} + Z_{143} + Z_{123} + \\ & + a (Z_{14} + Z_{134} + Z_{141} + Z_{131}) + a^2 (Z_{14} + Z_{121} + Z_{124} + Z_{141}) + Z_{14} + Z_{134} + \\ & + Z_{132} + Z_{142} + a (Z_{14} + Z_{114} + Z_{113} + Z_{143})] ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{111} = & \frac{1}{3} [Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + 3Z_{14} + Z_{141} + Z_{142} + Z_{124} + Z_{134} + Z_{143} + \\ & + a (Z_{112} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{14} + Z_{124} + Z_{143} + Z_{123} + Z_{14} + Z_{134} + Z_{141} + Z_{131}) + \\ & + a^2 (Z_{14} + Z_{121} + Z_{124} + Z_{141} + Z_{14} + Z_{134} + Z_{132} + Z_{142} + Z_{14} + Z_{114} + Z_{113} + Z_{143})] ; \end{aligned}$$

Termenii matricii de secvență $[Z_0]_8$ au aceeași formă cu ai matricii $[Z_1]_8$ doar că în locul indicelui „1” apare indicele „c”.

Dacă impedanțele mutuale satisfac condiția de reciprocitate adică $Z_{12} = Z_{21}$; $Z_{13} = Z_{31}$; $Z_{14} = Z_{41}$; $Z_{24} = Z_{42}$; $Z_{34} = Z_{43}$; $Z_{23} = Z_{32}$; expresiile termenilor matricii de secvență se exprimă prin relațiile:

$$Z_{12h} = \frac{1}{3} [(Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + 3Z_{14} + 6Z_{114} + 6Z_{124} + 2(Z_{134} + Z_{112} + Z_{123} + Z_{131}))] ;$$

$$\begin{aligned}
 \hat{h}_{11} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \sigma^2 \hat{h}_{12} + \hat{h}_{13} + \sigma \hat{h}_{14} + \sigma^2 \hat{h}_{24} + \sigma \hat{h}_{34} - \sigma^2 \hat{h}_{12} - \hat{h}_{23} - \sigma^2 \hat{h}_{31}] ; \\
 \hat{h}_{21} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \sigma^2 \hat{h}_{12} + \sigma \hat{h}_{13} + \sigma \hat{h}_{14} + \sigma^2 \hat{h}_{24} + \sigma^2 \hat{h}_{34} - \sigma^2 \hat{h}_{12} - \hat{h}_{23} - \hat{h}_{31}] ; \\
 \hat{h}_{31} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \sigma \hat{h}_{12} + \sigma^2 \hat{h}_{13} + \sigma \hat{h}_{14} + \sigma \hat{h}_{24} + \sigma^2 \hat{h}_{34} - \sigma^2 \hat{h}_{12} - \hat{h}_{23} - \sigma \hat{h}_{31}] ; \\
 \hat{h}_{12} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \hat{h}_{12} + \hat{h}_{13} - \hat{h}_{12} - \hat{h}_{23} - \hat{h}_{31}] ; \\
 \hat{h}_{22} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \sigma^2 \hat{h}_{12} + \sigma \hat{h}_{13} + 2(\sigma \hat{h}_{12} + \hat{h}_{23} + \sigma^2 \hat{h}_{31})] ; \\
 \hat{h}_{32} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \sigma^2 \hat{h}_{12} + \sigma \hat{h}_{13} + \sigma \hat{h}_{14} + \sigma^2 \hat{h}_{24} + \sigma \hat{h}_{34} - \sigma \hat{h}_{12} - \hat{h}_{23} - \sigma^2 \hat{h}_{31}] ; \\
 \hat{h}_{13} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \sigma \hat{h}_{12} + \sigma^2 \hat{h}_{13} + 2(\sigma^2 \hat{h}_{12} + \hat{h}_{23} + \sigma \hat{h}_{31})] ; \\
 \hat{h}_{23} &= \frac{1}{3} [\hat{h}_{11} + \hat{h}_{12} + \hat{h}_{13} - \hat{h}_{12} - \hat{h}_{23} - \hat{h}_{31}] ;
 \end{aligned} \tag{1.17}$$

În situația în care impedanțele matriciale $[\hat{h}_1]$ respectiv $[\hat{h}_0]$ prezintă o simetrie ciclică, adică $\hat{h}_{11} = \hat{h}_{12} = \hat{h}_{13} = \hat{h}_1$;

$$\begin{aligned}
 \hat{h}_{12} = \hat{h}_{23} = \hat{h}_{31} = \hat{h}_1' ; \quad \hat{h}_{14} = \hat{h}_{24} = \hat{h}_{34} = \hat{h}_1'' ; \\
 \hat{h}_{21} = \hat{h}_{32} = \hat{h}_{13} = \hat{h}_1' ; \quad \hat{h}_{31} = \hat{h}_{42} = \hat{h}_{43} = \hat{h}_1'' ;
 \end{aligned}$$

elementele matriciale de simetrie $[\hat{h}_1]_s$ vor avea următoarele expresii:

$$\begin{aligned}
 \hat{h}_{11} &= \hat{h}_1 + \hat{h}_1' + \hat{h}_1'' + \sigma \hat{h}_{14} + \hat{h}_1'' + \hat{h}_1'' ; \\
 \hat{h}_{21} &= 0 ; \quad \hat{h}_{31} = 0 ; \quad \hat{h}_{41} = 0 ; \\
 \hat{h}_{12} &= \hat{h}_1 + \sigma^2 \hat{h}_1' + \sigma \hat{h}_1'' ; \\
 \hat{h}_{22} &= 0 ; \quad \hat{h}_{32} = 0 ; \quad \hat{h}_{42} = 0 ; \\
 \hat{h}_{13} &= \hat{h}_1 + \sigma \hat{h}_1' + \sigma^2 \hat{h}_1'' ;
 \end{aligned} \tag{1.18}$$

Acel simetrie devine totală dacă $\hat{h}_1' = \hat{h}_1''$; $\hat{h}_1'' = \hat{h}_1''$ atunci elementele matriciale $[\hat{h}_1]_s$ devin (1.19) :

$$\begin{aligned}
 \hat{h}_{11} &= \hat{h}_1 + 2 \hat{h}_1' + \sigma (\hat{h}_{14} + 2 \hat{h}_1'') ; \\
 \hat{h}_{21} &= \hat{h}_1 - \hat{h}_1' = \hat{h}_{11} ; \\
 \hat{h}_{31} &= \hat{h}_{21} = \hat{h}_{31} = \hat{h}_{41} = \hat{h}_{12} = \hat{h}_{22} = \hat{h}_{32} = 0
 \end{aligned} \tag{1.19}$$

Elementele pasive de circuit (stative) satisfac condiția de reciprocitate, deci relațiile (1.17) exprimă termenii matricii $[Z_4]_3$ 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 (1.18) în exprimarea termenilor matricii $[Z_4]_3$. Liniiile electrice de înaltă tensiune avînd lungime mare pentru a se asigura o simetrizare a acestora se fac transpuneri de fază astfel încît în majoritatea cazurilor pentru termenii matricii $[Z_4]_3$ aferenți liniilor electrice se pot folosi relațiile (1.19). La linii de medie tensiune în cablu de aserenea condiția de simetrie totală este în mare măsură satisfăcută (pentru cabluri trifazate), dar la liniile aeriene ce au coronamentul orizontal condițiile de simetrie totală nu sînt satisfăcute. Avîndu-se în vedere faptul că aceste linii au o lungime mică în calculul regimurilor de avarie se admite și în aceste cazuri simetrie totală [10], [41], [55], [91].

Admițîndu-se simetrie ciclică sau totală din ecuația (1.13) se constată că pentru elementele ce satisfac această condiție componentele de secvență devin independente, respectiv se pot realiza scheme de secvență lipsite de cuplaje magnetice între ele.

Matricea $[U]_3$ din ecuația (1.13) nu satisface condiția de simetrie motiv pentru care termenii acestei matrici sînt dependenți de cele trei componente de secvență ale curenților. Funcție de curenți și impedanțele de secvență această matrice se exprimă prin relația:

$$[U]_3 = [T]^{-1} \cdot [Z] \cdot [T] \cdot [I]_3 = [Z]_3 \cdot [I]_3 \quad (1.20)$$

Matricea $[Z]$ funcție de impedanțele corespunzătoare din schema prezentată în fig.1.1 se exprimă astfel:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Efectuîndu-se operațiile din relația (1.20) pentru matricea de secvențe simetrice se obține expresia:

$$[Z_3] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 + Z_3 & Z_1 + a^2 Z_2 + a Z_3 & Z_1 + a Z_2 + a^2 Z_3 \\ Z_1 + a Z_2 + a^2 Z_3 & Z_1 + Z_2 + Z_3 & Z_1 + a^2 Z_2 + a Z_3 \\ Z_1 + a^2 Z_2 + a Z_3 & Z_1 + a Z_2 + a^2 Z_3 & Z_1 + Z_2 + Z_3 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Introducînd relația (1.22) în ecuația (1.20) se obține dependența componentelor simetrice ale tensiunii funcție de componentele simetrice ale curenților (1.23)

$$\begin{aligned}
 U_h &= \frac{Z_1+Z_2+Z_3}{3} \cdot I_h + \frac{Z_1+a^2Z_2+aZ_3}{3} I_d + \frac{Z_1+aZ_2+a^2Z_3}{3} I_1 ; \\
 U_d &= \frac{Z_1+aZ_2+a^2Z_3}{3} \cdot I_h + \frac{Z_1+Z_2+Z_3}{3} \cdot I_d + \frac{Z_1+a^2Z_2+aZ_3}{3} \cdot I_1 ; \\
 U_1 &= \frac{Z_1+a^2Z_2+aZ_3}{3} \cdot I_h + \frac{Z_1+aZ_2+a^2Z_3}{3} \cdot I_d + \frac{Z_1+Z_2+Z_3}{3} \cdot I_1 ;
 \end{aligned}
 \tag{1.23}$$

Din relațiile (1.23) se observă că atunci când $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ schemele de secvență corespunzătoare impedanțelor Z_1, Z_2, Z_3 sînt cuplate între ele, motiv pentru care realizarea practică a acestor scheme de secvență este mai dificilă.

Făcîndu-se următoarele notații:

$$\begin{aligned}
 Z_{nh} &= \frac{Z_1+Z_2+Z_3}{3} ; & Z_{dd} &= \frac{Z_1+a^2Z_2+aZ_3}{3} ; \\
 Z_{11} &= \frac{Z_1+aZ_2+a^2Z_3}{3}
 \end{aligned}
 \tag{1.24}$$

și introducînd relațiile (1.23) în ecuația (1.13) aceasta devine:

$$[U]_S = \left\{ [Z_h]_S + [Z_0]_S + [Z]_S \right\} \cdot [I]_S ; \tag{1.25}$$

Înlocuindu-se componentele simetrice ale tensiunilor electromotoare, ale matricilor impedanță și ale curenților relația (1.25) devine:

$$\begin{bmatrix} U_{eh} \\ U_{ed} \\ U_{e1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1nh} + Z_{0nh} + Z_{nh} & Z_{1nd} + Z_{0nd} + Z_{11} & Z_{1ni} + Z_{0ni} + Z_{dd} \\ Z_{1dh} + Z_{0dh} + Z_{dd} & Z_{1dd} + Z_{0dd} + Z_{nh} & Z_{1di} + Z_{0di} + Z_{11} \\ Z_{1ih} + Z_{0ih} + Z_{11} & Z_{1id} + Z_{0id} + Z_{dd} & Z_{1ii} + Z_{0ii} + Z_{nh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_h \\ I_d \\ I_1 \end{bmatrix} ; \tag{1.26}$$

Pentru curenții de secvență se obține expresia:

$$\begin{bmatrix} I_h \\ I_d \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1nh} + Z_{0nh} + Z_{nh} & Z_{1nd} + Z_{0nd} + Z_{11} & Z_{1ni} + Z_{0ni} + Z_{dd} \\ Z_{1dh} + Z_{0dh} + Z_{dd} & Z_{1dd} + Z_{0dd} + Z_{nh} & Z_{1di} + Z_{0di} + Z_{11} \\ Z_{1ih} + Z_{0ih} + Z_{11} & Z_{1id} + Z_{0id} + Z_{dd} & Z_{1ii} + Z_{0ii} + Z_{nh} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_{eh} \\ U_{ed} \\ U_{e1} \end{bmatrix} \tag{1.27}$$

Din relația (1.27) cunoscîndu-se tensiunile electromotoare ale sursei și impedanțele $[Z_h]_S, [Z_0]_S$ respectiv Z_1, Z_2, Z_3 la locul de defect se pot calcula cele trei componente de secvență ale curențului. Avînd componentele de secvență ale curenților se determină curenții I_1, I_2, I_3 cu relația:

$$[I] = [T] \cdot [I]_S ; \tag{1.28}$$

respectiv tensiunile $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$ din relația:

$$[\dot{U}] = [\dot{Z}] \cdot [\dot{I}] ; \quad (1.29)$$

Cu ajutorul relației (1.27) se pot determina componentele de secvență ale curenților, respectiv curenții de fază cu relația (1.28) indiferent de tipul defectului apărut într-o rețea trifazată, prin considerarea corespunzătoare a valorilor impedanțelor \dot{Z}_1, \dot{Z}_2 și \dot{Z}_3 .

Pentru a putea trece de la relația (1.26) la (1.27) este necesar ca matricea impedanțelor să fie inversabilă. Condiția necesară și suficientă pentru ca o matrice pătratică să fie inversabilă este ca determinantul acesteia să fie diferit de zero [106], [108].

Făcînd următoarele notații pentru termenii matricii admitanță acestia se pot exprima funcție de termenii matricii impedanțelor.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{1nh} + \dot{Z}_{0nh} + \dot{Z}_{nh} & \dot{Z}_{1nd} + \dot{Z}_{0nd} + \dot{Z}_{d1} & \dot{Z}_{1ni} + \dot{Z}_{0ni} + \dot{Z}_{dd} \\ \dot{Z}_{1dh} + \dot{Z}_{0dh} + \dot{Z}_{dd} & \dot{Z}_{1dd} + \dot{Z}_{0dd} + \dot{Z}_{nh} & \dot{Z}_{1di} + \dot{Z}_{0di} + \dot{Z}_{d1} \\ \dot{Z}_{1ih} + \dot{Z}_{0ih} + \dot{Z}_{d1} & \dot{Z}_{1id} + \dot{Z}_{0id} + \dot{Z}_{dd} & \dot{Z}_{1ii} + \dot{Z}_{0ii} + \dot{Z}_{nh} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{13} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \dot{Z}_{23} \\ \dot{Z}_{31} & \dot{Z}_{32} & \dot{Z}_{33} \end{bmatrix}^{-1} ; \quad (1.30)$$

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

$$D = \dot{Z}_{11}(\dot{Z}_{22} \cdot \dot{Z}_{33} - \dot{Z}_{32} \cdot \dot{Z}_{23}) - \dot{Z}_{21}(\dot{Z}_{12} \cdot \dot{Z}_{33} - \dot{Z}_{32} \cdot \dot{Z}_{13}) + \dot{Z}_{31}(\dot{Z}_{12} \cdot \dot{Z}_{23} - \dot{Z}_{22} \cdot \dot{Z}_{13}) ; \quad (1.31)$$

Termenii matricii admitanță devin:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{22} \cdot \dot{Z}_{33} - \dot{Z}_{32} \cdot \dot{Z}_{23}) ; \\ Y_{12} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{32} \cdot \dot{Z}_{13} - \dot{Z}_{12} \cdot \dot{Z}_{33}) ; \\ Y_{13} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{12} \cdot \dot{Z}_{23} - \dot{Z}_{22} \cdot \dot{Z}_{13}) ; \\ Y_{21} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{23} \cdot \dot{Z}_{31} - \dot{Z}_{21} \cdot \dot{Z}_{33}) ; \\ Y_{22} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{11} \cdot \dot{Z}_{33} - \dot{Z}_{31} \cdot \dot{Z}_{13}) ; \\ Y_{23} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{21} \cdot \dot{Z}_{13} - \dot{Z}_{11} \cdot \dot{Z}_{23}) ; \\ Y_{31} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{31} \cdot \dot{Z}_{12} - \dot{Z}_{11} \cdot \dot{Z}_{32}) ; \\ Y_{32} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{31} \cdot \dot{Z}_{12} - \dot{Z}_{11} \cdot \dot{Z}_{32}) ; \\ Y_{33} &= \frac{1}{D} (\dot{Z}_{11} \cdot \dot{Z}_{22} - \dot{Z}_{21} \cdot \dot{Z}_{12}) ; \end{aligned} \quad (1.32)$$

578907
359 H.

Funcția de admitanțe curenții de secvență se exprimă astfel:

$$\begin{aligned} I_0 &= Y_{11} \cdot U_{eh} + Y_{12} \cdot U_{ed} + Y_{13} \cdot U_{ei} \\ I_d &= Y_{21} \cdot U_{eh} + Y_{22} \cdot U_{ed} + Y_{23} \cdot U_{ei} \\ I_1 &= Y_{31} \cdot U_{eh} + Y_{32} \cdot U_{ed} + Y_{33} \cdot U_{ei} \end{aligned} \quad (1.33)$$

Termenii matricii admitanță vor primi diverse valori funcție de tipul și locul în care apare defectul. În calculul termenilor matricii Y , relația (1.30) poate fi folosit calculatorul, fiind realizate programe de inversare a unei matrici [34], [94].

1.2. Impedanții transversale (scurtcircuitate)

În cazul acestor defecte impedanțele Z_1, Z_2, Z_3 leagă un sistem simetric cu rețeaua de nul care poate fi considerată un sistem simetric cu impedanțe și surse nule. Impedanțele transversale (Z) ale rețelei devin conectate în paralel cu impedanțele Z_1, Z_2, Z_3 dacă pentru linii se acceptă scheme echivalente în Γ cu parametri concentrați. Dacă defectele sînt 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 cînd defectul are loc prin impedanță de trecere mare neglijarea nesimetriei impedanțelor transversale a fazelor sîmțtoase la locul de defect ceea ce se acceptă de obicei [4], [8], [25], [38], [41], [62], [63] poate conduce la erori mari, motiv pentru care în prezenta lucrare s-au luat în considerare și aceste elemente.

1.2.1. Scurtcircuitat monofazat prin rezistență de trecere

Pentru un astfel de defect fiind un defect transversal (elementul nesimetric leagă o rețea simetrică cu rețeaua simetrică nulă echivalentă pămîntului), impedanțele cu indicele „0” din fig.1.1 se anulează. Impedanțele cu indicele „1” reprezintă impedanțele echivalente a întregii rețele văzute de la locul de defect în lipsa defectului, iar tensiunile U_0 sînt tensiunile de la locul de defect, înaintea apariției acestuia. Considerînd 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 Z_1, Z_2, Z_3 din fig.1.1 devin:

$$Z_2 = Z_3 = Z \quad ; \quad Z_1 = \frac{Z \cdot R_t}{Z + R_t} \quad (1.34)$$

unde \underline{Z} reprezintă impedanța transversală de fază (față de pământ) a întregii rețele legată galvanic.

Înlocuindu-se impedanțele $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ în relațiile (1.24) pentru impedanțele de secvență se obțin valorile:

$$\underline{Z}_{hh} = \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} ; \quad \underline{Z}_{dd} = \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} = \underline{Z}_{ii} ; \quad (1.35)$$

Admițându-se pentru restul elementelor din rețea o simetrie totală și ținând seama de relația (1.35), relația (1.27) devine:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{hh} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} \\ \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \underline{Z}_{dd} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} \\ \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} & \underline{Z}_{ii} + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{eh} \\ \underline{U}_{ed} \\ \underline{U}_{ei} \end{bmatrix} ; \quad (1.36)$$

Cu notațiile din relația (1.36) termenii matricii impedanțelor devin:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + 2\underline{Z}_1 + 3(\underline{Z}_{14} + 2\underline{Z}_{i4}) + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} ;$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_{32} = \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}}{3} ;$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{33} = \underline{Z}_1 - \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_1 + 2\underline{Z}}{3} ;$$

iar termenii matricii admitanță obțin expresiile:

$$\underline{Y}_{11} = \frac{\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2} ;$$

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} = - \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2} ;$$

$$\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32} = \frac{\underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11})}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2} ;$$

$$\underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{33} = \frac{\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}^2}{(\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}) \underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}) - 2\underline{Z}_{12}^2} ;$$

Dacă se înlocuiesc expresiile admitanțelor în ecuațiile (1.33) pentru componentele de secvență ale curentului se obțin expresiile:

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

$$\underline{I}_d = \frac{(Z_{12}-Z_{22})Z_{12} \cdot U_{eh} + Z_{12}(Z_{12}-Z_{11}) \cdot U_{ei} + (Z_{11} \cdot Z_{22} - Z_{12}^2) \cdot U_{ed}}{(Z_{22}-Z_{12}) Z_{11}(Z_{12}+Z_{22}) - 2Z_{12}^2}; \quad (1.39)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{(Z_{12}-Z_{22})Z_{12} \cdot U_{eh} + Z_{12}(Z_{12}-Z_{11})U_{ed} + (Z_{11} \cdot Z_{22} - Z_{12}^2)U_{ei}}{(Z_{22}-Z_{12}) Z_{11}(Z_{12}+Z_{22}) - 2 \cdot Z_{12}^2};$$

Din relația (1.28) se obține expresia curentului pe faza cu defect (\underline{I}_1).

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_1 = \frac{(Z_{22}-Z_{12})U_{eh} + (Z_{11}-Z_{12})(U_{ed}+U_{ei})}{Z_{11}(Z_{12} + Z_{22}) - 2Z_{12}^2}; \quad (1.40)$$

În relația (1.40) înlocuindu-se expresiile impedanțelor funcție de impedanțele din schema prezentată în fig.1.1 pentru curentul de pe faza cu defect se obține expresia:

$$\underline{I}_1 = \frac{(Z_1 - Z_1' + Z)U_{eh} + Z_1 + 2Z_1' + 3(Z_{14} + 2Z_{14}') + Z (U_{ed} + U_{ei})}{Z_1 + 2Z_1' + 3(Z_{14} + 2Z_{14}') + \frac{Z_1 + 2Z}{3} (Z_1 - Z_1' + \frac{2Z_1 + Z}{3}) - 2(\frac{Z_1 - Z}{3})^2}; \quad (1.41)$$

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], [25], [41], [59]. la apariția defectului impedanța Z_1 devine R_t (rezistența de trecere la locul de defect). Înlocuind în relația (1.41) impedanța Z_1 cu R_t și trecându-se la limită ($Z \rightarrow \infty$) pentru curentul fazei cu defect se obține expresia:

$$\underline{I}_1 = \frac{U_{ed} + U_{ei} + U_{eh}}{Z_1 + R_t + Z_{14} + 2Z_{14}'}; \quad (1.42)$$

Expresia (1.42) este identică cu cea dată în literatură [2], [10], [21], [25], [26], [41], [62], [63] pentru curentul de scurtcircuit monofazat. De regulă tensiunile rețelei la locul de defect, înaintea apariției defectului sînt aproximativ simetrice deci $U_{eh} \ll U_{ed}$; $U_{ei} \ll U_{ed}$ deci tensiunile U_{eh} și U_{ei} se pot neglija față de tensiunea U_{ed} , relația (1.42) devenind

$$\underline{I}_1 = \frac{U_{ed}}{Z_1 + R_t + Z_{14} + 2Z_{14}'}; \quad (1.43)$$

Relației (1.43) i se poate asocia o schemă care este identică cu schema rezultată din înscrierea schemelor de secvență directă inversă și homopolară ale rețelei, văzute dinspre locul de defect ($\underline{I}_d = \underline{I}_1 = \underline{I}_h$).

Cu ajutorul relației (1.28) se obțin și expresiile curenților de pe celelalte două faze. Curentul ce se închide prin nulul rețelei (I_4) are expresia:

$$I_4 = 3(Y_{11} \cdot U_{eh} + Y_{12} \cdot U_{ed} + Y_{13} \cdot U_{ea}) ; \quad (1.44)$$

Introducând relațiile (1.28) în relația (1.44) aceasta devine:

$$I_4 = 3 \cdot \frac{(Z_{22} + Z_{12}) U_{eh} - Z_{12} (U_{ed} + U_{ea})}{Z_{11} (Z_{12} + Z_{22}) - Z_{12}^2} ; \quad (1.45)$$

Având în vedere relațiile (1.37) și faptul că $U_{ed} = U_{ea}$ pentru curentul (I_4) se obține expresia:

$$I_4 = \frac{U_{ed}}{R_t \cdot k} + \frac{3 \left[\frac{R_t}{Z} + \frac{Z + R_t}{Z^2} (Z_2 - Z_1) \right]}{R_t \cdot k} \cdot U_{eh} \quad (1.46)$$

unde k este:

$$k = 1 + \frac{2Z_2 + Z_1' + 3(Z_{14} + 2Z_1'_{14})}{Z} + \frac{(Z_2 - Z_1) [Z_2 + 2Z_1 + 3(Z_{14} + 2Z_1'_{14})]}{Z^2}$$

Dacă impedanțele Z_1 , Z_1' , Z_{14} și $Z_1'_{14}$ sunt mult mai mici decât impedanța Z atunci $k \approx 1$, relația (1.46) devenind

$$I_4 = \frac{U_{ed}}{R_t} + \frac{k_1 \cdot U_{eh}}{R_t} ;$$

unde k_1 este

$$k_1 = \frac{3}{Z} \left[R_t \left(1 + \frac{Z_2 - Z_1'}{Z} \right) + Z_2 - Z_1 \right] \approx \frac{3R_t}{Z}$$

Se observă că în cazul în care R_t este mare, coeficientul k_1 poate atinge valori mari și într-un astfel de caz tensiunea U_{eh} nu se mai poate neglija în calculul curentului I_4 .

Din relația (1.46) se obține relația (1.42) dacă se impune condiția ca impedanța $Z \rightarrow \infty$. Impunând condiția $R_t \rightarrow \infty$ cu relația (1.46) se determină curentul care circulează prin nulul rețelei, în regim normal de funcționare. Se observă că acest curent este nul dacă componenta homopolară a tensiunii (U_{eh}) este nulă.

În situația în care rezistența de trecere la locul de defect (R_t) este mult mai mică decât impedanța transversală a rețelei, pentru calculul curentului de scurtcircuit monofazat se poate folosi relația (1.42) respectiv (1.43), dar când acestea sînt comparabile utilizarea relațiilor (1.42) sau (1.43) în calculul curentului de scurtcircuit monofazat pot conduce la erori mari.

Se observă de asemenea că tensiunea U_{e1} modifică puțin valoarea curentului I_4 deoarece aceasta este mult mai mică decât tensiunea U_{ed} , dar tensiunea U_{eh} poate determina modificări importante ale curentului I_4 .

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

Determinarea curenților într-un astfel de caz se face considerându-se în schema din fig.1.1 impedanțele cu indicoale „c” nule, iar dacă considerăm fazele 2 și 3 puse la pământ impedanțele Z_2 , Z_3 și Z_3 devin

$$Z_2 = Z \quad \text{și} \quad Z_e = Z_3 = \frac{Z \cdot R_f}{Z + R_f} \quad (1.47)$$

unde R_f este rezistența de trecere în locul de defect, iar Z impedanța transversală (față de pământ) a rețelei în locul de defect.

Înlocuind aceste impedanțe în relațiile (1.24) pentru impedanțele de secvență se obțin expresiile:

$$Z_{hh} = \frac{2Z_e + Z}{3}, \quad Z_{dd} = \frac{(Z - Z_e)}{3}, \quad Z_{11} = \frac{Z - Z_e}{3}, \quad (1.48)$$

Admitându-se simetrie totală pentru sistemul simetric termenii matricii admitanță (relațiile 1.32) și în acest caz se exprimă cu ajutorul relațiilor (1.33), deci pentru curenții de secvență se obțin expresiile (1.39). Cu ajutorul relației (1.28) se determină curenții de pe cele trei faze. Cunoșcându-se curenții de pe cele trei faze, se obține și curentul de pe nul (I_4).

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

$$I_1 = \frac{(Z_{e2} - Z_{12})U_{eh} + (Z_{11} - Z_{12})(U_{ed} + U_{e1})}{Z_{11}(Z_{e2} + Z_{e2}) - 2Z_{12}^2}$$

$$I_2 = \frac{1}{(Z_{e2} - Z_{12})[Z_{11}(Z_{e2} + Z_{e2}) - 2Z_{12}^2]} \left\{ (Z_{e2} + 2Z_{12})(Z_{e2} - Z_{12})U_{eh} + \right.$$

$$+ [A Z_{11}(A Z_{e2} - Z_{12}) - Z_{12}(Z_{e2} + 2A Z_{12})] U_{ed} +$$

$$\left. + [A Z_{11}(Z_{e2} - A Z_{12}) - Z_{12}(Z_{e2} + 2A Z_{12})] U_{e1} \right\}, \quad (1.49)$$

$$I_3 = \frac{1}{(Z_{e2} - Z_{i2}) [Z_{i1}(Z_{i2} + Z_{e2}) - 2Z_{i2}^2]} \left\{ (Z_{e2} + 2Z_{i2})(Z_{e2} - Z_{i2})U_{eh} + \right. \\ \left. + [a Z_{i1}(Z_{e2} - aZ_{i2}) - Z_{i2}(Z_{e2} + 2aZ_{i2})] U_{ed} + [a^2 Z_{i1}(aZ_{e2} - Z_{i2}) - \right. \\ \left. - Z_{i2}(Z_{e2} + 2a^2 Z_{i2})] U_{e1} \right\} ;$$

$$I_4 = 3 \cdot \frac{(Z_{e2} + Z_{i2}) U_{eh} - Z_{i2} (U_{ed} + U_{e1})}{Z_{i1}(Z_{i2} + Z_{e2}) - 2 Z_{i2}^2} ;$$

Ținând seama de relațiile (1.48) și (1.57) curentul I_4 devine:

$$I_4 = \frac{[3(Z_1 - Z'_1) + 2Z_0 + Z] U_{eh} + (Z_0 - Z)(U_{ed} + U_{e1})}{[Z_1 + 2Z_1 + 3(Z_{14} + 2Z_{14}) + \frac{2Z_0 + Z}{3}](Z_1 - Z_1 + \frac{2Z_0 + Z}{3}) - 2(\frac{Z - Z_0}{3})^2} ; \quad (1.50)$$

Impunându-se condiția ca Z să obține expresia curentului I_4 în situația în care nu se iau în considerare elementele transversale la locul de defect, în calculul acestui curent. În aceste condiții relația (1.50) devine:

$$I_4 = \frac{U_{eh} - (U_{ed} + U_{e1})}{Z_1 + Z_1 + 2(Z_{14} + 2Z_{14}) + R_0} ; \quad (1.51)$$

Deoarece tensiunile U_{e1} și U_{eh} sînt mult mai mici decît tensiunea U_{ed} relația (1.51) se poate scrie sub forma:

$$I_4 = - \frac{U_{ed}}{Z_1 + Z_1 + 2(Z_{14} + 2Z_{14}) + R_0} ; \quad (1.52)$$

În literatură [10], [21], [25], [41], [62], [63] pentru curentul I_4 este dată relația (1.52). Din relația (1.50) se constată că în situația în care impedanța transversală a rețelei nu se poate considera infinit de mare la locul de apariție a defectului pentru calculul curentilor utilizarea expresiilor date în literatură pot conduce la erori mari și în aceste cazuri este necesar să se folosească pentru calculul componentelor de secvență ale curentilor relațiile (1.38), respectiv pentru curenții de fază relațiile (1.49) în care impedanțele sînt exprimate prin relațiile (1.53):

$$Z_{i1} = Z_1 + 2Z_1 + 3(Z_{14} + 2Z_{14}) + \frac{2Z_0 + Z}{3} ; \\ Z_{i2} = Z_{e1} = Z_{i3} = Z_{i1} = Z_{e3} = Z_{i2} = \frac{Z - Z_0}{3} ; \quad (1.53) \\ Z_{e2} = Z_{i3} = Z_1 - Z'_1 + \frac{2Z_0 + Z}{3} ;$$

Din relația (1.50) se observă că tensiunea U_{ed} se poate neglija la calculul curentului I_d (de obicei $U_{ed} \ll U_{od}$), dar tensiunea U_{eh} poate avea o contribuție însemnată la stabilirea valorii acestui curent.

Neglijarea impedanțelor transversale ale rețelei la locul de defect se face funcție de valoarea rezistenței de trecere (R_f) prin care are loc punerea la pământ. La defecte prin rezistențe de trecere mici neglijarea curenților transversali pe fazele sănătoase conduce la erori acceptabile, dar la defecte mai slabe (rezistențe de trecere mari) neglijarea acestor curenți pot determina erori foarte mari.

1.3. Asimetrie longitudinală

În cazul acestor defecte impedanțele elementului nesimetric Z_1, Z_2, Z_3 (fig.1.1) leagă între ele două sisteme simetrice a căror impedanțe sînt diferite de zero. Admitîndu-se pentru simplificarea că aceste sisteme simetrice admit o simetrie totală în acest caz impedanțele matricii $[Z_1]_s$ satisfac relațiile (1.19) iar termenii matricii $[Z_0]_s$ devin:

$$\begin{aligned} Z_{0_{hh}} &= Z_0 + 2Z_0' + 3(Z_{04} + 2Z_{04}') ; \\ Z_{0_{dd}} &= Z_0 - Z_0' = Z_{0_{11}} ; \end{aligned} \quad (1.54)$$

$$Z_{0_{hd}} = Z_{0_{hd}} = Z_{0_{dh}} = Z_{0_{1h}} = Z_{0_{1d}} = Z_{0_{d1}} = 0 ;$$

Funcție de tipul asimetriei longitudinale impedanțele Z_1, Z_2 și Z_3 vor lua diverse valori.

1.3.1. Creșterea impedanței pe o fază

Pentru un astfel de defect presupus pe faza 1 impedanțele Z_1, Z_2, Z_3 satisfac relațiile:

$$Z_1 = Z \quad ; \quad Z_2 = Z_3 \quad ; \quad (1.55)$$

unde Z reprezintă creșterea impedanței fazei respective.

În acest caz pentru calculul componentelor de secvență ale curenților se folosesc relațiile (1.39). Impedanțele din relațiile (1.39) au expresiile:

$$Z_{11} = Z_1 + Z_0 + 2(Z_1' + Z_0') + 3(Z_1 + Z_0 + 2Z_1' + 2Z_0') + \frac{Z + 2Z_0}{3} ;$$

$$Z_{12} = Z_{13} = Z_{21} = Z_{23} = Z_{32} = Z_{31} = \frac{Z - Z_0}{3} ; \quad (1.56)$$

$$Z_{22} = Z_1 + Z_0 - Z_1' - Z_0' + \frac{Z + 2Z_0}{3} ;$$

Din relația (1.28) se pot determina curenții de fază cunoscându-se matricea $[I]_3$. Curentul care se închide prin nulul rețelei

I_4 se determină cu relația (1.45). Dacă se exprimă impedanțele Z_{11} și Z_{22} (relațiile 1.56) funcție de impedanța Z_{12} acestea obțin expresiile:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_1 + Z_0 + 2(Z_1' + Z_0') + 3(Z_{14} + Z_{04} + 2Z_{14}' + 2Z_{04}') + Z_2 + Z_{12} - a_1 + Z_{12} \\ Z_{22} &= Z_1 + Z_0 - Z_1' - Z_0' + Z_2 + Z_{12} = b_1 + Z_{12} ; \end{aligned} \quad (1.57)$$

unde:

$$a_1 = Z_1 + Z_0 + 2(Z_1' + Z_0') + 3(Z_{14} + Z_{04} + 2Z_{14}' + 2Z_{04}') + Z_2$$

$$b_1 = Z_1 + Z_0 - Z_1' - Z_0' + Z_2$$

Introducând relațiile (1.57) în relația (1.45) curentul I_4 devine:

$$I_4 = \frac{3 b_1 \cdot U_{oh} - (Z_1 - Z_0)(U_{ed} + U_{od} - 2U_{eh})}{a_1 \cdot b_1 + \frac{Z_1 - Z_0}{3} (2a_1 + b_1)} ; \quad (1.58)$$

Introducând relațiile (1.57) în relația (1.40) curentul de pe fază cu defect (I_1) devine:

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot U_{oh} + a_1 (U_{ed} + U_{od})}{a_1 \cdot b_1 + \frac{Z_1 - Z_0}{3} (2a_1 + b_1)} ; \quad (1.59)$$

În situația în care faza (1) este întreruptă Z_1 devine infinit, iar $Z_2 \rightarrow 0$. În aceste condiții relațiile (1.58) și (1.59) devin:

$$I_4 = \frac{2 U_{oh} - U_{ed} - U_{od}}{Z_1 + Z_0 + Z_1' + Z_0' + 2 [Z_{14} + Z_{04} + 2(Z_{14}' + Z_{04}')] } ; \quad (1.60)$$

$$I_1 = 0 ;$$

Deci $I_{11} + I_{12} + I_4 = 0$, condiție care se impune în calculul unor astfel de defecte.

Decarece U_{ed} și U_{oh} sînt mult mai mici decît tensiunea U_{od} relația (1.60) se poate scrie simplificat astfel:

$$I_4 = - \frac{U_{od}}{Z_1 + Z_0 + Z_1' + Z_0' + 2 [Z_{14} + Z_{04} + 2(Z_{14}' + Z_{04}')] } ; \quad (1.61)$$

Dacă unul din rîstanele simetrice din cele două conectate prin impedanțele Z_1 , Z_0 , Z_2 nu este cu nulul legat la pînă atunci impedanțele (Z_{14} sau Z_{04}) ale sistemului respectiv devin impedanțele transversale

ale acestuia deoarece acestea sînt în mod obișnuit mult mai mari decît cele longitudinale, introducîndu-se cu valorile corespunzătoare în relația (1.61). Dacă ambele sisteme simetrice sînt cu nulul izolat sau conexiune în triunghi impedanțele Z_{14} și Z_{04} reprezintă impedanțele transversale la stînga și la dreapta locului de defect.

Relația (1.58) permite calculul curentului de dezechilibru al liniei pe care a apărut un astfel de defect chiar dacă nu este întreruptă o fază ci numai a crescut impedanța acestuia, deci este o relație mai generală decît cele date în literatură [17], [21], [25], [62], [91], [95], [133].

1.3.2. Creșterea impedanței pe două faze

Presupunînd impedanțele fazelor 2 și 3 mărite impedanțele Z_2, Z_3 se pot scrie astfel:

$$Z_2 = Z_3 = Z$$

unde Z reprezintă creșterea impedanțelor celor două faze.

Deci impedanțele de secvență corespunzătoare relațiilor (1.24) se exprimă prin relațiile:

$$Z_{0h} = \frac{Z_0 + 2Z}{3} \quad ; \quad Z_{1d} = \frac{Z_1 - Z}{3} = Z_{11} \quad ; \quad (1.62)$$

relații identice formal cu relațiile (1.48).

Impedanțele exprimate prin relațiile (1.37) în acest caz devin:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_1 + Z_0 + 2(Z_1' + Z_0') + 3(Z_{14} + Z_{04} + 2Z_{14}' + 2Z_{04}') + \frac{Z_1 + 2Z}{3} \quad ; \\ Z_{12} = Z_{13} = Z_{21} = Z_{23} = Z_{32} = Z_{31} &= \frac{Z_1 - Z}{3} \quad ; \quad (1.63) \\ Z_{22} = Z_1 + Z_0 - Z_1' - Z_0' + \frac{Z_1 + 2Z}{3} \quad ; \end{aligned}$$

Exprimînd impedanțele Z_{11} și Z_{22} funcție de impedanța Z_{12} acestea devin:

$$Z_{11} = Z_1 + Z_0 + 2(Z_1' + Z_0') + 3(Z_{14} + Z_{04} + 2Z_{14}' + 2Z_{04}') + R_f + Z_{12} = R_2 + Z_{12} + R_f \quad ; \quad (1.64)$$

$$Z_{22} = Z_1 + Z_0 - Z_1' - Z_0' + R_f + Z_{12} = R_2 + Z_{12} + R_f \quad ;$$

unde

$$\begin{aligned} R_2 &= Z_1 + Z_0 + R_f + 2(Z_1' + Z_0') + 3(Z_{14} + Z_{04} + 2Z_{14}' + 2Z_{04}') \quad ; \\ R_2 &= Z_1 + Z_0 - Z_1' - Z_0' + R_f \quad ; \end{aligned}$$

Pentru calculul curenților pe cele trei faze și nul se pot folosi relațiile (1.49). Dacă ținem seama de relațiile (1.63) și (1.64) relațiile (1.49) devin:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{(a_2 + R_2) \cdot U_{ch} + (a_2 + R_2)(U_{ed} + U_{e1})}{a_2 b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{R_2}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1)} ; \\
 I_2 &= \frac{(b_2 + Z_1) U_{ch}}{a_2 b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{R_2}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1)} + \\
 &+ \frac{a^2 a_2 \cdot b_2 + Z_1 \left(\frac{a^2 - 1}{3} \cdot a_2 + \frac{a^2 - a}{3} \cdot b_2 + a^2 \cdot Z_1 \right) + Z_1 \left(\frac{a^2 - a}{3} \cdot a_2 + \frac{a^2 - 1}{3} \cdot b_2 \right)}{(b_2 + R_2) \left[a_2 b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{Z_1}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1) \right]} \cdot U_{ed} + \\
 &+ \frac{a a_2 b_2 + Z_1 \left(\frac{a-1}{3} a_2 + \frac{a-a^2}{3} b_2 + a Z_1 \right) + Z_1 \left(\frac{a-a^2}{3} a_2 + \frac{a-1}{3} b_2 \right)}{\left[a_2 \cdot b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{Z_1}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1) \right] (b_2 + Z_1)} \cdot U_{e1} ; \\
 I_3 &= \frac{(b_2 + Z_1) U_{ch}}{a_2 \cdot b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{Z_1}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1)} + \\
 &+ \frac{a^2 a_2 \cdot b_2 + Z_1 \left(\frac{a^2 - 1}{3} \cdot a_2 + \frac{a^2 - a}{3} \cdot b_2 + a^2 Z_1 \right) + Z_1 \left(\frac{a^2 - a}{3} \cdot a_2 + \frac{a^2 - 1}{3} \cdot b_2 \right)}{(b_2 + R_2) \left[a_2 b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{Z_1}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1) \right]} U_{ed} + \\
 &+ \frac{a a_2 b_2 + Z_1 \left(\frac{a-1}{3} a_2 + \frac{a-a^2}{3} b_2 + a Z_1 \right) + Z_1 \left(\frac{a-a^2}{3} a_2 + \frac{a-1}{3} b_2 \right)}{(b_2 + R_2) \left[a_2 \cdot b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{Z_1}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1) \right]} U_{e1} ; \\
 I_4 &= \frac{(3b_2 + Z_1 + 2Z_1) U_{ch} - (Z_1 - 2)(U_{ed} + U_{e1})}{a_2 b_2 + \frac{Z_1}{3} (2a_2 + b_2) + \frac{Z_1}{3} (a_2 + 2b_2 + 3Z_1)} ;
 \end{aligned}
 \tag{1.65}$$

Considerându-se fazole 2 și 3 întrerupte înseamnă că $Z_2 \rightarrow \infty$ iar impedanța $Z_1 \rightarrow 0$. În aceste condiții relațiile (1.65) devin:

$$\begin{aligned}
 I_1 = I_4 &= \frac{U_{ch} + U_{ed} + U_{e1}}{Z_1 + Z_0 + Z_{14} + Z_{04} + 2(Z_{14} + Z_{04})} \\
 I_2 = I_3 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1.66}$$

Relațiile (1.66) sînt date în literatură pentru calculul nesimetrilor de constantă din întreruperea a două faze [17], [21], [25], [62], [95], [133]. Se observă că în situația în care cele două faze nu sînt întrerupte ci apare doar o creștere a impedanței pe cele două faze nu pot fi utilizate relațiile (1.66) pentru calculul curenților ci este necesară

folosirea relațiilor (1.65), care sînt mai generale decît relațiile (1.66) cunoscute în literatură.

Dacă creșterea impedanței se produce pe cele trei faze ale liniei electrice în același mod atunci rețeaua nu prezintă nesimetrii decît se rezolvă ca o rețea simetrică.

1.4. Calculul nesimetriilor într-o rețea trifazată folosind operatorii de nesimetrie

1.4.1. Definiția factorilor și operatorilor complecși de nesimetrie

Intr-o rețea trifazată chiar în regim normal de funcționare tensiunile și curenții nu constituie sisteme trifazate perfect simetrice, motiv pentru care s-au introdus mărimi prin care se exprimă gradul de nesimetrie al acestora. Nesimetria tensiunilor se apreciază prin gradul de disimetrie $\underline{\epsilon}_{U_2} = \frac{U_2}{U_d}$ și gradul de esimetrie $\underline{\epsilon}_{U_h} = U_h/U_d$ [2], [11]. Dacă $\underline{\epsilon}_{U_1}$ și $\underline{\epsilon}_{U_h}$ sînt mai mici sau egali cu 0,05 sistemul de tensiuni se consideră simetric [2], [10], [62], [63]. În lucrarea [11] se definesc factorii complecși de nesimetrie și operatorii complecși de nesimetrie. Factorii complecși de nesimetrie pentru tensiuni și curenți se definesc astfel:

$$\underline{\epsilon}_{U_1} = \frac{U_1}{U_d} ; \quad \underline{\epsilon}_{U_h} = \frac{U_h}{U_d} ; \quad (1.67)$$

$$\underline{\epsilon}_{I_1} = \frac{I_1}{I_d} ; \quad \underline{\epsilon}_{I_h} = \frac{I_h}{I_d} ; \quad (1.68)$$

Considerîndu-se ca referință faza direct corespunzătoare primei faze (fază de referință) operatorii complecși de nesimetrie se definesc în felul următor:

- operatorul complex de nesimetrie al fazelor;

$$\underline{a}_n = 1 + \underline{a}^{1-m} \cdot \underline{\epsilon}_1 + \underline{a}^{m-1} \cdot \underline{\epsilon}_h ; \quad (1.69)$$

- operatorul complex de nesimetrie datorat cuplajelor magnetice dintre faze corespunzătoare componentelor simetrice de secvență directă, inversă și homopolară;

$$\underline{d}_m = -1 + 2 \underline{a}^{1-m} \cdot \underline{\epsilon}_1 - \underline{a}^{m-1} \cdot \underline{\epsilon}_h$$

$$\underline{b}_m = 2 \underline{a}^{m-1} \cdot \underline{\epsilon}_1 - \underline{a}^{1-m} \cdot \underline{\epsilon}_h \quad (1.70)$$

$$\underline{h}_m = - \underline{a}^{m-1} - \underline{a}^{1-m} \cdot \underline{\epsilon}_1 + 2 \underline{\epsilon}_h$$

Operatorilor de forma (1.69) li se atașează indicele U cînd se referă la tensiuni, respectiv indicele I cînd se referă la curenți. Operatorilor de definiți conform relațiilor (1.70) li se adaugă numai indicele I

deoarece cuplajele între circuite se exprimă funcție de curenți.

Considerând elementul nesimetric constituit din impedanțele $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ (fig. 1.1) tensiunile de secvență aferente acestui element se exprimă prin relațiile (1.23) respectiv impedanțele de secvență prin relațiile (1.24). Introducând în relațiile (1.23) operatorii de nesimetrie definiți prin relațiile (1.69) acestea devin:

$$\underline{U}_{d1} = \underline{Z}_{dd} \cdot \underline{I}_{d1}; \quad \underline{U}_{11} = \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_{11}; \quad \underline{U}_h = \underline{Z}_{hh} \cdot \underline{I}_h; \quad (1.71)$$

în care impedanțele de secvență au expresiile:

$$\underline{Z}_{dd} = \frac{1}{3} (\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{13} \cdot \underline{Z}_3) \quad (1.72)$$

$$\underline{Z}_{11} = \frac{1}{3 \underline{\epsilon}_{11}} (\underline{Z}_{11} \underline{Z}_1 + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{12} \cdot \underline{Z}_2 + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{13} \cdot \underline{Z}_3)$$

$$\underline{Z}_{hh} = \frac{1}{3 \underline{\epsilon}_{1h}} (\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{12} \cdot \underline{Z}_2 + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{13} \cdot \underline{Z}_3).$$

Ecuațiile (1.71) se pot scrie și în forma lor duală devenind 13 :

$$\underline{I}_{d1} = \underline{Y}_{dd} \cdot \underline{U}_{d1}; \quad \underline{I}_{11} = \underline{Y}_{11} \cdot \underline{U}_{11}; \quad \underline{I}_h = \underline{Y}_{hh} \cdot \underline{U}_h; \quad (1.73)$$

în care admitanțele de secvență se exprimă prin relațiile:

$$\underline{Y}_{dd} = \frac{1}{3} (\underline{Z}_{U1} \cdot \underline{Y}_1 + \underline{Z}_{U2} \cdot \underline{Y}_2 + \underline{Z}_{U3} \cdot \underline{Y}_3); \quad (1.74)$$

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{3 \underline{\epsilon}_{U1}} (\underline{Z}_{U1} \cdot \underline{Y}_1 + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{U2} \cdot \underline{Y}_2 + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{U3} \cdot \underline{Y}_3);$$

$$\underline{Y}_{hh} = \frac{1}{3 \underline{\epsilon}_{Uh}} (\underline{Z}_{U1} \cdot \underline{Y}_1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{U2} \cdot \underline{Y}_2 + \underline{a} \cdot \underline{Z}_{U3} \cdot \underline{Y}_3);$$

Din relațiile (1.71) și (1.73) rezultă posibilitatea introducerii a trei scheme echivalente monofazate corespunzătoare celor trei secvențe pentru elementul nesimetric din rețeaua trifazată. Aceasta permite realizarea mai ușoară a unui model cu care să se reproducă nesimetriile dintr-o rețea trifazată.

Utilizând factorii complecși de nesimetrii curenții de secvență exprimați prin relațiile (1.39) devin:

$$\underline{I}_h = \frac{(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{12}) \underline{\epsilon}_{Uh} - \underline{Z}_{12}(1 + \underline{\epsilon}_{U1})}{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{12}) - 2\underline{Z}_{12}^2} \cdot \underline{U}_{ed};$$

$$\underline{I}_d = \frac{(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{12}) \underline{Z}_{12} \cdot \underline{\epsilon}_{Uh} + \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11}) \cdot \underline{\epsilon}_{U1} + \underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{12}^2}{(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{12}) [\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{12}) - 2\underline{Z}_{12}^2]} \cdot \underline{U}_{ed}; \quad (1.75)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{12}) \underline{Z}_{12} \cdot \underline{\epsilon}_{Uh} + \underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{11}) + (\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{12}^2) \underline{\epsilon}_{U1}}{(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{12}) [\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{12}) - 2\underline{Z}_{12}^2]} \cdot \underline{U}_{ed};$$

cu ajutorul curenților de secvență se exprimă curenții de fază indiferent de tipul nesimetriei introdusă prin impedanțele Z_1, Z_2, Z_3 din fig.1.1. Dacă nesimetria este transversală, aplicând teorema generatorului echivalent de tensiune rezultă că tensiunile U_{ed}, U_{ei} și U_{eh} sînt tocmai componentele simetrice ale tensiunilor de fază la locul de defect înaintea apariției defectului, iar impedanțele Z_1 reprezintă impedanța echivalentă pasivizată văzută de la locul de defect, a întregii rețele.

Factorii complecși de nesimetrie din relațiile (1.75) se determină din tensiunile de fază de la locul în care apare defectul înaintea apariției acestuia.

Din relațiile (1.75) se determină curenții de secvență, deci se pot afla și factorii complecși de nesimetrie ai curenților $\underline{\epsilon}_{Ih}$ și $\underline{\epsilon}_{I1}$. Avînd acești factori din relațiile (1.72) se determină impedanțele de secvență echivalente nesimetriei astfel încît să se poată reproduce în laborator schemele de secvență monofazate echivalente rețelei care prezintă nesimetria.

Dacă nesimetria este longitudinală factorii complecși de nesimetrie sînt ai curselor echivalente celor două sisteme simetrice legate prin elementul nesimetric. Dacă linia pe care apare defectul este radială atunci unul din sistemele nesimetrice este pasiv și factorii complecși de nesimetrie din relațiile (1.75) sînt ai tensiunii de fază a sursei.

Relațiile (1.74) justifică introducerea factorilor complecși de nesimetrie deoarece introducerea acestora permite realizarea schemelor de secvență independente între ele, chiar dacă sistemul de tensiuni înaintea apariției defectului este nesimetric.

1.4.2. Calculul unui scurtcircuit monofazat folosind factorii și operatorii complecși de nesimetrie

Admițînd că înaintea apariției scurtcircuitului monofazat tensiunile la locul de defect nu constituie un sistem simetric, se pot determina factorii complecși de nesimetrie $\underline{\epsilon}_{U1}$ și $\underline{\epsilon}_{Uh}$. Considerînd rezistența de trecere la locul de defect ca avînd o valoare scîntă, pentru calculul componentelor de secvență ale curenților de defect se folosesc relația [14]:

$$I_d = I_h = I_1 = \frac{U_{dx} (1 + \underline{\epsilon}_{U1} + \underline{\epsilon}_{Uh})}{Z_{de} + Z_{1e} + Z_{2e} + 3(Z_0 + R_f)} \quad (1.76)$$

unde R_f este rezistența de trecere la locul de defect; Z_{de}, Z_{1e} și Z_{2e} sînt impedanțele de secvență echivalente ale generatoarelor de tensiune (Thevenin) la care se reduce rețeaua față de locul de defect;

U_{dx}, U_{1x}, U_{2x} tensiunile de secvență ale generatorilor de tensiune la care se reduce rețeaua față de locul de defect; $\underline{\xi}_{U1}, \underline{\xi}_{U2}$ reprezintă factorii complecși de nesimetrie ai tensiunilor la locul de defect înaintea apariției scurtcircuitului monofazat.

După apariția scurtcircuitului monofazat, tensiunile de secvență la locul de defect se exprimă prin relațiile [77], [92], [109]:

$$\begin{aligned} U'_{dx} &= U_{dx} - Z_{de} \cdot I_d \quad ; \quad U'_{1x} = U_{1x} - Z_{1e} \cdot I_1 \quad ; \quad (1.77) \\ U'_{2x} &= U_{2x} - Z_{2e} \cdot I_2 \quad ; \end{aligned}$$

Din relațiile (1.77) se determină factorii complecși de nesimetrie ai tensiunilor după apariția defectului obținându-se expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{\xi}'_{U_{x1}} &= \frac{Z_{1e} + Z_{2e} + 3(Z_n + R_f) \cdot \underline{\xi}_{U_{x1}} - Z_{1e}(1 + \underline{\xi}_{U_{x2}})}{Z_{de} + Z_{1e} + 3(R_f + Z_n) - Z_{de}(\underline{\xi}_{U_{x1}} + \underline{\xi}_{U_{x2}})} \quad ; \\ \underline{\xi}'_{U_{x2}} &= \frac{Z_{1e} + Z_{1e} + 3(Z_n + R_f) \cdot \underline{\xi}_{U_{x2}} - Z_{2e}(1 + \underline{\xi}_{U_{x1}})}{Z_{1e} + Z_{2e} + 3(Z_n + R_f) - Z_{de}(\underline{\xi}_{U_{x1}} - \underline{\xi}_{U_{x2}})} \quad ; \end{aligned} \quad (1.78)$$

Determinându-se din relațiile (1.78) factorii complecși de nesimetrie ai tensiunilor la locul de defect și înlocuindu-i în relațiile (1.69) se obțin operatorii complecși de nesimetrie ai fazelor.

$$\begin{aligned} a_{U_{x1}} &= 1 + \underline{\xi}'_{U_{x1}} + \underline{\xi}'_{U_{x2}} \quad ; \\ a_{U_{x2}} &= 1 + a^2 \cdot \underline{\xi}'_{U_{x1}} + a \cdot \underline{\xi}'_{U_{x2}} \quad ; \\ a_{U_{x3}} &= 1 + a \cdot \underline{\xi}'_{U_{x1}} + a^2 \cdot \underline{\xi}'_{U_{x2}} \quad ; \end{aligned} \quad (1.79)$$

Tensiunile la locul de defect se determină cu relațiile (1.77) și (1.79):

$$U'_{1x} = a_{U_{x1}} \cdot U_{dx} \quad ; \quad U'_{2x} = a_{U_{x2}} \cdot U_{dx} \quad ; \quad U'_{3x} = a_{U_{x3}} \cdot U_{dx} \quad ; \quad (1.80)$$

Considerând că defectul a apărut pe faza 1 curentul la locul de defect se exprimă prin relația:

$$I_{1def} = \frac{U'_{1x}}{R_f} \quad ; \quad (1.81)$$

Considerând linia pe care apare defectul ca fiind radială, cunoscându-se tensiunile la locul de defect (1.80) se pot determina cu ușurință curenții prin consumator, respectiv curenții prin linia care alimentează defectul.

Cunoscând acești curenți se determină operatorii complecși de nesimetrie ai fazelor a_{I1} din relațiile (1.69), respectiv operatorii complecși de nesimetrie datorată cuplajelor magnetice dintre faze, d_{I1}, i_{I1}, h_{I1} din relațiile (1.70).

Dacă între faze există cuplaje magnetice tensiunile de secvență se exprimă funcție de curenții de secvență prin relațiile [11], [14]:

$$\dot{U}_{d1} = \dot{Z}'_{dd} \cdot \dot{I}_{d1} ; \quad \dot{U}_{q1} = \dot{Z}'_{q1} \cdot \dot{I}_{q1} ; \quad \dot{U}_{h1} = \dot{Z}'_{hh} \cdot \dot{I}_{h1} ; \quad (1.82)$$

unde:

$$\begin{aligned} \dot{Z}'_{dd} &= \dot{Z}_{dd} + \dot{Z}_{dM} ; & \dot{Z}'_{q1} &= \dot{Z}_{q1} + \dot{Z}_{qM} ; \\ \dot{Z}'_{hh} &= \dot{Z}_{hh} + \dot{Z}_{hM} ; \end{aligned} \quad (1.83)$$

Impedanțele \dot{Z}'_{dd} , \dot{Z}'_{q1} , \dot{Z}'_{hh} se determină din relațiile (1.72), iar impedanțele \dot{Z}_{dM} , \dot{Z}_{qM} , \dot{Z}_{hM} se determină cu relațiile:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{dM} &= \frac{1}{3} (\dot{a}_{11} \cdot \dot{Z}_{q3} + \dot{a}_{12} \cdot \dot{Z}_{31} + \dot{a}_{13} \cdot \dot{Z}_{12}) ; & (1.84) \\ \dot{Z}_{qM} &= \frac{1}{3\dot{E}_{11}} (\dot{a}_{11} \cdot \dot{Z}_{q3} + \dot{a}_{12} \cdot \dot{Z}_{31} + \dot{a}_{13} \cdot \dot{Z}_{12}) ; \\ \dot{Z}_{hM} &= \frac{1}{3\dot{E}_{1h}} (\dot{a}_{11} \cdot \dot{Z}_{q3} + \dot{a}_{12} \cdot \dot{Z}_{31} + \dot{a}_{13} \cdot \dot{Z}_{12}) ; \end{aligned}$$

În aceste relații impedanțele \dot{Z}_{ij} (i, j) reprezintă impedanțele de cuplaj dintre faze.

Relațiile (1.82) și (1.83) permit introducerea a trei scheme de secvență independente între ele (fig.1.2) deși este desequilibrată și sursa și consumatorul. Aceste scheme permit reproducerea în laborator mai simplu a unui astfel de defect.

Dacă consumatorul este simetric ($\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_3$ și $\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{23} = \dot{Z}_{31}$) din relațiile (1.84) rezultă $\dot{Z}_{dM} = \dot{Z}_{qM} = -\dot{Z}_{12}$, iar din relațiile (1.72) se obține $\dot{Z}'_{dd} = \dot{Z}'_{q1} = \dot{Z}'_{hh} = \dot{Z}_1$, impedanțe care dacă se înlocuiesc în schemele din fig.1.2 ne conduc la scheme de secvență pentru consumatori simetrici, cunoscute în literatură [21], [41], [85], [102], [124].

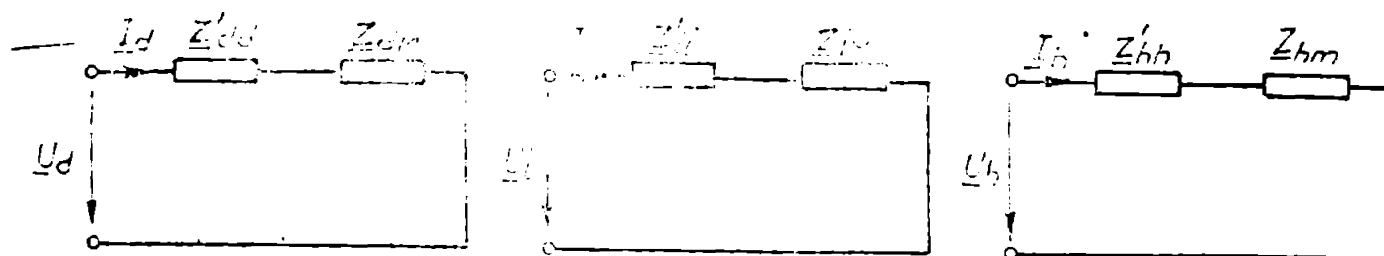


Fig.1.2. Schemele de secvență fără cuplaje magnetice

În lucrarea [14] s-au calculat factorii și operatorii complecși de nesimetrie pentru o rețea de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor în cazul unui scurtcircuit monofazat (simplă punere la pământ) funcție de valoarea rezistenței de trecere la locul de defect R_g . A rezultat o variație mai pronunțată pentru

factorul complex de nesimetrie $\underline{\xi}_{DU}$ decât pentru factorul complex $\underline{\xi}_{IU}$. De asemenea la un astfel de defect factorul complex de nesimetrie $\underline{\xi}_{HI}$ prezintă o variație pronunțată motiv pentru care sesizarea unui scurtcircuit monofazat se face controlind curentul homopolar.

Comparind relațiile (1.31) și (1.42) se constată simplitatea relației de calcul al curentului de defect folosind factorii și operatorii complecși de nesimetrie.

1.5. Nesimetrii multiple

1.5.1. Stabilirea ecuației generale

Conform celor prezentate anterior matricea de nesimetrie \underline{Z} prin care se reproduce defectul leagă între ele două sisteme simetrice. Deci rețeaua în totalitatea ei poate fi privită ca un ansamblu de rețele simetrice 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 (fig.1.3).

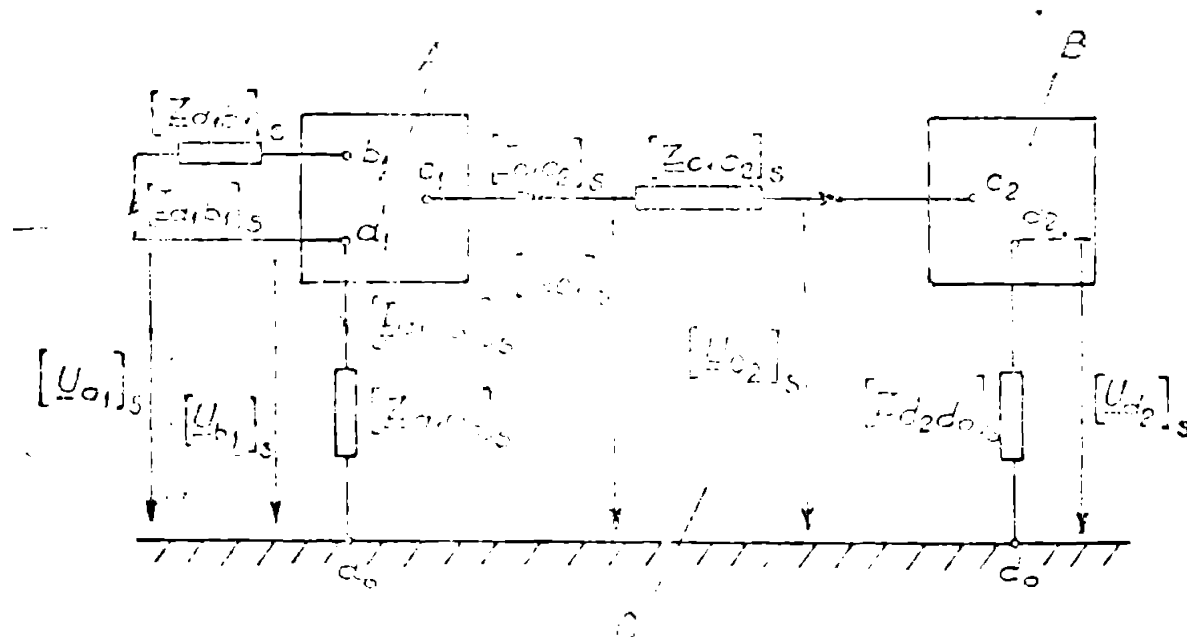


Fig.1.3. Explicativă privind calculul unei nesimetrii multiple

În fig.1.3, A, B și C se reprezintă 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 fig.1.3 nodul a_1 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 ($[U_{a1}]_s \dots [U_{a2}]_s$ fig.1.3) precum și curenții ce ar parcurge elementul nesimetric ($[I_{a_1 b_1}]_s \dots [I_{a_2 b_2}]_s$), obținându-se rețele simetrice cu n noduri în care la fiecare nod (m) s-a introdus o tensiune $[U_{mj}]_s$ sau un curent $[I_{mj,1}]_s$ (1 fiind nodul legat prin matricea elementului nesimetric $[Z_{m,1}]_s$ cu nodul 1). 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 (cifră 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_j numărul de noduri în care apar nesimetrii în rețeaua j , pentru fiecare nod al acestei rețele se poate scrie o relație de forma [8]:

$$[U_{amj}]_s - [U_{mj}]_s = [Z_{mj,mj}]_s \cdot [I_{mj,1}]_s + \sum_{1,j=1}^n [Z_{mj,1j}]_s \cdot [I_{1j,mj}]_s \quad (1.85)$$

În relația (1.85) mărimile au următoarea semnificație:

- $[U_{amj}]_s$ - matricea coloană a componentelor simetrice a tensiunii din nodul m înaintea apariției defectului
- $[U_{mj}]_s$ - matricea coloană a componentelor simetrice a tensiunii din nodul m al rețelei j
- $[Z_{mj,mj}]_s$ - matricea de servență a impedanțelor proprii văzute din nodul m_j .
- $[I_{mj,1}]_s$ - matricea coloană a componentelor simetrice a curentului din latura $m_j, 1$ orientat spre 1
- $[I_{1j,mj}]_s$ - matricea coloană a componentelor simetrice ale curentului din latura $1j, \nu$ orientat spre nodul ν .

Scriind ecuația de forma (1.85) pentru fiecare nod al unei rețele și grupînd matricial toate aceste ecuații se obține ecuația

$$[8], [9]:$$

$$\begin{bmatrix} [U_{aaj}]_s - [U_{aj}]_s \\ [U_{abj}]_s - [U_{bj}]_s \\ \vdots \\ [U_{amj}]_s - [U_{mj}]_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{aj,aj}]_s & [Z_{aj,bj}]_s & \dots & [Z_{aj,nj}]_s \\ [Z_{bj,aj}]_s & [Z_{bj,bj}]_s & \dots & [Z_{bj,nj}]_s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [Z_{mj,aj}]_s & [Z_{mj,bj}]_s & \dots & [Z_{mj,nj}]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{aj,\alpha}]_s \\ [I_{bj,\beta}]_s \\ \vdots \\ [I_{mj,\gamma}]_s \end{bmatrix} \quad (1.86)$$

$$\text{sau } [\Delta U_{es}]_s = [Z_{nj, nj}]_s \cdot [I]_s + [Z_{nj, lj}]_s \cdot [I] \quad (1.87)$$

Ecuații de forma (1.87) se pot scrie atâtea câte rețele simetrice există. Rangul hipermatricilor impedanți este egal cu numărul de noduri al fiecărei rețele simetrice existente.

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

$$[U_{nj}]_s = [U_{en}]_s = [Z_{nj, ni}]_s \cdot [I_{nj, ni}]_s \quad (1.88)$$

Exprimând matricea curenților din relația (1.88) se obține:

$$[I_{nj, ni}]_s = [Z_{nj, ni}]_s^{-1} \cdot \{ [U_{en}]_s - [U_{nj}]_s \} \quad (1.89)$$

Relațiile (1.86) și (1.88) sau (1.86) și (1.89) dau ecuațiile necesare determinării matricilor de secvențe a tensiunilor și curenților din fiecare nod în care apar nesimetrice.

Pentru a ilustra modul în care se aplică ecuația generală (1.86) în determinarea tensiunilor și curenților din nodurile în care apar nesimetrice se ia în considerare un caz mai general de nesimetrie-care poate să apară într-un sistem energetic.

1.5.2. Elemente nesimetrice legați între ele prin 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 sînt legați între ele prin elemente nesimetrice (fig.1.4) pentru determinarea hipermatricii curenților din nodurile care prezintă nesimetrice se scriu relații de forma (1.86) pentru cele trei rețele simetrice obținându-se:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [U_{en1}]_s - [U_{n1}]_s \\ [U_{en1}]_s - [U_{o1}]_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [Z_{e1a1}]_s & [Z_{e1b1}]_s \\ [Z_{n1a1}]_s & [Z_{n1b1}]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{n1a2}]_s \\ [I_{o1a1}]_s \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} [U_{en2}]_s - [U_{n2}]_s \\ [U_{en2}]_s - [U_{o2}]_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [Z_{e2a2}]_s & [Z_{e2o2}]_s \\ [Z_{n2a2}]_s & [Z_{n2o2}]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{n1a2}]_s \\ [I_{o2o3}]_s \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} [U_{en3}]_s - [U_{n3}]_s \\ [U_{en3}]_s - [U_{o3}]_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [Z_{e3a3}]_s & [Z_{e3o3}]_s \\ [Z_{n3a3}]_s & [Z_{n3o3}]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{o3a1}]_s \\ [I_{o2o3}]_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.90)$$

Intre tensiunile și curenții elementelor nesimetrice care legați între ele rețelele simetrice se pot scrie relațiile,

considerând $[Z_{a1a2}]_S = [Z_{o2o3}]_S = [Z_{b3b1}]_S$ și $[Z_{a2o2}]_S = [Z_{o3b3}]_S = [0]$ se obține relația din care se determină matricea de secvență a curentului prin elementul nesimetric. În acest caz elementul nesimetric este constituit din inserierea celor trei elemente nesimetrice din fig.1.4.

Relația care permite calculul curentului prin elementul nesimetric este:

$$[U_{eal}]_S - [U_{ehl}]_S = \left\{ [Z_{a1a1}]_S + [Z_{b1b1}]_S - 2[Z_{o1a1}]_S + [Z_{a1a2}]_S + [Z_{o2o3}]_S + [Z_{b3b1}]_S \right\} \cdot [I_{a1a2}]_S \quad (1.93)$$

sau înlocuind elementul nesimetric cu unul echivalent relația (1.93) devine:

$$[U_{eal}]_S - [U_{ehl}]_S = \left\{ [Z_{a1a1}]_S + [Z_{b1b1}]_S + [Z_{eete}]_S - 2[Z_{e1b1}]_S \right\} \cdot [I_{a1a2}]_S \quad (1.94)$$

Particularizând relațiile (1.92) se pot obține și relațiile necesare calculului nesimetriei dacă elementele nesimetrice leagă între ele două rețele simetrice.

La rezolvarea ecuației (1.92) se poate folosi și metoda vectorilor ortogonali [9]. Se menționează însă faptul că dacă rezistența de trecere la locurile de defect este mare (comparabilă cu impedanțele transversale ale rețelei în care a apărut defectul) metoda poate conduce la erori inadmisibile.

2. ANALIZA DEFECTELOR DE TIP CONDUCTOR ÎNTRERUPT ȘI CĂZUT LA PĂMÎNT ÎNTR-O REȚEA DE MEDIU TENSIUNE

În acest capitol se analizează următoarele defecte ce pot interveni într-o rețea de medie tensiune: conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator; conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă; respectiv cazul particular simplă punere la pământ prin rezistență de trecere mare. Pentru aceste defecte se va determina tensiunea homopolară care apare pe barele de medie tensiune ale stației de transformare pentru rețelele cu nulul tratat prin bobină de strângere sau izolat, respectiv curentul ce se închide prin rezistorul de tratare al nulului rețelei la rețelele cu nulul tratat prin rezistor. Se determină aceste mărimi deoarece sînt folosite pentru sesizarea defectelor respective [5], [66], [73], [86], [95]. Se vor stabili limitele în care fiecare din aceste defecte pot fi sesizate prin protecțiile existente.

Conform normativelor în vigoare [151] rețelele de medie tensiune funcționează numai radial deci dacă se întrerupe un conductor de fază acesta poate cădea la pământ spre sursă sau spre consumator, de aceea este necesar să se analizeze cele două tipuri de defecte.

2.1. Conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator

Acest defect se tratează ca un defect dublu și anume: o întrerupere de fază și un scurtcircuit monofazat. Modul în care elementele nesimetrice la un astfel de defect interconectează rețelele simetrice este prezentată în fig.2.1.

2.1.1. Stabilirea expresiei tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune și a curentului ce se închide prin impedanța de tratare a nulului

Pentru determinarea tensiunilor și curenților de secvență la cele două noduri de defect (a_1, b_1) folosim relațiile deduse în capitolul 1. În fig.2.1 prin A s-a simbolizat rețeaua simetrică echivalentă sursei, prin B rețeaua simetrică echivalentă consumatorilor alimentată prin linia cu defect [16], prin C rețeaua simetrică de nul (pământ). Cele două elemente nesimetrice care leagă rețelele simetrice între ele au matricile de secvență și impedanțelor $[Z_{a1a2}]_s$, respectiv $[Z_{a2b3}]_s$.

Ecuația matricială din care se determină matricile de secvență ale curenților prin elementele nesimetrice se obține din relația (1.92)

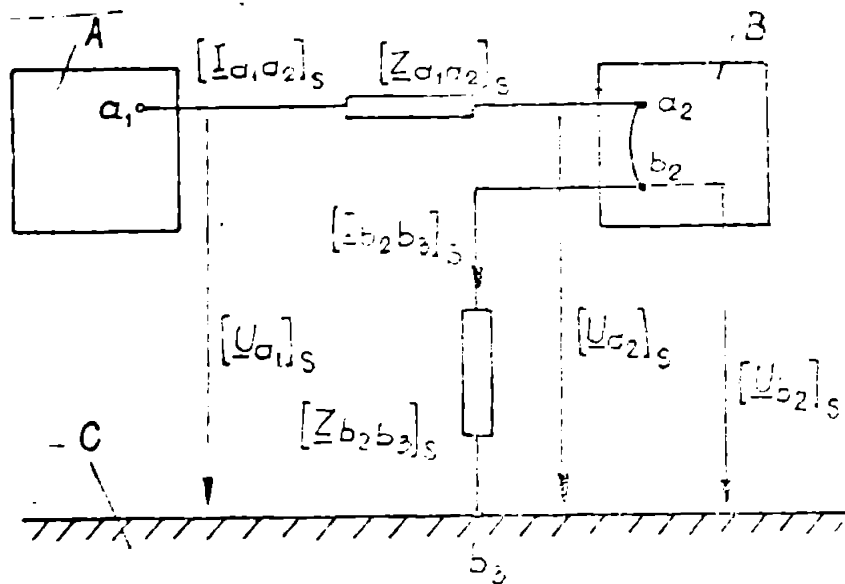


Fig.2.1. Explicativă privind calculul defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator

În care se ține seama că rețeaua simetrică d este degenerată (impedanțele proprii ale acesteia fiind nule și nu are surse) și că nu există legătura dintre nodurile b_3 și b_1 (fig.1.4) deci curenții care or circule prin această legătură devine nul $[I_{b3b1}]_s = [0]$. Cu aceste observații relația (1.92) devine:

$$\begin{bmatrix} [U_{ea1}]_s - [U_{ea2}]_s \\ [U_{eb2}]_s - [U_{eb3}]_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{a1a2}]_s + [Z_{a1a1}]_s + [Z_{a2a2}]_s & -[Z_{a2b2}]_s \\ -[Z_{a2b2}]_s & [Z_{b2b2}]_s + [Z_{b2b3}]_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{a1a2}]_s \\ [I_{b2b3}]_s \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Având în vedere natura rețelelor simetrice din fig.2.1 matricile de secvențe ale impedanțelor acestora devin:

$$[Z_{a1a1}]_s = [Z_0]_s, \quad [Z_{a2a2}]_s = [Z_0]_s \quad (2.2)$$

Deoarece nodurile a_2 și b_2 (fig.2.1) sînt scurtcircuitate matricia de secvențe a legăturii dintre cele două noduri este identică nulă, iar matricia $[Z_{a2a2}]_s$ este identică cu matricia $[Z_{b2b2}]_s$. De asemenea matricile tensiunilor electromotoare din nodurile a_2 și b_2 se pot exprima funcție de matricile de secvențe ale curenților $[I_{a1a2}]_s$ și $[I_{b2b3}]_s$ și impedanțe astfel:

$$[U_{ea2}]_s = -[Z_{a2a2}]_s \cdot [I_{b2b3}]_s, \quad [U_{eb2}]_s = [Z_{a2a2}]_s \cdot [I_{a1a2}]_s \quad (2.3)$$

Introducînd relațiile (2.2) și (2.3) în (2.1) și pentru simplificarea scrierii făcînd notațiile $I_{a1a2} = I'$ și $I_{b2b3} = I$, respectiv $Z_{a1a2} = Z_1$ și $Z_{b2b3} = Z_2$ se obține:

$$\begin{bmatrix} [U_{ea1}]_s + [Z_0]_s \cdot [I_0] \\ [Z_0]_s \cdot [I_0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_0]_s + [Z_0]_s + [Z_1]_s & [0] \\ [0] & [Z_2]_s + [Z_0]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I']_s \\ [I]_s \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Regrupînd termenii în relația (2.4) și renunțînd la indicele tensiunii electromotoare a generatorului echivalent ($U_{ea1} = U_0$), aceasta devine:

$$\begin{bmatrix} [U_0]_s \\ [0]_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_0]_s + [Z_c]_s + [Z_1]_s & -[Z_0]_s \\ [Z_2]_s + [Z_c]_s & [Z_0]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I']_s \\ [I]_s \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Din ecuația (2.5) se determină matricile de secvență ale curenților. Pentru aceasta înmulțim hipermatricile (2.5) obținând următorul sistem de ecuații matriciale:

$$\begin{aligned} [U_0]_s &= [Z_0]_s + [Z_c]_s + [Z_1]_s \cdot [I']_s - [Z_0]_s \cdot [I]_s \\ [0] &= -[Z_0]_s \cdot [I']_s + [Z_c]_s + [Z_2]_s \cdot [I]_s \end{aligned} \quad (2.6)$$

Matricea de secvență a impedanțelor se exprimă prin relația (1.15), iar termenii acestei matrici prin relațiile (1.16).

Din a doua ecuație a sistemului (2.6) se determină matricea:

$$[I]_s = [Z_c]_s + [Z_2]_s^{-1} + [Z_0]_s \cdot [I']_s \quad (2.7)$$

Înlocuindu-se relația (2.7) în prima ecuație a sistemului (2.6) se obține:

$$[I']_s = \left\{ [Z_0]_s + [Z_c]_s + [Z_1]_s - [Z_0]_s \cdot [Z_c]_s + [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_0]_s \right\}^{-1} \cdot [U_0]_s \quad (2.8)$$

Introducându-se relația (2.8) în (2.7) se obține pentru matricea $[I]_s$ expresia:

$$[I]_s = [Z_c]_s + [Z_2]_s^{-1} + [Z_0]_s \cdot \left\{ [Z_0]_s + [Z_c]_s + [Z_1]_s - [Z_0]_s \cdot [Z_c]_s + [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_0]_s \right\}^{-1} \cdot [U_0]_s \quad (2.9)$$

Deoarece elementul nesimetric care leagă între ele rețelele simetrice A și B (fig.3.1) are impedanța pe o fază infinit și pe celelalte două faze zero, matricea $[Z_1]_s$ conduce la nedeterminări. Pentru a se evita

aceasta se înlocuiește în prima ecuație a sistemului (2.6) (conform relației (1.29)) produsul dintre matricea de secvență a impedanțelor cu matricea de secvență a curenților prin matricea de secvență a tensiunilor obținându-se:

$$[U_0]_s = \left\{ [Z_0]_s + [Z_c]_s - [Z_0]_s \cdot [Z_c]_s + [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_0]_s \right\} \cdot [I]_s + [U]_s \quad (2.10)$$

Se observă că în această ecuație avem două necunoscute și șase matrici: $[I]_s$ și matricea $[U]_s$. Pentru a le putea determina univoc, când în vedere că ambale sînt matrici diagonale cu trei elemente mai avem nevoie de trei ecuații, care le obținem din condițiile impuse la locul de defect [8], [9], [18], [21], [25].

$$U_0^1 = U_0^2 = U_0^3 = U_0 ; \quad I_0^1 + I_0^2 + I_0^3 = 0 \quad (2.11)$$

Făcându-se înlocuirile corespunzătoare în relațiile (1.30) respectiv (1.31) se obțin termenii matricii inverse $[[Z_c]_S + [Z_e]_S]^{-1}$ deci relația (2.7) devine:

$$[I]_S = \begin{bmatrix} Z_{ch} \cdot Y_{11} & Y_{12} \cdot Z_{od} & Y_{13} \cdot Z_{ci} \\ Z_{ch} \cdot Y_{21} & Y_{22} \cdot Z_{od} & Y_{23} \cdot Z_{ci} \\ Z_{ch} \cdot Y_{31} & Y_{32} \cdot Z_{od} & Y_{33} \cdot Z_{ci} \end{bmatrix} \cdot [I']_S \quad (2.12)$$

Înlocuind relația (2.12) în prima ecuație a sistemului (2.6) se obține

$$[U_c]_S = [U']_S + \begin{bmatrix} Z_{ch} + Z_{ch} \cdot Z_{ch}^2 \cdot Y_{11} & -Z_{ch} \cdot Z_{od} \cdot Y_{12} & -Z_{ch} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{13} \\ -Z_{ch} \cdot Z_{od} \cdot Y_{21} & Z_{od} + Z_{od} \cdot Z_{od}^2 \cdot Y_{22} & -Z_{od} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{23} \\ -Z_{ch} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{31} & -Z_{ci} \cdot Z_{od} \cdot Y_{32} & Z_{ci} + Z_{ci} \cdot Z_{ci}^2 \cdot Y_{33} \end{bmatrix} \cdot [I']_S \quad (2.13)$$

Notând termenii matricii impedanță din relația (2.13) cu Z_{kj} ($k=1,3$; $j=1,3$), dezvoltând această ecuație având în vedere ecuațiile (2.11) și eliminând tensiunea U'_h se obțin ecuațiile:

$$\begin{aligned} U_{od} - U_{ch} &= (Z_{21} - Z_{11}) \cdot I_h^i + (Z_{22} - Z_{12}) \cdot I_d^i + (Z_{23} - Z_{13}) \cdot I_l^i \\ U_{ci} - U_{ch} &= (Z_{31} - Z_{11}) \cdot I_h^i + (Z_{32} - Z_{12}) \cdot I_d^i + (Z_{33} - Z_{13}) \cdot I_l^i \\ I_h^i + I_d^i + I_l^i &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Făcând următoarele notații: $b_1 = Z_{11} + Z_{22} - Z_{12} - Z_{21}$; $b_2 = Z_{11} + Z_{33} - Z_{31} - Z_{13}$; $b_3 = Z_{11} + Z_{32} - Z_{12} - Z_{31}$; $b_4 = Z_{11} + Z_{23} - Z_{21} - Z_{13}$; $b_5 = Z_{32} + Z_{13} - Z_{12} - Z_{33}$; $b_6 = Z_{22} + Z_{33} - Z_{12} - Z_{23}$ (2.15)

pentru curenții I_h^i , I_d^i și I_l^i se obțin expresiile:

$$I_h^i = \frac{b_5(U_{od} - U_{ch}) - b_6(U_{ci} - U_{ch})}{b_1 \cdot b_2 - b_3 \cdot b_4} \quad (2.16)$$

$$I_d^i = \frac{b_2(U_{od} - U_{ch}) - b_4(U_{ci} - U_{ch})}{b_1 \cdot b_2 - b_3 \cdot b_4} \quad (2.17)$$

$$I_l^i = \frac{b_3(U_{od} - U_{ch}) - b_3(U_{od} - U_{ch})}{b_1 \cdot b_2 - b_3 \cdot b_4} \quad (2.18)$$

Înlocuind relațiile (2.16), (2.17), (2.18) în relația (2.12) pentru componentele de secvență ale curentului I se obțin expresiile:

$$I_h = \frac{(U_{od} - U_{ch})(b_5 \cdot Z_{ch} \cdot Y_{11} + b_2 \cdot Z_{od} \cdot Y_{12} - b_3 \cdot Z_{ci} \cdot Y_{13})}{b_1 \cdot b_2 - b_3 \cdot b_4}$$

$$\frac{(U_{ed} - U_{eh})(B_6 \cdot Z_{eh} \cdot X_{11} + B_4 \cdot Z_{od} \cdot X_{12} - B_1 \cdot Z_{oi} \cdot X_{13})}{B_1 \cdot B_2 - B_3 \cdot B_4} \quad (2.19)$$

$$I_4 = \frac{(U_{ed} - U_{eh})(B_5 \cdot Z_{eh} \cdot X_{21} + B_2 \cdot Z_{od} \cdot X_{22} - B_3 \cdot Z_{oi} \cdot X_{23})}{B_1 \cdot B_2 - B_3 \cdot B_4}$$

$$\frac{(U_{ed} - U_{eh})(B_6 \cdot Z_{eh} \cdot X_{21} + B_4 \cdot Z_{od} \cdot X_{22} - B_1 \cdot Z_{oi} \cdot X_{23})}{B_1 \cdot B_2 - B_3 \cdot B_4} \quad (2.20)$$

$$I_4 = \frac{(U_{ed} - U_{eh})(B_5 \cdot Z_{eh} \cdot X_{31} + B_2 \cdot Z_{od} \cdot X_{32} - B_3 \cdot Z_{oi} \cdot X_{33})}{B_1 \cdot B_2 - B_3 \cdot B_4}$$

$$\frac{(U_{ed} - U_{eh})(B_6 \cdot Z_{eh} \cdot X_{31} + B_4 \cdot Z_{od} \cdot X_{32} - B_1 \cdot Z_{oi} \cdot X_{33})}{B_1 \cdot B_2 - B_3 \cdot B_4} \quad (2.21)$$

Elementele matricii Z_e două se are în vedere faptul că aceste impedanțe nu prezintă cuplaje și că pe două faze sînt egale, devin:

$$[Z_e]_B = \begin{bmatrix} Z_{eh} & Z_e^0 & Z_e^0 \\ Z_e^0 & Z_{ed} & Z_e^0 \\ Z_e^0 & Z_e^0 & Z_{ei} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Din relațiile (2.6) și (2.22) pentru elementele matricii admitanță (relația 2.12) se obțin expresiile:

$$X_{11} = \frac{1}{D} [(Z_{od} + Z_{ed})(Z_{oi} + Z_{ei}) - Z_e^0{}^2], \quad X_{12} = \frac{Z_e^0}{D} (Z_e^0 - Z_{oi} - Z_{ei}),$$

$$X_{13} = \frac{Z_e^0}{D} (Z_e^0 - Z_{od} - Z_{ed}), \quad X_{21} = \frac{Z_e^0}{D} (Z_e^0 - Z_{oi} - Z_{ei}),$$

$$X_{22} = \frac{1}{D} [(Z_{eh} + Z_{eh})(Z_{ei} + Z_{oi}) - Z_e^0{}^2], \quad X_{23} = \frac{Z_e^0}{D} (Z_e^0 - Z_{eh} - Z_{eh}),$$

$$X_{31} = \frac{Z_e^0}{D} (Z_e^0 - Z_{od} - Z_{ed}), \quad X_{32} = \frac{Z_e^0}{D} (Z_e^0 - Z_{eh} - Z_{eh}), \quad (2.23)$$

$$X_{33} = \frac{1}{D} [(Z_{eh} + Z_{eh})(Z_{od} + Z_{ed}) - Z_e^0{}^2]; \quad D = (Z_{eh} + Z_{eh}) [(Z_{od} + Z_{ed})(Z_{oi} + Z_{ei}) - Z_e^0{}^2] - Z_e^0{}^2 (Z_{oi} + Z_{ei} + Z_{od} + Z_{ed} - 2Z_e^0{}^2);$$

Se observă din relațiile (2.23) că elementele matricii admitanță satisfac relațiile de reciprocitate:

$$X_{12} = X_{21}; \quad X_{13} = X_{31}; \quad X_{23} = X_{32}; \quad (2.24)$$

De asemenea parametri B_{kj} satisfac și ei condițiile de reciprocitate.

$$B_{12} = B_{21}; \quad B_{13} = B_{31}; \quad B_{23} = B_{32} \quad (2.25)$$

Înlocuind expresiile parametrilor B_{kj} în relațiile (2.15) parametri b_j ($j=1,6$) se exprimă prin:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{ch} - \bar{z}_{ch}^2 \cdot \bar{y}_{11} + \bar{z}_{od} + \bar{z}_{od} - \bar{z}_{od}^2 \cdot \bar{y}_{22} + 2\bar{z}_{ch} \cdot \bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{21} ; \\
 h_2 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{ch} - \bar{z}_{ch}^2 \cdot \bar{y}_{11} + \bar{z}_{oi} + \bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi}^2 \cdot \bar{y}_{33} + 2\bar{z}_{ch} \cdot \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{31} ; \\
 h_3 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{ch} - \bar{z}_{ch}^2 \cdot \bar{y}_{11} - \bar{z}_{oi} \cdot \bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{32} + \bar{z}_{ch} (\bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{12} + \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{31}) ; \\
 h_4 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{ch} - \bar{z}_{ch}^2 \cdot \bar{y}_{11} - \bar{z}_{od} \cdot \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{23} + \bar{z}_{ch} (\bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{21} + \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{13}) ; \\
 h_5 &= \bar{z}_{ch} (\bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{12} - \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{13}) - \bar{z}_{oi} \cdot \bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{32} - \bar{z}_{oi} \cdot \bar{z}_{oi} + \bar{z}_{oi}^2 \cdot \bar{y}_{33} ; \\
 h_6 &= \bar{z}_{od} + \bar{z}_{od} - \bar{z}_{od}^2 \cdot \bar{y}_{22} - \bar{z}_{ch} \cdot \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{13} + \bar{z}_{ch} \cdot \bar{z}_{od} \cdot \bar{y}_{12} + \bar{z}_{od} \cdot \bar{z}_{oi} \cdot \bar{y}_{23}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Avind în vedere faptul că transformatorul de medie tensiune pe joasă tensiune are infăgurarea de medie tensiune în conexiune triunghi sau stea, impedanța homopolară al consumatorului tinde la infinit. Parametrii h_j în acest caz devin:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \bar{z}_{od} + \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{od} - \bar{z}_{od} \frac{(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{oi}) \bar{z}_{od} - 2\bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od})}{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2} ; \\
 h_2 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{oi} + \bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi} \frac{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od}) \bar{z}_{oi} - 2\bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od} - \bar{z}_{od})}{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2} ; \\
 h_3 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{oi} \cdot \frac{\bar{z}_{od} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od}) + \bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od} - \bar{z}_{od})}{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2} ; \\
 h_4 &= \bar{z}_{ch} + \bar{z}_{oi} \frac{\bar{z}_{od} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od}) + \bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od} - \bar{z}_{od})}{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2} ; \\
 h_5 &= -\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi} + \frac{\bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od}) (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi}) + \bar{z}_{oi} \cdot \bar{z}_{od} (\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{oi}) + \bar{z}_{oi}^2 \cdot \bar{z}_{od}}{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2} ; \\
 h_6 &= \bar{z}_{od} + \bar{z}_{od} + \frac{\bar{z}_{oi} [(\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od})(\bar{z}_{od} - \bar{z}_{oi}) - \bar{z}_{oi} \cdot \bar{z}_{oi}] - \bar{z}_{od}^2 (\bar{z}_{od} + \bar{z}_{oi})}{(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2} .
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

Curenții de secvență I_h , I_d și I_1 pentru \bar{z}_{ch} se exprimă prin relațiile:

$$I_h = I_h^i = \frac{h_5 (U_{od} - U_{ch}) - h_6 (U_{oi} - U_{ch})}{h_1 \cdot h_2 - h_3 \cdot h_4} ; \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned}
 I_d &= \frac{1}{[(\bar{z}_{od} + \bar{z}_{od})(\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) - \bar{z}_{oi}^2] (h_1 \cdot h_2 - h_3^2)} \left\{ (U_{od} - U_{ch}) [h_5 \cdot \bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi} - \right. \\
 &- \bar{z}_{od}) + h_6 (\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) \cdot \bar{z}_{od} + h_3 \cdot \bar{z}_{oi} \cdot \bar{z}_{oi}] - (U_{oi} - U_{ch}) [h_6 \cdot \bar{z}_{oi} (\bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi} - \bar{z}_{od}) + \\
 &+ h_4 (\bar{z}_{oi} + \bar{z}_{od}) \cdot \bar{z}_{od} + h_3 \bar{z}_{oi} - \bar{z}_{oi}^2] \left. \right\} ; \tag{2.29}
 \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{1}{[(Z_{od} + Z_{ed})(Z_{oi} + Z_{ei}) - Z_0^2] (h_1 \cdot h_2 - h_3^2)} \left\{ (U_{ed} - U_{eh}) [h_5 \cdot Z_0^2 (Z_0^2 - Z_{ed} - Z_{ed}) - h_2 \cdot Z_0^2 \cdot Z_{od} - h_3 (Z_{od} + Z_{ed}) \cdot Z_{oi}] - (U_{ei} - U_{eh}) [h_6 \cdot Z_0^2 (Z_0^2 - Z_{ed} - Z_{ed}) - h_4 \cdot Z_{od} \cdot Z_0^2 - h_1 \cdot Z_{ei} (Z_{od} + Z_{ed})] \right\}; \quad (2.30)$$

În relațiile (2.27), (2.28), (2.29) și (2.30) s-a ținut seama de faptul că $Z_{ed} = Z_{ei}$.

Considerându-se parametrii transversali ai porțiunii de linie de la locul de defect la consumator (în spatele defectului) concentrați la locul de defect, pentru impedanțele de secvență ale elementului nesimetric Z_0 se obține expresiile:

$$Z_{eh} = Z_{ed} = Z_{ei} = \frac{1}{3} \cdot \frac{X_C^2}{R_C^2 + X_C^2} [R_C - X_C - j(2R_C^2 + 2X_C^2)] \quad (2.31)$$

$$Z'_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{X_C^2}{R_C^2 + X_C^2} (R_C + jX_C) \quad (2.32)$$

Este cunoscut faptul că reactanțele de secvență directă și inversă la motoare electrice nu sînt egale [16], [28], [32], [46], [47], [48]. Deoarece este greu de apreciat cît reprezintă motoarele electrice din consumatorii alimentați prin linia cu defect, reactanța de secvență inversă a consumatorului se consideră ca fiind o fracțiune din cea de secvență directă ($X_{oi} = k \cdot X_{od}$). Coeficientul k este subunitar dacă consumatorul este constituit și din motoare electrice, și egal cu unu cînd consumatorul este static ($X_{oi} = X_{od}$).

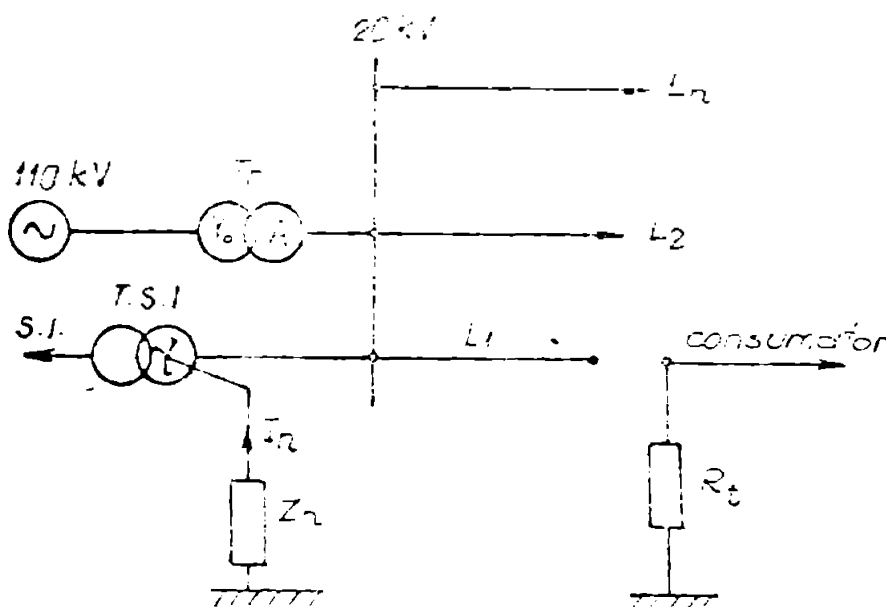


Fig.2.2. Schema monofilară a rețelei de medie tensiune în care apare defectul

Pentru cazul în care defectul de tip conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator se produce într-o rețea a cărei schemă monofilară este prezentată în fig.2.2 se stabilesc expresiile de calcul a curentului I_{n1} și a tensiunii U_{n0b} . Curentul I_{n1} care se închide

prin impedanța de tratare a nulului rețelei se determină cu relația:

$$I_n = -3 \frac{j X_C}{Z_{nTSTI} + 3Z_n - jX_C} \cdot I'_h \quad (2.33)$$

Tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare este:

$$U_{hb} = - \frac{jX_C(Z_{nTSTI} + 3Z_n)}{Z_{nTSTI} + 3Z_n - jX_C} \cdot I'_h \quad (2.34)$$

În relațiile (2.33) și (2.34) mărimile care intervin au următoarea semnificație: Z_{nTSTI} - impedanța de secvență homopolară a bobinei de creștere a nulului; X_C - reactanța capacitivă a întregii rețele de medie tensiune legată galvanic; Z_n - impedanța de tratare a nulului rețelei de medie tensiune. Curentul I'_h se determină cu relația (2.28).

Pentru a analiza modul în care parametrii din expresia tensiunii U_{hb} (2.34), respectiv din expresia curentului I_n (2.33) influențează valoarea acestor mărimi, se dau diferite valori acestor parametri. Calculele respective se efectuează cu ajutorul calculatorului, în acest sens întocmindu-se programul de calcul necesar.

2.1.2. Dependența tensiunii U_{hb} și a curentului I_n de condițiile în care are loc defectul

Condițiile în care are loc un astfel de defect determină valorile parametrilor ce intervin în relațiile de calcul a tensiunii U_{hb} (2.34) și a curentului I_n (2.33). Pentru a se putea analiza cât mai multe variante s-a întocmit un program de calcul în limbaj FORTRAN [75], [94], [100], [101], [131]. Schema logică a programului este prezentată în fig.2.3. Prin acest program se modifică rezistența de trecere la locul de defect (R_f), reactanța capacitivă a liniei cu defect în spatele defectului (X_C), puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect (S_C), raportul dintre reactanța de secvență inversă și directă a consumatorului prin coeficientul k . Tensiunea rețelei de medie tensiune, tensiunea homopolară inițială a barelor de medie tensiune, poziția defectului față de barele de medie tensiune ale stației de transformare și caracteristicile sursei ce alimentează linia cu defect se pot modifica prin cartelele de date. În calculul efectiv a tensiunii U_{hb} și a curentului I_n s-au folosit următoarele date de intrare [118], [130]: tensiunea de linie la locul de defect înaintea apariției acestuia 20 kV; impedanța sursei $Z_g = (0,1 + j2,1) \Omega$ (transformator 110/20 kV, 25 kVA); impedanța liniei pînă la locul de defect $Z_{Ld} = Z_{Li} = (1 + j0,9) \Omega$; $Z_{Lh} = (1,3 + j0,9) \Omega$; reactanța capacitivă a întregii rețele legată galvanic $X_C = 345 \Omega$; impedanța bobinei de tratare a nulului $Z_n = (0,5 + j105,8) \Omega$; impedanța

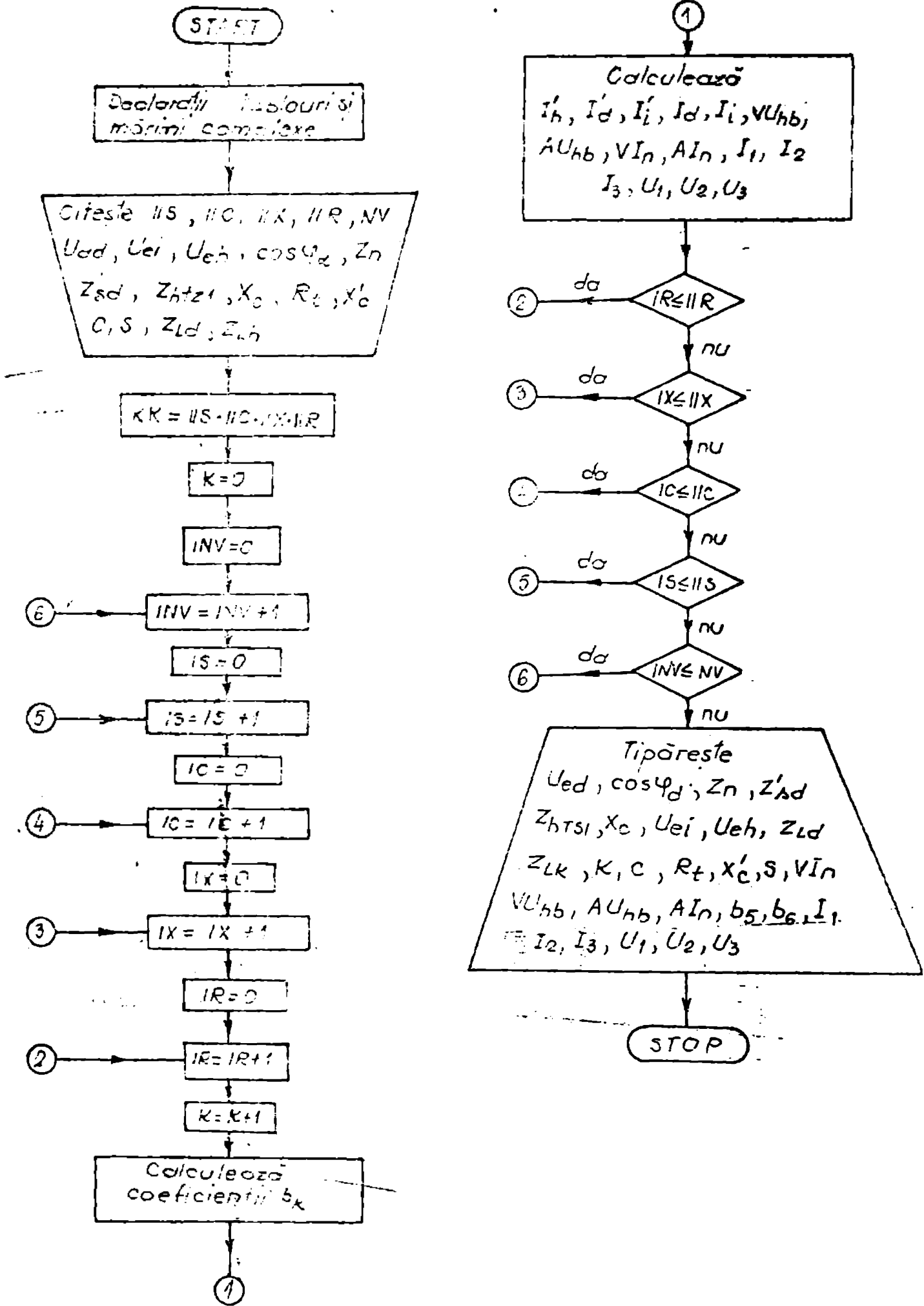


Fig.2.3. Schema logică a programului pentru calculul tensiunii U_{hb} și a curentului I_3 .

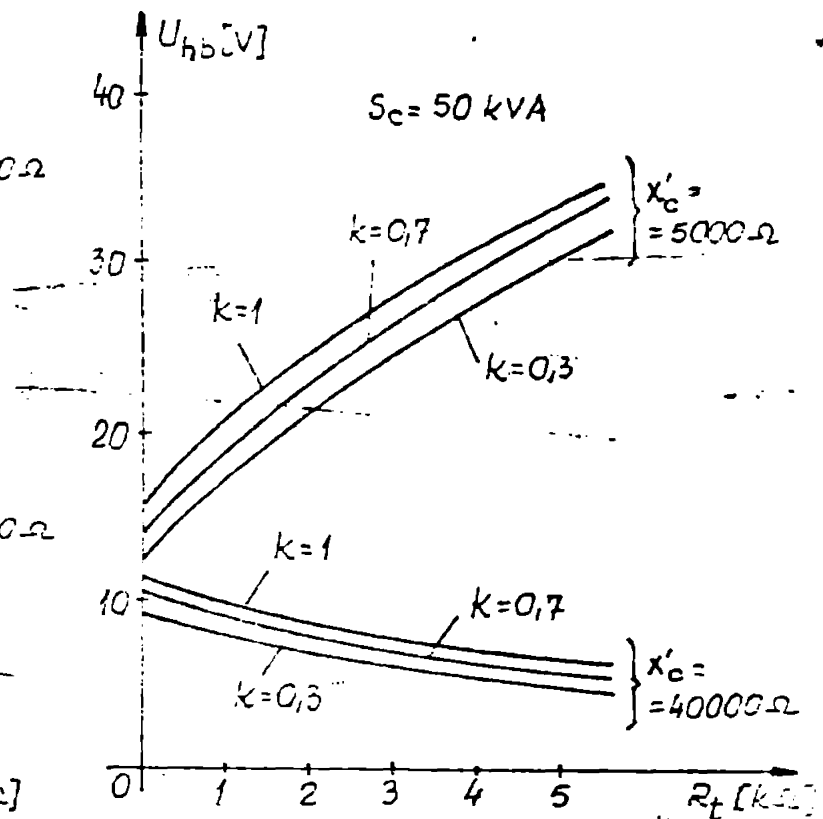
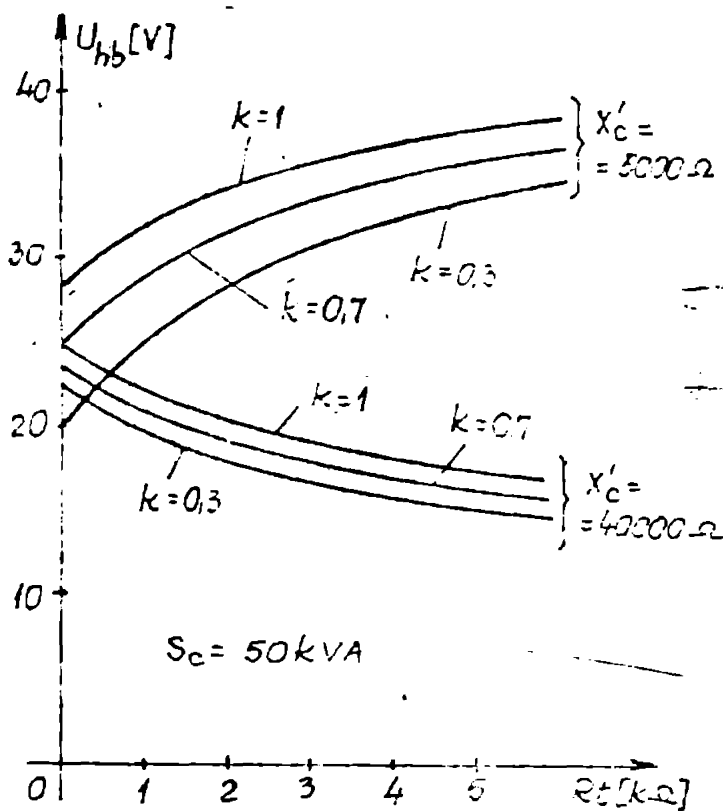


Fig.2.4. Rețea la rezonanță

Fig.2.5. Rețea supracompensată 10%

homopolară a transformatorului de servicii interne (T.S.I.) folosit și pentru realizarea nulului artificial $Z_{nT.S.I.} = (8 + j27,5)\Omega$; factorul de putere la consumator $\cos\varphi = 0,92$; tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare înaintea apariției defectului $U_{hb} = 153\text{ V}$; tensiunea de secvență inversă pe barele de medie tensiune ale stației de transformare s-a considerat nulă [26], [63], [118]. Pentru parametri modificabili prin program s-au considerat valorile: $R_f = 0; 100\Omega; 500\Omega; 1000\Omega; 2000\Omega; 3000\Omega; 5000\Omega; 10000\Omega$; $X_f = 5000\Omega; 10000\Omega; 20000\Omega; 40000\Omega; 80000\Omega$; $k = 1; 0,7; 0,3$; $S_0 = 50\text{ kVA}; 100\text{ kVA}; 300\text{ kVA}; 600\text{ kVA}; 1200\text{ kVA}$. Valorile tensiunii s-au calculat în secundarul filtrului homopolar de tensiune.

S-a calculat tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare considerând rețeaua cu nulul tratat prin bobină de stingere ori funcționează la rezonanță, supracompensat 10% și supracompensat 20%, respectiv cu nulul izolat. Curentul prin impedanța de tratare a nulului s-a calculat pentru cazul în care rețeaua are nulul tratat prin rezistor. Valoarea rezistenței rezistorului de tratare a nulului rețelei s-a considerat $37,5\Omega$ [113], [117], [119].

În total s-au calculat 3000 de variante. Desigur, programul de calcul realizat permite calcularea și altor variante. Unele din rezultatele obținute sînt prezentate în fig.2.4 - 2.14.

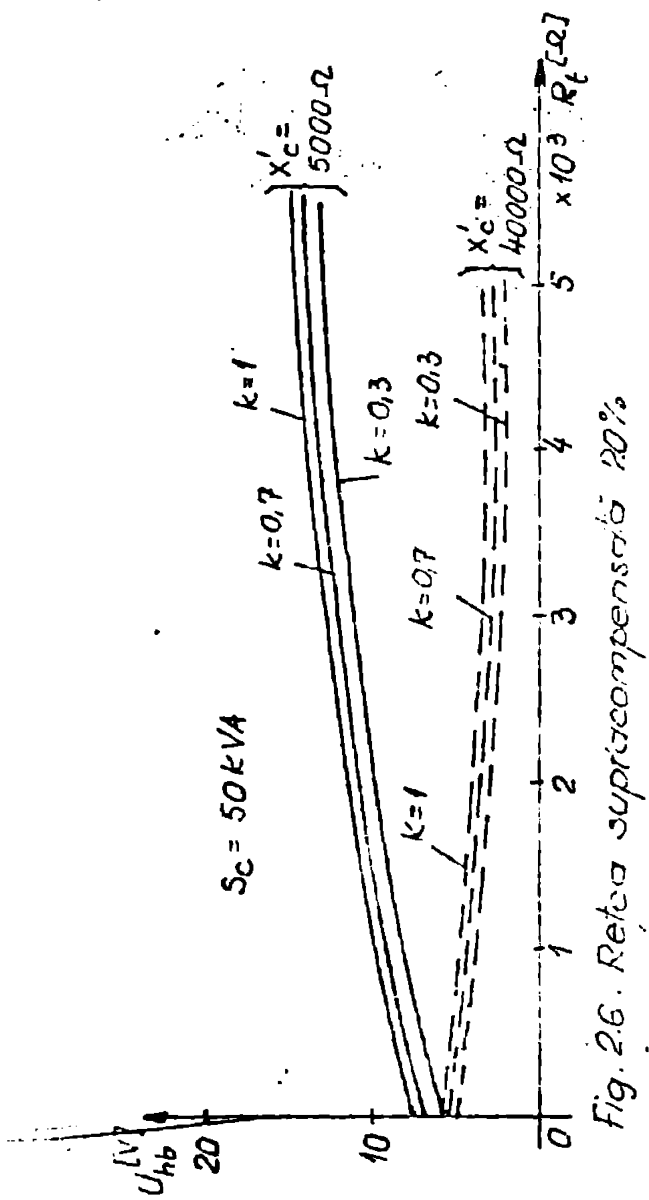


Fig. 2.6. Rețea supracompensată 20%

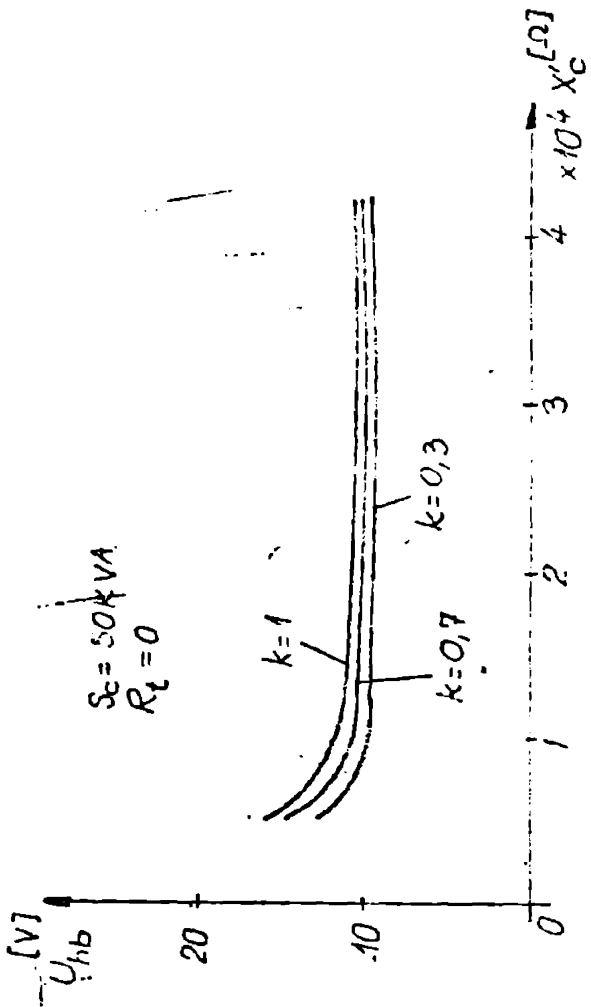


Fig. 2.8. Rețea supracompensată 10%

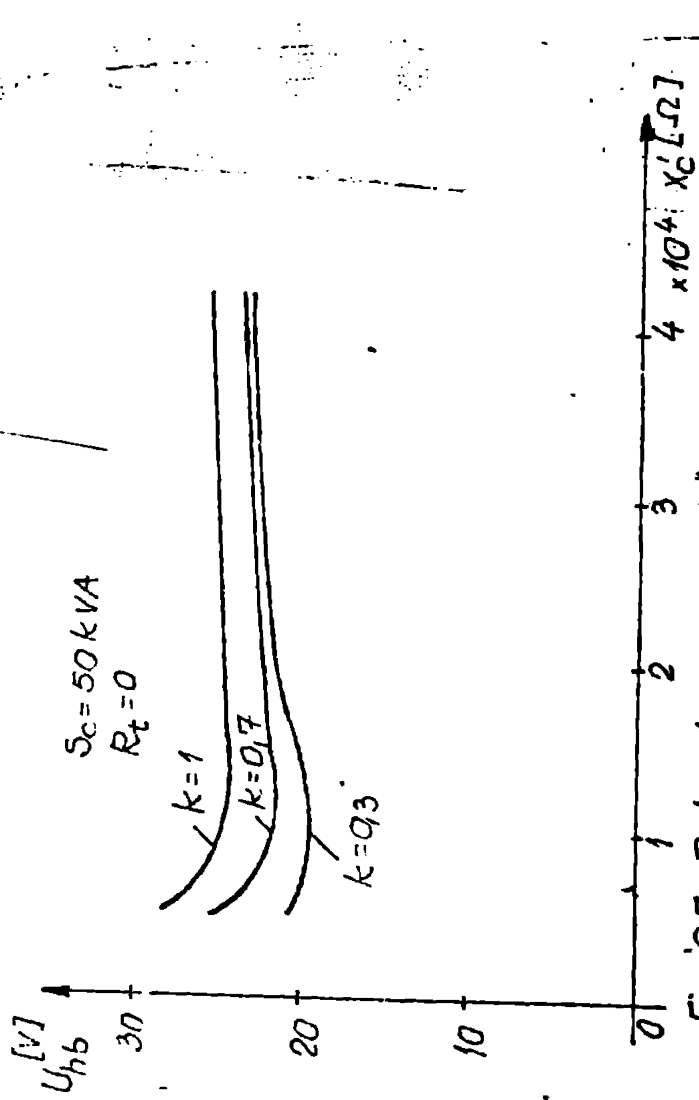


Fig. 2.7 Rețea la rezonanță

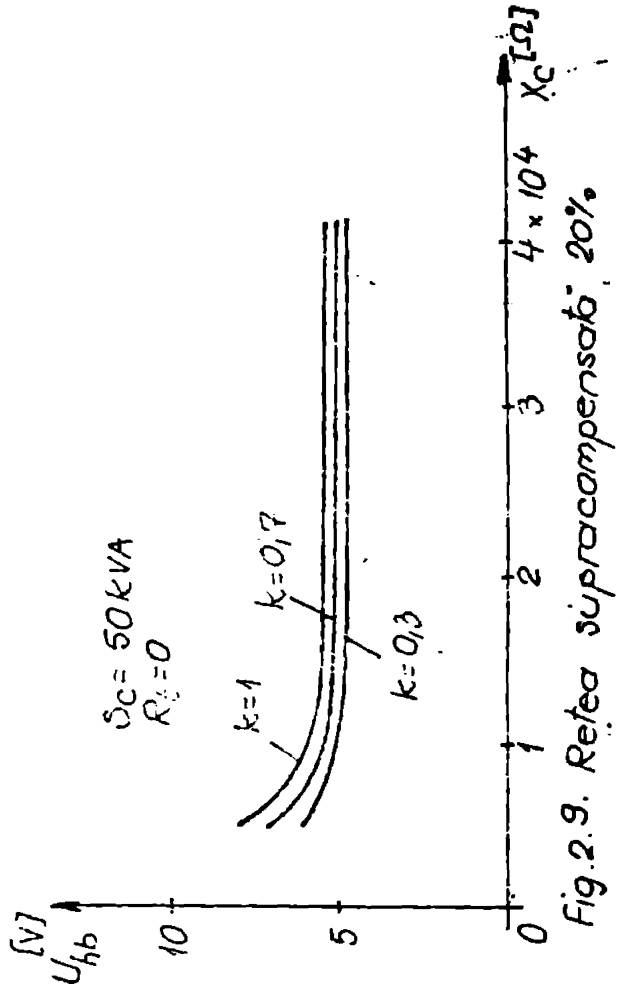


Fig. 2.9. Rețea subcompensată 20%

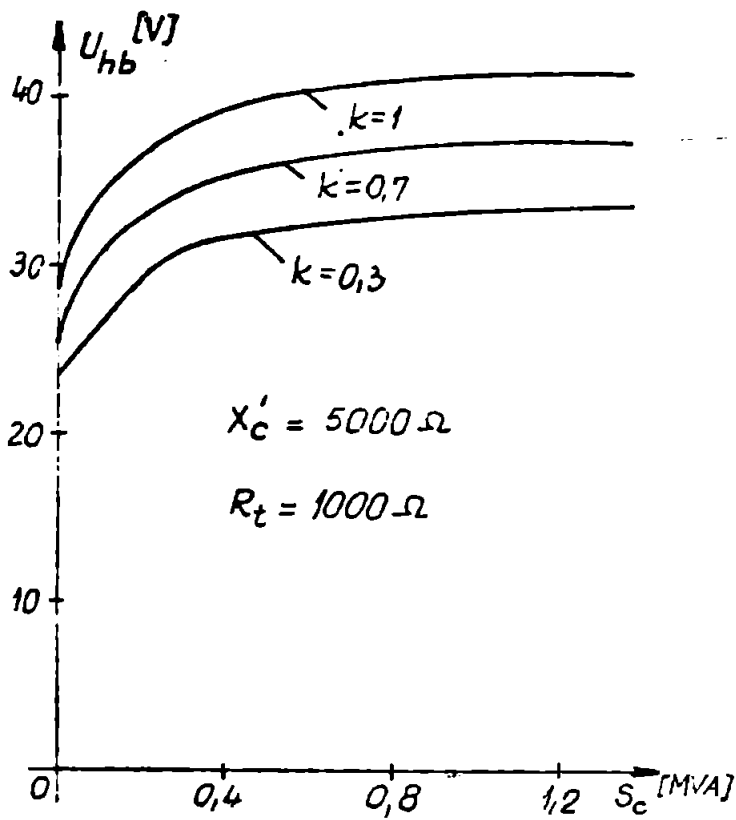


Fig.2.10. Rețea la rezonanță

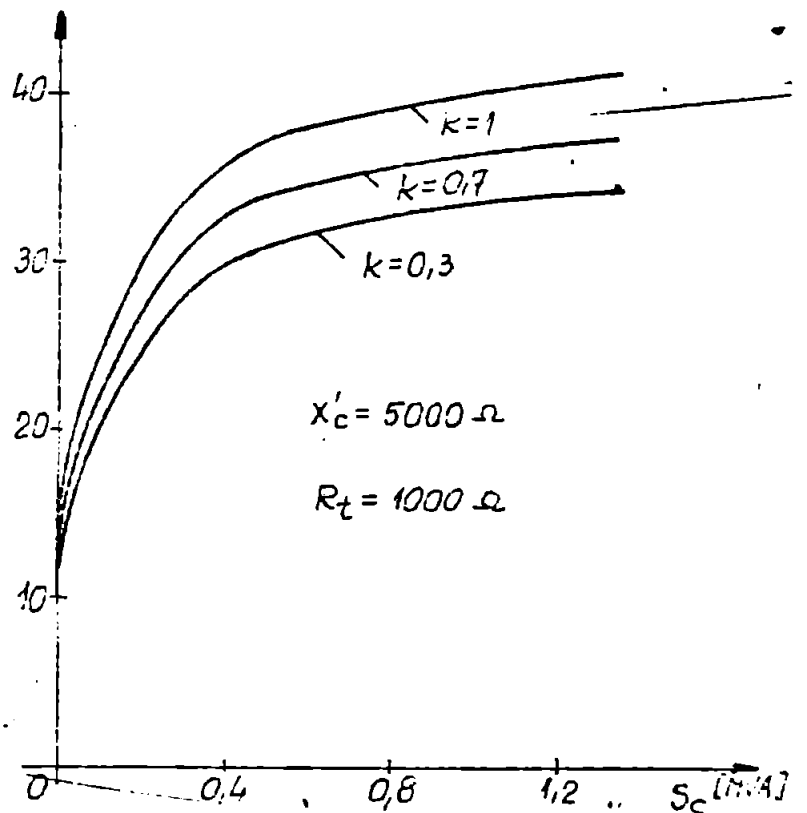


Fig.2.11. Rețea supracompensată la ω

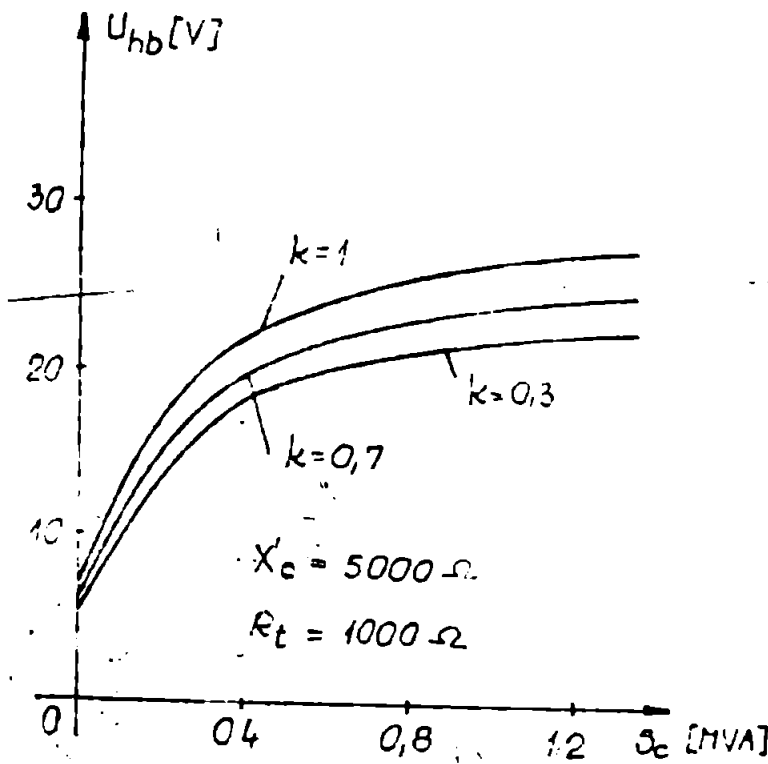


Fig.2.12. Rețea supracompensată la ω

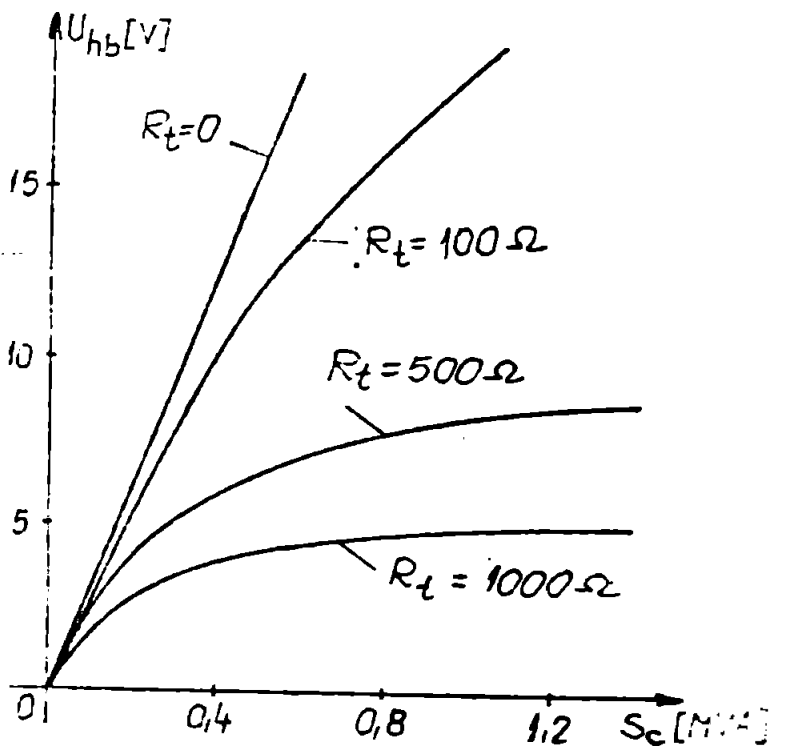


Fig.2.13. Rețea cu nulul izolat

[] [] [] []

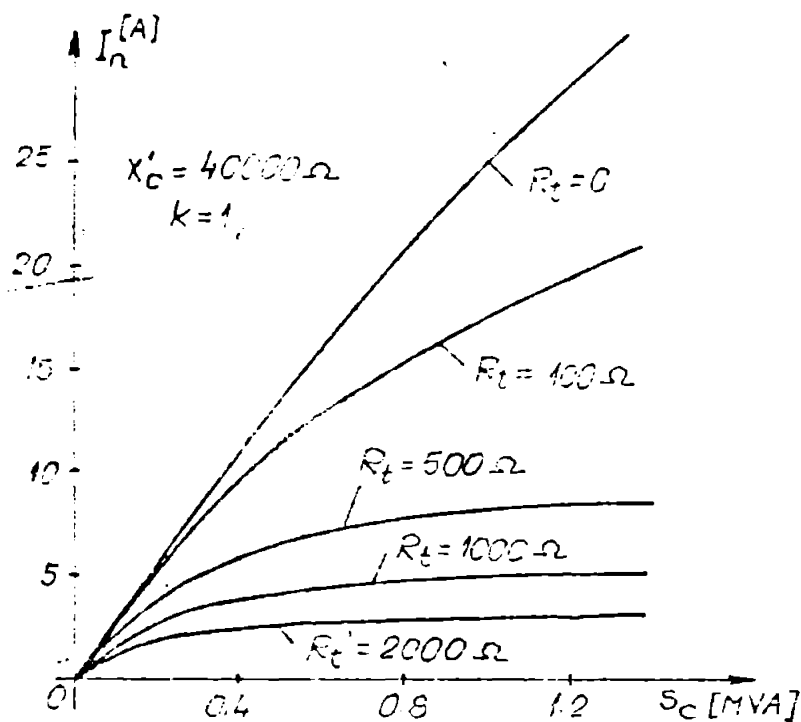


Fig.2.14. Rețea cu nulul tratat prin rezistor

sînt cu atît mai mari cu cît rețeaua funcționează într-un regim mai apropiat de cel de rezonanță.

Din diagramele 2.4 - 2.9 rezultă ponderea mare pe care o are reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului la calculul tensiunii U_{nb} , deci nu poate fi neglijată. Se constată de asemenea din fig.2.7 - 2.9 că dependența tensiunii U_{nb} de reactanța X'_c este mai pronunțată dacă reactanța X'_c este mai mică de 20.000 Ω . Deoarece valori mai scăzute ale reactanței X'_c determină pentru tensiunea U_{nb} valori mai mari rezultă că în situația în care linia pe care a apărut defectul are și porțiuni de cablu în spatele defectului un astfel de defect este mai ușor semnalat.

Rezistența de trecere la locul de defect R_t se observă din fig.2.4 - 2.6 că influențează foarte mult valoarea tensiunii U_{nb} . Considerarea acestui parametru ca fiind egal cu zero în calculul tensiunii U_{nb} conduce la erori foarte mari, de aceea este necesar ca acest parametru să fie cunoscut cît mai exact. Deoarece reactanța capacitivă a liniilor aeriene de medie tensiune este de obicei mai mare de 15.000 Ω [63], [117], [140], creșterea rezistenței R_t determină micșorarea tensiunii U_{nb} . Din diagramele 2.4 - 2.6 se constată de asemenea rezistența R_t influențează cel mai puțin tensiunea U_{nb} dacă rețeaua funcționează la rezonanță. Cum rețelele de medie tensiune în mod normal nu funcționează în regim de rezonanță [44], [50], [62], [63], [79], [144] rezultă că în analiza unui astfel de defect parametrul R_t este foarte important.

Din diagramele 2.4 - 2.12 și din calculele efectuate și reprezentate în aceste diagrame rezultă că pentru un astfel de defect este important să fie cunoscută ponderea motoarelor din consumatorii alimentați prin linia cu defect, astfel încît să se poată aprecia cît mai corect valoarea coeficientului k . Folosirea în calcule a unor valori necorespunzătoare pentru acest coeficient conduce la erori mari în determinarea tensiunii U_{nb} . Aceste erori

Din fig.2.13 se constată că la rețeaua cu nulul izolat tensiunea U_{hb} scade foarte pronunțat cu creșterea rezistenței de trecere la locul de defect (R_f), deci la astfel de rețele în analiza acestui tip de defect rezistența R_f are o importanță și mai mare.

Din fig.2.14 se constată că pentru rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor, parametrul R_f are o influență mare asupra valorii curentului ce se închide prin rezistorul de tratare a nulului rețelei I_{n1} , deci și în acest caz la analiza acestui tip de defect este necesară luarea în considerare a parametrului R_f .

Din fig.2.10 - 2.12 se constată că pentru rețeaua cu nulul tratat prin bobină de stingere tensiunea U_{hb} la un astfel de defect depinde cu atât mai mult de puterea consumatorilor (S_0) alimentați prin linia cu defect cu cât rețeaua funcționează într-un regim mai îndepărtat de cel de rezonanță. La o rețea care funcționează într-un regim de supracompensare 20% tensiunea U_{hb} scade sub 15 V în secundarul filtrului monopolar dacă puterea consumatorilor (S_0) scade sub 150 kVA, pe cînd la aceeași rețea dar funcționînd la rezonanță și pentru $S_0 = 50$ kVA tensiunea U_{hb} este mai mare de 25 V (fig.2.10). Cum rețelele de medie tensiune cu nulul compensat nu funcționează în regim de rezonanță rezultă ponderea mare pe care o are în determinarea tensiunii U_{hb} puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect (S_0).

Din fig.2.13 se constată că la valori mai mici ale rezistenței de trecere R_f puterea consumatorilor (S_0) influențează mai mult tensiunea U_{hb} în cazul rețelei cu nulul izolat. Pentru puteri S_0 sub 300 kVA chiar la $R_f = 0$ tensiunea U_{hb} obține valori sub 10 V. Dacă rezistența R_f este mai mare de 500 Ω și puterea S_0 este mai mare de 600 kVA tensiunea U_{hb} practic nu mai depinde de puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect.

La rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor (fig.2.14) se constată că parametrul S_0 influențează foarte mult valoarea curentului ce se închide prin rezistorul de tratare a nulului (I_{n1}) dacă rezistența de trecere la locul de defect R_f este sub 100 Ω și mai puțin dacă R_f este peste 500 Ω .

Funcție de modul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune se constată următoarele:

- în aceleași condiții de defect la rețeaua cu nulul tratat prin bobină de stingere valoarea tensiunii U_{hb} este cu atât mai mare cu cât rețeaua funcționează într-un regim mai apropiat de cel de rezonanță;

- la rețeaua cu nulul izolat tensiunea U_{hb} obține valori mult mai scăzute decât în cazul rețelei cu nulul compensat chiar dacă rețeaua în spatele defectului este dezvoltată (X_0 este mic).

rezistența R_0 este mică și S_0 este mare;

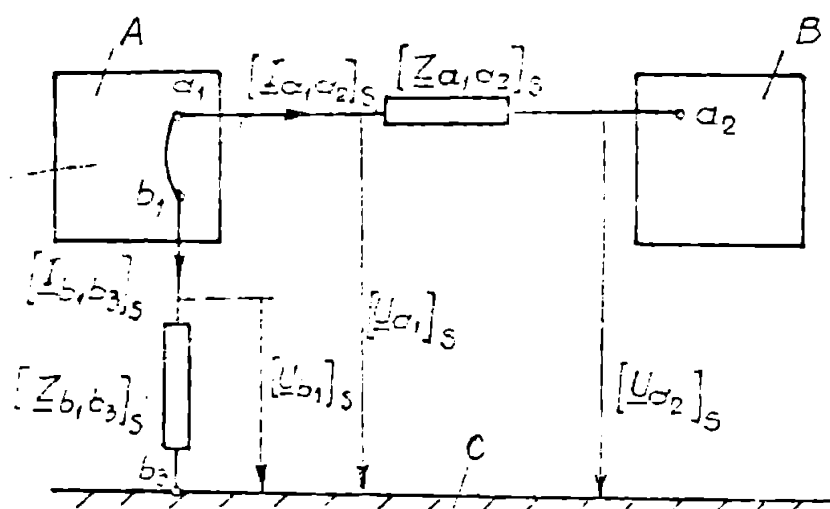
- la rețeaua cu nulul tratat prin rezistor tensiunea U_{nb} obține valori scăzute motiv pentru care se determină curentul prin rezistorul de tratare al nulului; acest curent este mai puțin influențat de coeficientul k și reactanța capacitivă X_C a liniei din spatele defectului decât la rețeaua cu nulul compensat.

2.2. Conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă

Si acest tip de defect se analizează ca un defect dublu constituit dintr-un scurtcircuit monofazat și o întrerupere de fază.

2.2.1. Stabilirea expresiei tensiunii U_{nb} și a curentului I_n

Modul în care elementele nesimetrice interconectează rețelele simetrice la un astfel de defect este reprezentată în fig. 2.15.



În fig. 2.15, A reprezintă rețeaua simetrică echivalentă sursei inclusiv liniei până la locul de defect; B reprezintă rețeaua simetrică echivalentă consumatorului inclusiv linia în spatele defectului; C rețeaua simetrică corespunzătoare pământului. Matricile $[Z_{a1a2}]_s$ și $[Z_{b1b3}]_s$

Fig. 2.15. Explicativă privind calculul defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă

reprezintă matricile de secvență a impedanțelor elementelor nesimetrice care leagă între ele rețelele simetrice și anume $[Z_{a1a2}]_s$ pentru întreruperea de fază și $[Z_{b1b3}]_s$ pentru punerea la pământ. Matricile de secvență ale curentilor prin cele două elemente nesimetrice $[I_{a1a2}]_s$ și $[I_{b1b3}]_s$ se obțin scriind ecuația (1.92) în cele două noduri de nesimetrie ale rețelelor A și B. În al treilea nod care aparține rețelei degenerate C dacă se aplică ecuația (1.92) se obține o nedeterminare. Pentru nodul a_1 identic cu nodul b_1 aparținând rețelei simetrice A ecuația (1.92) devine:

$$[U_{ea1}]_s - [U_{e1}]_s = [Z_{a1a1}]_s \cdot \left\{ [I_{a1a2}]_s + [I_{b1b3}]_s \right\}; \quad (2.35)$$

iar pentru nodul a_2 aparținând rețelei simetrice B ecuația (1.92) devine:

$$[U_{ea2}]_s - [U_{e2}]_s = - [Z_{a2a2}]_s \cdot [I_{a1a2}]_s \quad (2.36)$$

Între tensiunile din nodurile a_1 și a_2 se pot scrie următoarele relații

$$[U_{a1}]_s - [U_{a2}]_s = [Z_{a1a2}]_s \cdot [I_{a1a2}]_s; \quad [U_{a1}]_s = [Z_{b1b3}]_s \cdot [I_{b1b3}]_s \quad (2.37)$$

Introducând relațiile (2.37) în relațiile (2.36) și (2.35), și folosind următoarele notații:

$$[Z_{a1a1}]_s = [Z_s]_s; \quad [Z_{a2a2}]_s = [Z_o]_s; \quad [Z_{a1a2}]_s = [Z_c]_s; \quad [Z_{b1b3}]_s = [Z_e]_s; \\ [Z_{a1a2}]_s = [Z_1]_s; \quad [Z_{b1b3}]_s = [Z_2]_s; \quad \text{se obține:}$$

$$\begin{bmatrix} [U_{ea1}]_s - [U_{ea2}]_s \\ [U_{ea2}]_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_s]_s + [Z_c]_s + [Z_1]_s & [Z_s]_s \\ -([Z_1]_s + [Z_c]_s) & [Z_e]_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I]_s \\ [I]_s \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Rețeaua simetrică B fiind pasivă, tensiunea electromotoare a acestuia este nulă. Dezvoltând relația (2.38) se obțin ecuațiile:

$$[U_e]_s = ([Z_s]_s + [Z_c]_s + [Z_1]_s) \cdot [I]_s + [Z_s]_s \cdot [I]_s \quad (2.39) \\ [0] = -([Z_1]_s + [Z_c]_s) \cdot [I]_s + [Z_e]_s \cdot [I]_s$$

Având în vedere faptul că elementele matricii $[Z_1]$ sînt zero sau infinit produsul acestei matrici cu matricea $[I]_s$ se înlocuiește cu tensiunile respective. Deci matricea $[I]_s$ devine:

$$[I]_s = [Z_e]_s^{-1} \cdot [Z_c]_s \cdot [I]_s + [Z_e]_s^{-1} \cdot [U]_s \quad (2.40)$$

Introducând relația (2.40) în prima ecuație din relația (2.39) se obține:

$$[U_e]_s = ([Z_s]_s + [Z_c]_s + [Z_s]_s \cdot [Z_e]_s^{-1} \cdot [Z_c]_s) \cdot [I]_s + [U]_s + \\ + [Z_s]_s \cdot [Z_e]_s^{-1} \cdot [U]_s \quad (2.41)$$

Făcîndu-se identificările în relația (1.30) termenii matricii $[Z_e]_s^{-1}$, avînd în vedere relația (2.23) devin:

$$Z_{11} = \frac{1}{2} (Z_{ed} \cdot Z_{e1} - Z_e^2); \quad Z_{12} = Z_{21} = Z_e \frac{Z_e^2 - Z_{e1}^2}{2}; \\ Z_{13} = Z_{31} = \frac{Z_e^2}{2} (Z_e^2 - Z_{ed}); \quad Z_{22} = \frac{1}{2} (Z_{eh} \cdot Z_{e1} - Z_e^2); \\ Z_{23} = Z_{32} = (Z_e^2 - Z_{eh}) \cdot \frac{Z_e^2}{2}; \quad Z_{33} = \frac{1}{2} (Z_{eh} \cdot Z_{ed} - Z_e^2); \\ D = Z_{eh} (Z_{ed} \cdot Z_{e1} - Z_e^2) - Z_e^2 (Z_{e1} + Z_{ed} - 2Z_e^2);$$

Se observă că ecuația matricială (2.41) este echivalentă cu trei ecuații, dar avem gase necunoscute. Pentru a determina cele gase necunoscute se folosesc și relațiile (2.11). Ținînd seama de relațiile (2.11) și dezvoltînd ecuația matricială (2.41) se obține sistemul de ecuații:

$$U_{eh} = U_h^0 [1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})] + (Z_{eh} + Z_{oh} + Z_{eh} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{11}) \cdot I_h^0 + Z_{eh} \cdot Z_{od} \cdot Y_{12} \cdot I_d^0 + Z_{eh} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{12} \cdot I_1^0$$

$$U_{ed} = U_h^0 [1 + Z_{ed}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})] + Z_{ed} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{12} \cdot I_h^0 + (Z_{ed} + Z_{od} + Z_{ed} \cdot Z_{od} \cdot Y_{22}) I_d^0 + Z_{ed} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{23} \cdot I_1^0$$

$$U_{ei} = U_h^0 [1 + Z_{ei}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})] + Z_{ei} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{12} \cdot I_h^0 + Z_{ei} \cdot Z_{od} \cdot Y_{23} \cdot I_d^0 + (Z_{ei} + Z_{oi} + Z_{ei} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{22}) \cdot I_1^0$$

$$I_h^0 + I_d^0 + I_1^0 = 0 \tag{2.43}$$

Rezolvând sistemul (2.43) se obțin expresiile:

$$U_h^0 = \frac{1}{1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})} [U_{eh} - (Z_{eh} + Z_{oh} + Z_{eh} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{11}) \cdot I_h^0 - Z_{eh} \cdot Z_{od} \cdot Y_{12} \cdot I_d^0 - Z_{eh} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{12} \cdot I_1^0] \tag{2.44}$$

$$I_h^0 = \frac{B_{11}(B_{22} - B_{23}) + B_{22}(B_{12} - B_{13})}{(B_{12} - B_{11})(B_{23} - B_{21}) - (B_{22} - B_{21})(B_{13} - B_{11})}$$

$$I_d^0 = \frac{B_{11}(B_{23} - B_{21}) - B_{22}(B_{13} - B_{11})}{(B_{12} - B_{11})(B_{23} - B_{21}) - (B_{22} - B_{21})(B_{13} - B_{11})} \tag{2.45}$$

$$I_1^0 = \frac{B_{22}(B_{12} - B_{11}) - B_{11}(B_{22} - B_{21})}{(B_{12} - B_{11})(B_{23} - B_{21}) - (B_{22} - B_{21})(B_{13} - B_{11})}$$

unde coeficienții B_{1j} ($i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,3}$) și B_{21} ($i = \overline{1,2}$) au următoarele expresii:

$$B_{11} = Z_{ed} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{12} = \frac{1 + Z_{ed}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})} (Z_{eh} + Z_{oh} + Z_{eh} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{11})$$

$$B_{12} = Z_{ed} + Z_{od} + Z_{ed} \cdot Z_{od} \cdot Y_{22} = \frac{1 + Z_{ed}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})} (Z_{eh} \cdot Z_{od} \cdot Y_{12})$$

$$B_{13} = Z_{ed} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{23} = \frac{1 + Z_{ed}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})} \cdot Z_{eh} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{12}$$

$$B_{21} = U_{ed} = \frac{1 + Z_{ed}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})} \cdot U_{eh} \tag{2.46}$$

$$B_{21} = Z_{ei} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{12} = \frac{1 + Z_{ed}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{eh}(Y_{11} + 2Y_{12})} (Z_{eh} + Z_{oh} + Z_{eh} \cdot Z_{oh} \cdot Y_{11})$$

$$I_{22} = Z_{a1} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{23} - \frac{1 + Z_{a1}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{sh}(Y_{11} + 2Y_{12})} \cdot Z_{sh} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{12} ;$$

$$I_{23} = Z_{a1} + Z_{c1} + Z_{a1} \cdot Z_{c1} \cdot Y_{22} - \frac{1 + Z_{a1}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{sh}(Y_{11} + 2Y_{12})} \cdot Z_{sh} \cdot Z_{c1} \cdot Y_{12} ;$$

$$U_{22} = U_{a1} - \frac{1 + Z_{a1}(Y_{22} + Y_{12} + Y_{23})}{1 + Z_{sh}(Y_{11} + 2Y_{12})} \cdot U_{sh} ;$$

Deoarece transformatoarele de medie tensiune pe joasă tensiune au în primar conexiune triunghi sau stea impedanța homopolară a consumatorului devine infinit de mare. În aceste condiții impedanța $Z_{ch} = -jX_C$, X_C - fiind reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului.

Dezvoltând relația (2.46) pentru curenții $[I]_S$ se obțin expresiile:

$$I_h = Z_{ch} \cdot Y_{11} \cdot I_h + Y_{12} \cdot Z_{cd} \cdot I_d + Y_{12} \cdot Z_{c1} \cdot I_1 + (Y_{11} + 2Y_{12}) U_h ;$$

$$I_d = Z_{ch} \cdot Y_{12} \cdot I_h + Y_{22} \cdot Z_{cd} \cdot I_d + Y_{23} \cdot Z_{c1} \cdot I_1 + (Y_{12} + Y_{22} + Y_{23}) \cdot U_h ; \quad (2.47)$$

$$I_1 = Z_{ch} \cdot Y_{12} \cdot I_h + Y_{23} \cdot Z_{cd} \cdot I_d + Y_{22} \cdot Z_{c1} \cdot I_1 + (Y_{12} + Y_{22} + Y_{23}) U_h ;$$

Cunoscîndu-se matricile $[I]_S$ și $[I]_U$ se pot determina curenții pe cele trei faze și prin impedanța de tratare a nulului rețelei de medie tensiune, tensiunile la locul de defect și tensiunea homopolară care apare pe barele de medie tensiune ale stației de transformare (U_{hb}).

Curenții pe cele trei faze se determină cu relațiile:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_h + I_d + I_1 + I_h + I_d + I_1 ; \\ I_2 &= I_h + I_h + a^2(I_d + I_d) + a(I_1 + I_1) ; \\ I_3 &= I_h + I_h + a(I_d + I_d) + a^2(I_1 + I_1) ; \end{aligned} \quad (2.48)$$

Tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare se determină cu relația:

$$U_{hb} = - \frac{jX_C(Z_{nTSI} + 3Z_n)}{Z_{nTSI} + 3Z_n - jX_C} (I_h + I_h) ; \quad (2.49)$$

Curentul prin impedanța de tratare a nulului se calculează cu relația:

$$I_n = - \frac{jX_C}{Z_{nTSI} + 3Z_n - jX_C} (I_h + I_h) ; \quad (2.50)$$

Tensiunile la locul de defect se calculează cu relațiile:

$$U_x = R_f(I_{h1} + I_{d1} + I_{f1}); U_y = -jX_c^2(I_{h1} + A^2 I_{d1} + A I_{f1}); U_z = -jX_c^2(I_{h1} + A I_{d1} + A^2 I_{f1}) \quad (2.51)$$

unde X_c reprezintă reactanța capacitivă a rețelei în spatele defectului iar R_f rezistența de trecere la locul de defect. Pentru a stabili nodul în care diverși parametri influențează valoarea tensiunii U_{ab} și a curentului I_{h1} este necesară întocmirea unui program de calcul. Studiul analitic a nodului în care acești parametri influențează tensiunea U_{ab} și curentul I_{h1} este practic imposibil.

Schema simplificată a rețelei în care apare un astfel de defect este prezentată în fig.2.16.

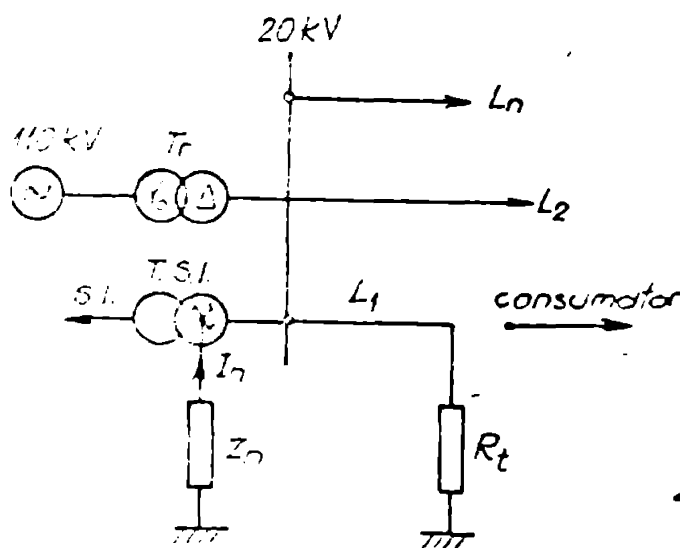


Fig.2.16. Schema monofilară a rețelei cu defect

Impedanțele de secvență directă și inversă ale consumatorului se exprimă funcție de puterea acestuia (S_c). Acceptînd sistemul energetic pe partea de 110 kV ca fiind o sursă infinită rezultă că impedanțele de secvență directă și inversă ale sursei sînt egale. Cu impedanțele

din schema reprezentată în fig.2.16 matricea $[Z_s]_s$ devine:

$$[Z_s]_s = \begin{bmatrix} Z_{sh} + Z_{Lh} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{dTr} + Z_{Ld} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{iTr} + Z_{Ld} \end{bmatrix}; \quad (2.52)$$

Dacă se are în vedere faptul că $Z_{dTr} = Z_{iTr}$ și $Z_{Ld} = Z_{Ld}$ matricea $[Z_s]_s$ devine:

$$[Z_s]_s = \begin{bmatrix} Z_{sh} + Z_{Lh} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{dTr} + Z_{Ld} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{dTr} + Z_{Ld} \end{bmatrix}; \quad (2.53)$$

Considerînd elementele transversale ale liniei de medie tensiune cu defect, din spatele defectului ca fiind concentrate la locul de defect elementele matricii $[Z_2]_s$ devin:

$$Z_{eh} = Z_{ed} = Z_{e1} = \frac{1}{3} (R_t - j2X_C); \quad Z_e = \frac{1}{3} (R_t + jX_C); \quad (2.54)$$

Tinând seama de relațiile (2.54), relațiile (2.42) devin:

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_{33} = \frac{X_C^3 + j2R_t}{3R_t \cdot X_C^3}; \quad Y_{12} = Y_{21} = Y_{13} = Y_{31} = Y_{23} = Y_{32} = \frac{X_C^3 - jR_t}{3R_t \cdot X_C^3}; \quad (2.55)$$

Deoarece transformatorul de medie pe joasă tensiune are în primar conexiune triunghi, sau stea relațiile (2.45) devin:

$$I_h^* = 0; \quad I_d^* = -I_1^* = \frac{b_{22} - b_{11}}{b_{22} + b_{13} - b_{12} - b_{23}}; \quad (2.56)$$

Parametrii b_{1j} și b_{j1} ($i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,3}$) din relațiile (2.46) dacă avem în vedere relațiile (2.55) devin:

$$b_{11} = Z_{eh} \left[Z_{ed} \cdot \frac{X_C^3 - jR_t}{3X_C^3 \cdot R_t} - \frac{3X_C^3 \cdot R_t + Z_{eh} (X_C^3 + j2R_t)}{3X_C^3 \cdot R_t} \cdot \frac{R_t + Z_{ed}}{R_t + Z_{eh}} \right];$$

$$b_{12} = Z_{ed} + Z_{ed} + j \frac{Z_{ed}}{3X_C^3} \left(\frac{R_t + Z_{ed}}{R_t + Z_{eh}} \cdot Z_{eh} + 2 \cdot Z_{ed} \right);$$

$$b_{13} = \frac{Z_{ed} - Z_{eh}}{R_t + Z_{eh}} \cdot \frac{Z_{ed}}{3X_C^3} (X_C^3 - jR_t);$$

$$b_{21} = Z_{eh} \left[Z_{ed} \cdot \frac{X_C^3 - jR_t}{3X_C^3 \cdot R_t} - \frac{3X_C^3 \cdot R_t + Z_{eh} (X_C^3 + j2R_t)}{3X_C^3 \cdot R_t} \cdot \frac{R_t + Z_{ed}}{R_t + Z_{eh}} \right]; \quad (2.57)$$

$$b_{22} = \frac{Z_{ed} - Z_{eh}}{R_t + Z_{eh}} \cdot \frac{Z_{ed}}{3X_C^3} (X_C^3 - jR_t);$$

$$b_{23} = Z_{ed} + Z_{ed} + \frac{Z_{ed} - Z_{eh}}{3(R_t + Z_{eh})} + \frac{j}{3X_C^3} (2Z_{ed} + Z_{eh} \cdot \frac{R_t + Z_{ed}}{R_t + Z_{eh}});$$

$$b_{11} = U_{ed} - \frac{R_t + Z_{ed}}{R_t + Z_{eh}} \cdot U_{eh}; \quad b_{22} = U_{ed} - \frac{R_t + Z_{ed}}{R_t + Z_{eh}} \cdot U_{eh};$$

Din relațiile (2.57) se observă că acceptând $Z_{ed} = Z_{ed}$ coeficienții b_{11} și b_{21} sînt egali.

Înlocuind expresiile (2.57) în relațiile (2.56) respectiv (2.45) se obține:

$$I_d^* = I_1^* = \frac{X_C^3 (b_{11} - b_{22})}{(Z_{ed} + Z_{ed})(X_C^3 + j2R_t) + 2X_C^3 Z_{ed}} \quad (2.58)$$

$$U_h^* = \frac{R_t}{R_t + Z_{eh}} \left[U_{eh} - b_{22} - Z_{eh} \cdot \frac{X_C^3 - jR_t}{3X_C^3 \cdot R_t} (Z_{ed} - Z_{ed}) \cdot I_d^* \right];$$

unde b_{22} este:

$$E_2 = \frac{3X_C^0 \cdot R_t + Z_{eh}(X_C^0 + j2R_t)}{B_1} \cdot \frac{h_{11}(B_{22} - B_{23}) - (B_{12} - B_{13})h_{22}}{B_{22} - B_{23} + B_{13} - B_{12}},$$

iar B_1 este:

$$B_1 = Z_{sd}(X_C^0 - jR_t) - \frac{R_t + Z_{sd}}{R_t + Z_{eh}} [3X_C^0 \cdot R_t + Z_{eh}(X_C^0 + j2R_t)];$$

Avînd în vedere relațiile (2.56), (2.57) și (2.58) relațiile (2.47) devin:

$$I_{bh} = \frac{X_C^0 + j2R_t}{B_1} \cdot \frac{h_{11}(B_{22} - B_{23}) - h_{22}(B_{12} - B_{13})}{B_{22} - B_{23} + B_{13} - B_{12}} + \frac{U_{eh} - E_2}{R_t + Z_{eh}} + \frac{(X_C^0 - jR_t)(Z_{od} - Z_{oi})}{3X_C^0(R_t + Z_{eh})} \cdot I_d;$$

$$I_d = \frac{X_C^0 - jR_t}{B_1} \cdot \frac{h_{11}(B_{22} - B_{23}) - h_{22}(B_{12} - B_{13})}{B_{22} - B_{23} + B_{13} - B_{12}} + \frac{U_{eh} - E_2}{R_t + Z_{eh}} + \left[\frac{(X_C^0 - jR_t)(Z_{od} - Z_{oi})}{3X_C^0(R_t + Z_{eh})} + j \frac{Z_{od}}{X_C^0} \right] \cdot I_d; \quad (2.59)$$

$$I_d = \frac{X_C^0 - jR_t}{B_1} \cdot \frac{h_{11}(B_{22} - B_{23}) - h_{22}(B_{12} - B_{13})}{B_{22} - B_{23} + B_{13} - B_{12}} + \frac{U_{eh} - E_2}{R_t + Z_{eh}} + \left[\frac{(X_C^0 - jR_t)(Z_{od} - Z_{oi})}{3X_C^0(R_t + Z_{eh})} - j \frac{Z_{oi}}{X_C^0} \right] \cdot I_d.$$

Pentru calculul efectiv al relațiilor (2.50) și (2.49) se utilizează calculatorul electronic.

2.2.2. Dependența tensiunii U_{hb} și a curentului I_n de condițiile în care are loc defectul

Condițiile în care are loc defectul determină valorile parametrilor funcție de care se calculează tensiunea U_{hb} respectiv curentul I_n , relațiile (2.49) și (2.50). Pentru a analiza modul în care parametri de care depinde tensiunea U_{hb} și curentul I_n , influențează aceste mărimi s-a întocmit un program de calcul în limbaj FORTRAN. Schema logică a programului este cea prezentată în fig.2.3. Față de un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator, în acest caz nu se schimbă decât relațiile respective de calcul a tensiunii U_{hb} și a curentului I_n .

Calcululele s-au efectuat admitînd aceleași valori pentru parametri ce și în cazul defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator, pentru a se putea face comparație între

cele două tipuri de defecte.

S-au calculat 3000 de variante, unele din rezultate fiind prezentate în fig.2.17 - 2.21.

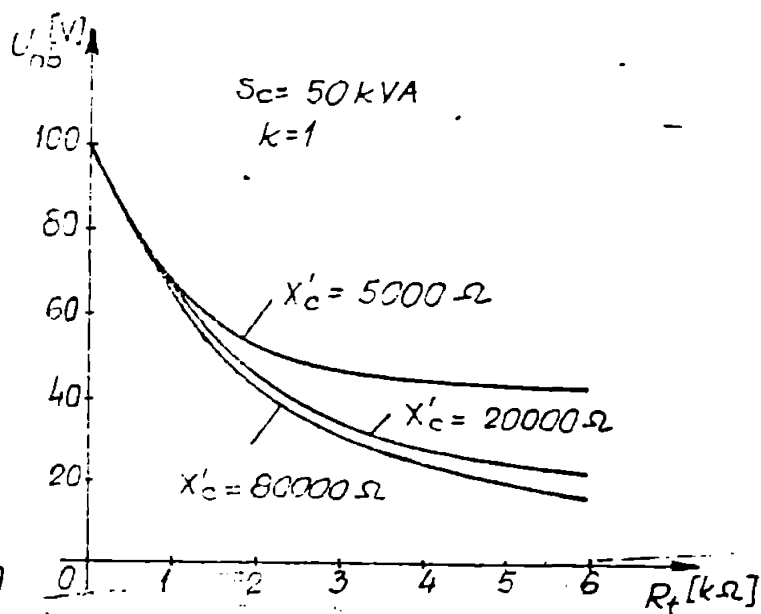
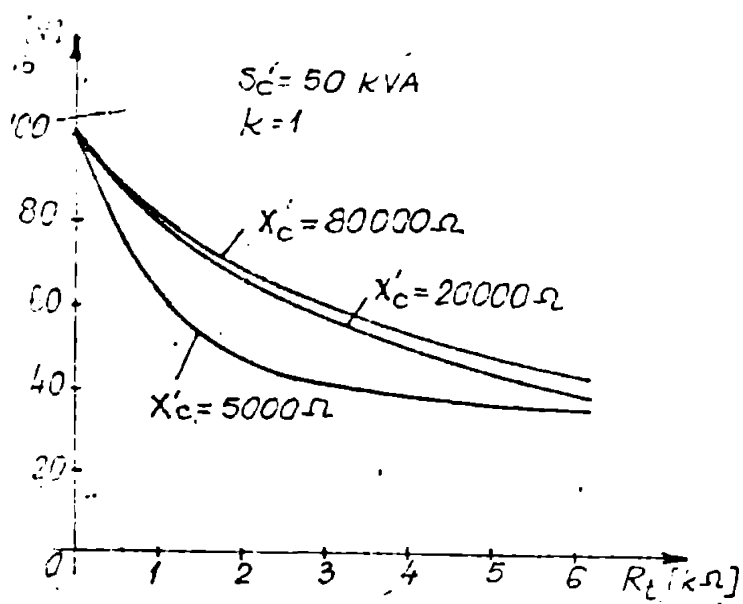


Fig.2.17. Rețea la rezonanță Fig.2.18. Rețea supracompensată 10%

Calcululele efectuate au evidențiat faptul că la acest tip de defect tensiunea homopolară de pe barele de medie tensiune ale stației de transformare este influențată cel mai mult de rezistența de trecere la locul de defect (fig.2.17 - 2.21).

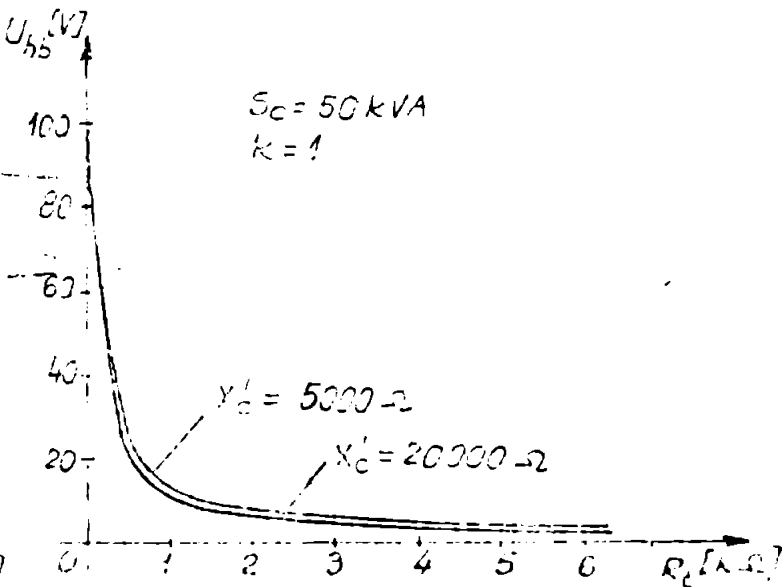
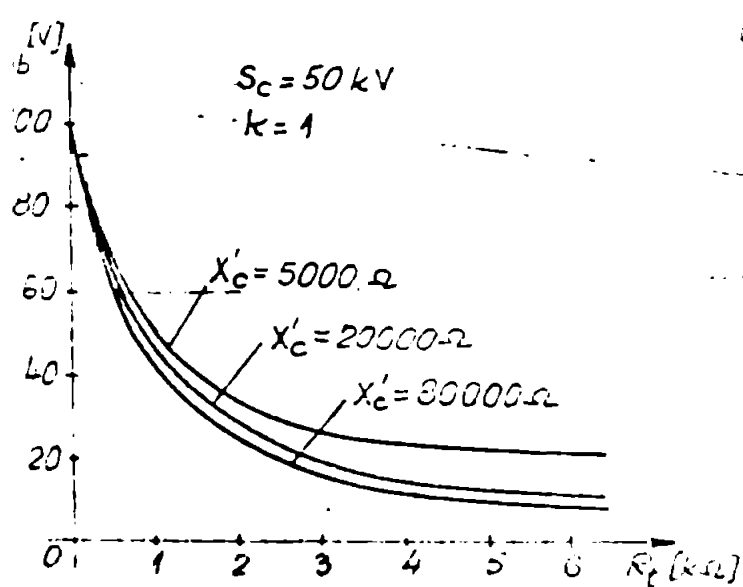


Fig.2.19. Rețea supracompensată 20% Fig.2.20. Rețea cu nulul izolat

În fig.2.17 - 2.19 s-a prezentat variația tensiunii U_{nb} funcție de R_t pentru diverse valori ale reacțanței capacitive a rețelei în spatele defectului (X'_c), rețeaua de medie tensiune fiind cu nulul tratat prin bobină de stingere și funcționând la rezonanță, supracompensat 10% respectiv supracompensat 20%. Din aceste diagrame se constată că pentru rețeaua de medie tensiune ce funcționează în

regim de rezonanță dependentă tensiunii U_{hb} de rezistența R_t este cel mai puțin pronunțată. De asemenea tensiunea U_{hb} obține valori ridicate chiar la rezistențe de trecere la locul de defect ce depășesc 3000Ω (fig.2.17).

Din fig.2.19 se observă căci pentru rețeaua de medie tensiune ce funcționează în regim de supracompensare 20% la valori ridicate ale rezistenței de trecere R_t tensiunea U_{hb} scade la mai mult de jumătate față de cazul în care rețeaua funcționează în regim de rezonanță.

Reactanța ca, activă a rețelei în spatele defectului influențează valoarea tensiunii U_{hb} dacă are valori sub 10000Ω , dar prezintă o mai puțină importanță pentru valori ale acestora care depășesc 20000Ω . Cum pentru liniile de medie tensiune aeriene reactanța X'_j de obicei depășește 15000Ω rezultă că în calculul tensiunii U_{hb} poate fi neglijat acest parametru fără a face erori prea mari. Și la acest tip de defect tensiunea U_{hb} obține valori mai mari dacă reactanța X'_j are valori mai scăzute, deci un astfel de defect este mai ușor de sesizat în liniile de medie tensiune mixte (aeriene și în cablu) dacă porțiunea de cablu este în spatele defectului.

Din fig.2.20 se constată că la rețeaua de medie tensiune cu nulul izolat și la acest tip de defect tensiunea U_{hb} scade foarte rapid cu creșterea rezistenței de trecere la locul de defect R_t . În acest caz reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului (X'_j) practic nu influențează tensiunea U_{hb} (fig.2.20) deci acest parametru poate fi neglijat.

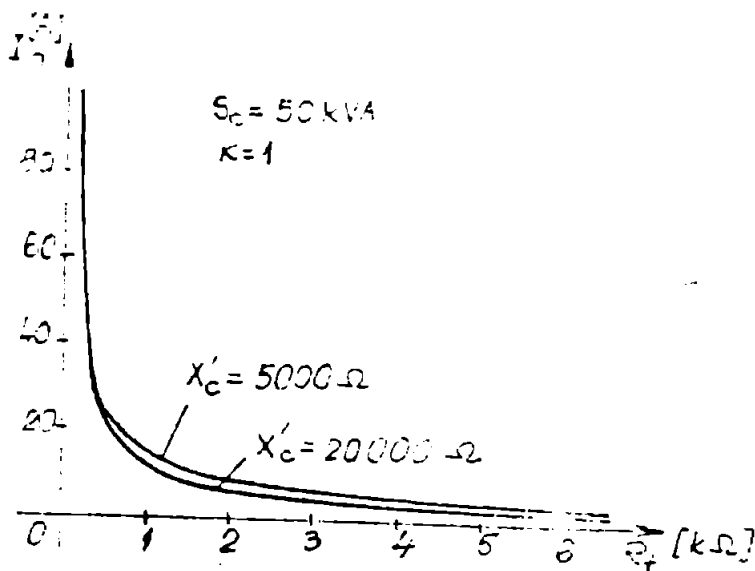


Fig.2.21. Rețea cu nulul tratat prin rezistor

defect puterea consumatorilor alimentați prin linia pe care a apărut defectul are o pondere destul de scăzută în stabilirea valorii tensiunii

În fig.2.21 s-a trasat dependența curentului prin rezistorul de tratare a nulului (I_T) funcție de rezistența de trecere la locul de defect R_t . Se constată că reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului (X'_j) practic nu influențează valoarea acestui curent. De asemenea acest curent este puternic influențat de parametrul R_t .

Din calculele efectuate a rezultat că pentru acest tip de de-

ni \bar{U}_{hb} și a curentului I_n motiv pentru care într-un calcul aproxima-
tiv se poate neglija acest parametru.

Din analiza efectuată rezultă funcție de modul de tratare a nu-
lului rețelei de medie tensiune următoarele:

- la rețeaua cu nulul tratat prin bobină de stingere valoarea
tensiunii \bar{U}_{hb} depinde foarte mult de regimul în care funcționează
rețeaua (rezonanță, supracompensat); de asemenea este necesar a se lua
în considerare la calculul tensiunii \bar{U}_{hb} rezistența de trecere la locul
de defect R_f și reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului
(X_f);

- la rețeaua cu nulul izolat tensiunea \bar{U}_{hb} este influențată în
primul rând de rezistența de trecere la locul de defect R_f , putându-se
neglija reactanța X_f și consumatorii alimentați prin linia cu defect;

- la rețeaua cu nulul tratat prin rezistor curentul ce se închide
prin rezistorul de tratare al nulului (I_n) depinde pronunțat de rezis-
tența de trecere la locul de defect R_f , putându-se neglija în calculul
acestui curent reactanța X_f și consumatorii alimentați prin linia cu
defect.

Comparând rezultatele obținute în cazul defectului conductor în-
trerupt și căzut la pământ spre consumator cu cele obținute în cazul
în care conductorul întrerupt este căzut la pământ spre sursă se con-
stată că tensiunea \bar{U}_{hb} și curentul I_n depind pentru ambele defecte de
rezistența de trecere la locul de defect R_f . Dacă la defectul conductor
întrerupt și căzut la pământ spre sursă se pot neglija parametrii X_f și
 S_0 , la defectul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator
nu se mai pot face aceste neglijiuri.

2.3. Simplă punere la pământ

În cazul în care la un defect de tipul conductor întrerupt
și căzut la pământ spre sursă sau spre consumator lipsește întreruperea,
defectul se transformă într-o simplă punere la pământ. Deci o simplă
punere la pământ poate fi analizată ca fiind un caz particular al unui
defect de tip conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator
(subcapitolul 2.1.) sau spre sursă (subcapitolul 2.2.).

2.3.1. Stabilirea expresiei tensiunii \bar{U}_{hb} și a curentului I_n

Modul în care elementul nesimetric interconectează rețele-
le simetrice în acest caz este prezentat în fig.2.22. În această figură
elementele au următoarea semnificație: A - rețeaua simetrică ce repre-
zintă sursa inclusiv linia pînă la locul de defect; B - rețeaua simetri-
că ce reprezintă consumatorul [16], [22], [74] inclusiv linia în spatele
defectului; C - rețeaua simetrică echivalentă pământului; $[Z_0]_g$ matricea

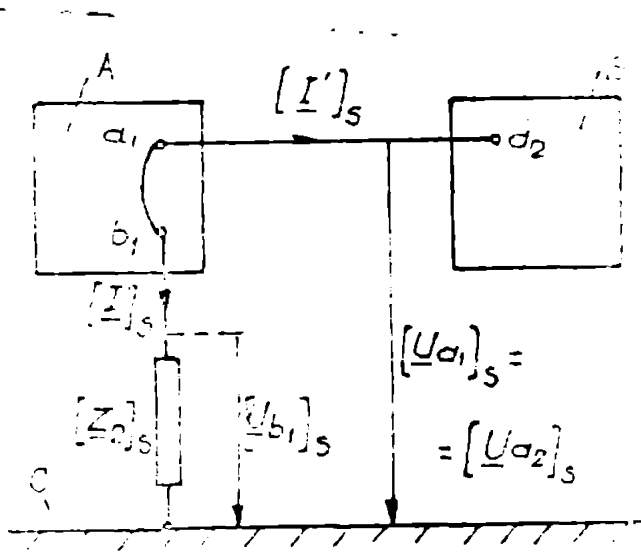


Fig.2.22. Explicativă privind calculul unei simple puneri la pământ

impedanțelor de secvență la locul de defect; $[I]_0$ și $[I]_s$ matricile curenților de secvență la locul de defect și spre consumator.

Se observă că fig.2.22 diferă de fig.2.15 doar prin faptul că s-a anulat matricea $[Z_{a1a2}]_s$.

Deci dacă facem în aceeași lucră în ecuațiile (2.43) obținem ecuațiile necesare pentru determinarea matricilor $[I]_s$ și $[I]_0$.

Anulând matricea $[Z_1]_s$ în sis-

temul de ecuații (2.39) se obține:

$$\begin{aligned} [U_e]_s &= ([Z_s]_s + [Z_0]_s) \cdot [I]_s + [Z_s]_s \cdot [I]_s \\ [0] &= -[Z_0]_s \cdot [I]_s + [Z_2]_s \cdot [I]_s \end{aligned} \quad (2.60)$$

Din ecuația a doua se exprimă $[I]_s$ obținându-se:

$$[I]_s = [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_0]_s \cdot [I]_s \quad (2.61)$$

relație care introdusă în prima ecuație permite determinarea matricii $[I]_0$.

$$[U_e]_s = ([Z_s]_s + [Z_0]_s + [Z_s]_s \cdot [Z_2]_s^{-1} \cdot [Z_0]_s) \cdot [I]_s \quad (2.62)$$

Termenii matricii $[Z_2]_s^{-1}$ se determină cu relațiile (2.42).

Dezvoltându-se ecuația (2.62) se obține sistemul:

$$\begin{aligned} U_{eh} &= (Z_{eh} + Z_{ch} + Z_{sh} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{11}) \cdot I_h^1 + Z_{ch} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{12} \cdot I_d^1 + Z_{ch} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{12} \cdot I_i^1 \\ U_{od} &= Z_{od} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{12} \cdot I_h^1 + (Z_{od} + Z_{cd} + Z_{od} \cdot Z_{od} \cdot Y_{22}) \cdot I_d^1 + Z_{od} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{23} \cdot I_i^1 \\ U_{oi} &= Z_{oi} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{12} \cdot I_h^1 + Z_{oi} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{23} \cdot I_d^1 + (Z_{oi} + Z_{oi} + Z_{oi} \cdot Z_{oi} \cdot Y_{22}) \end{aligned} \quad (2.63)$$

sistem care rezolvat ne conduce la următoarele expresii pentru curenții I_h^1 , I_d^1 și I_i^1 :

$$\begin{aligned} I_h^1 &= \frac{1}{\Delta} [U_{eh}(a_{22} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{23}) - U_{od}(a_{12} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{13}) + U_{oi}(a_{12} \cdot a_{23} - a_{22} \cdot a_{13})] \\ I_d^1 &= \frac{1}{\Delta} [U_{eh}(a_{31} \cdot a_{23} - a_{21} \cdot a_{33}) + U_{od}(a_{11} \cdot a_{33} - a_{31} \cdot a_{13}) - U_{oi}(a_{11} \cdot a_{23} - a_{21} \cdot a_{13})] \\ I_i^1 &= \frac{1}{\Delta} [U_{eh}(a_{21} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{22}) - U_{od}(a_{11} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{12}) + U_{oi}(a_{11} \cdot a_{22} - a_{21} \cdot a_{12})] \end{aligned} \quad (2.64)$$

În care Δ este determinantul sistemului (2.63) și se exprimă astfel:

$$\Delta = a_{11}(a_{22} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{23}) - a_{21}(a_{12} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{13}) + a_{31}(a_{12} \cdot a_{23} - a_{22} \cdot a_{13}) \quad (2.65)$$

Coefficienții a_{1j} ($i=1,3$, $j=1,3$) au expresiile:

$$\begin{aligned} a_{11} &= Z_{ch} + Z_{ch} + Z_{ch} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{11}; & a_{12} &= Z_{ch} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{12}; & a_{13} &= Z_{ch} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{12}; \\ a_{21} &= Z_{sd} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{12}; & a_{22} &= Z_{sd} + Z_{cd} + Z_{sd} \cdot Z_{od} \cdot Y_{22}; & a_{23} &= Z_{sd} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{23}; \\ a_{31} &= Z_{si} \cdot Z_{ch} \cdot Y_{12}; & a_{32} &= Z_{si} \cdot Z_{od} \cdot Y_{23}; & a_{33} &= Z_{si} + Z_{ci} + Z_{si} \cdot Z_{ci} \cdot Y_{22}; \end{aligned} \quad (2.66)$$

Înlocuind relațiile (2.64) în relațiile (2.61) pentru curenții I_h , I_d , I_1 se obțin expresiile:

$$\begin{aligned} I_h &= Z_{ch} \cdot Y_{11} \cdot I_h + Y_{12} \cdot Z_{od} \cdot I_d + Y_{12} \cdot Z_{ci} \cdot I_1 \\ I_d &= Y_{12} \cdot Z_{ch} \cdot I_h + Y_{22} \cdot Z_{od} \cdot I_d + Y_{23} \cdot Z_{ci} \cdot I_1 \\ I_1 &= Y_{12} \cdot Z_{ch} \cdot I_h + Y_{23} \cdot Z_{od} \cdot I_d + Y_{22} \cdot Z_{ci} \cdot I_1 \end{aligned} \quad (2.67)$$

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

$$\begin{aligned} I_1 &= I_h + I_h + I_d + I_d + I_1 + I_1; \\ I_2 &= I_h + I_h + a^2(I_d + I_d) + a(I_1 + I_1); \\ I_3 &= I_h + I_h + a(I_d + I_d) + a^2(I_1 + I_1); \end{aligned} \quad (2.68)$$

Tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare se determină cu relația:

$$U_{hb} = - \frac{jX_c(Z_{hTST} + 3Z_n)}{Z_{hTST} + 3Z_n - jX_c} \cdot (I_h + I_h) \quad (2.69)$$

Curentul prin impedanța de tratare a nulului rețelei este:

$$I_n = \frac{3 U_{hb}}{Z_{hTST} + 3Z_n} \quad (2.70)$$

Tensiunile de fază la locul de defect se determină cu relațiile:

$$\begin{aligned} U_1 &= -j \frac{R_c \cdot X_c}{R_c - jX_c} (I_h + I_d + I_1); & U_2 &= -jX_c(I_h + a^2 I_d + a I_1); \\ & & U_3 &= -jX_c(I_h + a I_d + a^2 I_1); \end{aligned} \quad (2.71)$$

Avînd în vedere faptul că rețelele de medie tensiune funcționează radial o schemă de principiu în care apare un nodul de defect este prezentată în fig.2.23. Considerînd sistemul pe partea de 110 kV ca fiind de putere infinită impedanța acestuia este nulă. În aceste condiții matricea $[Z_n]_s$ se exprimă prin relația (2.48) iar coeficienții a_{1j} ($i=1,3$; $j=1,3$) devin:

$$A_{11} = Z_{ch} \left(1 - \frac{jX_C (Z_{nTSTI} + 3Z_n)}{Z_{nTSTI} + 3Z_n - jX_C} \cdot Y_{11} \right) = \frac{jX_C (Z_{nTSTI} + 3Z_n)}{Z_{nTSTI} + 3Z_n - jX_C}$$

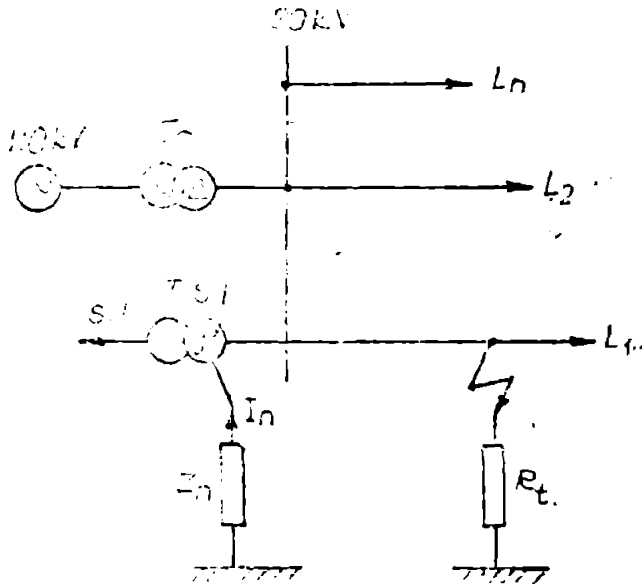


Fig. 2.23. Schema monofilară a rețelei în care s-a produs punerea la pământ

$$A_{12} = Z_{nTSTI} + 3Z_n + Z_{nL}$$

$$\cdot Z_{cd} \cdot Y_{12}$$

$$A_{13} = (Z_{nTSTI} + 3Z_n + Z_{nL}) Z_{c1} \cdot Y_{12}$$

$$A_{21} = Z_{dTR} \cdot Y_{12} \cdot Z_{ch}$$

$$A_{22} = Z_{dTR} (1 + Z_{cd} \cdot Y_{22}) + Z_{cd} \quad (2.72)$$

$$A_{23} = Z_{dTR} \cdot Z_{c1} \cdot Y_{23}$$

$$A_{31} = Z_{dTR} \cdot Y_{12} \cdot Z_{ch}$$

$$A_{32} = Z_{dTR} \cdot Z_{cd} \cdot Y_{23}$$

$$A_{33} = Z_{dTR} (1 + Z_{c1} \cdot Y_{22}) + Z_{c1}$$

Dacă se are în vedere faptul că impedanța de secvență homopolară al consumatorului este infinită (datorită conexiunii transformatorului de medie și joasă tensiune) relațiile (2.64) devin:

$$I_h^1 = 0 ;$$

$$I_d^1 = \frac{1}{U_1} \left\{ U_{ch} (Z_{c1} \cdot A_{23} - Z_{cd} \cdot A_{33}) Y_{12} + U_{cd} [(1 + Z_{ch} \cdot Y_{11}) A_{33} - Z_{c1} \cdot Y_{12} \cdot A_{13}] - U_{c1} [(1 + Z_{ch} \cdot Y_{11}) A_{23} - Z_{cd} \cdot Y_{12} \cdot A_{13}] \right\} \quad (2.73)$$

$$I_1^1 = \frac{1}{U_1} \left\{ U_{ch} \cdot Y_{12} (Z_{cd} \cdot A_{32} - Z_{c1} \cdot A_{22}) - U_{cd} [(1 + Z_{ch} \cdot Y_{11}) A_{32} - Z_{c1} \cdot Y_{12} \cdot A_{12}] + U_{c1} [(1 + Z_{ch} \cdot Y_{11}) A_{22} - Z_{cd} \cdot Y_{12} \cdot A_{12}] \right\}$$

unde: \$U_1\$ are expresia:

$$U_1 = (1 + Z_{ch} \cdot Y_{11}) (A_{22} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{23}) - Z_{cd} \cdot Y_{12} (A_{12} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{13}) + Z_{c1} \cdot Y_{12} (A_{12} \cdot A_{23} - A_{22} \cdot A_{13}) \quad (2.74)$$

De asemenea relațiile (2.67) devin:

$$I_h^1 = \frac{Y_{11}}{U_1} [U_{ch} (A_{22} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{23}) - U_{cd} (A_{12} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{13}) + U_{c1} (A_{12} \cdot A_{23} - A_{22} \cdot A_{13})] + Y_{12} \cdot Z_{cd} \cdot I_d^1 + Y_{12} \cdot Z_{c1} \cdot I_1^1$$

$$I_d^1 = \frac{Y_{12}}{U_1} [U_{ch} (A_{22} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{23}) - U_{cd} (A_{12} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{13}) + U_{c1} (A_{12} \cdot A_{23} - A_{22} \cdot A_{13})] + Y_{22} \cdot Z_{cd} \cdot I_d^1 + Y_{23} \cdot Z_{c1} \cdot I_1^1 \quad (2.75)$$

$$I_1 = \frac{X_{12}}{U_1} [U_{eh}(A_{22} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{23}) - U_{ed}(A_{12} \cdot A_{33} - A_{32} \cdot A_{13}) + U_{e1}(A_{12} \cdot A_{23} - A_{22} \cdot A_{13})] + X_{23} \cdot Z_{od} \cdot I_d + X_{22} \cdot Z_{od} \cdot I_d \quad (2.75)$$

În relațiile (2.69) și (2.72) reactanța X_C reprezintă reactanța capacitivă a rețelei de medie tensiune legată galvanic pînă la locul de defect, iar X_L din relațiile (2.71) reprezintă reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului.

Cunoscînd matricile $[I]_g$ și $[I]_g$ se determină curenții de fază (relațiile (2.68)), curentul prin impedanța de tratare a nulului (relația 2.70), tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare (relația 2.69), respectiv tensiunile de fază la locul de defect (relațiile 2.71).

Parametrii X_{1j} ($j=1,3$) se determină din relațiile (2.42) în care impedanțele Z_{eh} , Z_{ed} și Z_e^j au expresiile:

$$Z_{ed} = Z_{eh} = Z_{e1} = -j \frac{X_C^j}{3} \left(\frac{R_t}{R_t - jX_C^j} + 2 \right); \quad Z_e^j = j \frac{X_C^j}{3} \left(1 - \frac{R_t}{R_t - jX_C^j} \right) \quad (2.76)$$

Pentru calculul efectiv al relațiilor (2.74), (2.75), (2.69), (2.70) s-a întocmit un program de calcul.

2.3.2. Dependența tensiunii U_{hb} și a curentului I_n de condițiile în care are loc defectul

Parametrii ce intervin în relațiile de calcul a tensiunii U_{hb} (2.69) respectiv a curentului I_n (2.70) depind de condițiile în care are loc defectul. Pentru a analiza modul în care acești parametri modifică valoarea tensiunii U_{hb} și a curentului I_n s-a întocmit un program de calcul în limbaj FORTRAN a cărui schemă logică este prezentată în fig.2.3. Ca date de intrare s-au folosit aceleași ca și pentru defectul de tip conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator (paragraful 2.1.2), astfel încît se pot compara rezultatele obținute pentru acest tip de defect cu cele obținute pentru un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sură sau spre consumator. S-au calculat și în acest caz 3000 de variante.

În fig.2.24 - 2.28 s-au prezentat unele din rezultatele obținute în urma calculului efectuat.

Din fig.2.24 - 2.26 se observă că valoarea tensiunii U_{hb} pentru rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere depinde diferit de rezistența de trecere la locul de defect R_t , după cum rețeaua funcționează în regim de rezonanță sau nu. Tensiunea U_{hb} scade cu atât mai repede cu creșterea rezistenței R_t cu cît rețeaua funcționează într-un regim mai îndepărtat de cel de rezonanță. De asemenea se constată din fig.2.25 - 2.26 că tensiunea U_{hb} scade pentru

aceeași valoare a rezistenței de trecere la locul de defect R_t dacă crește reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului.

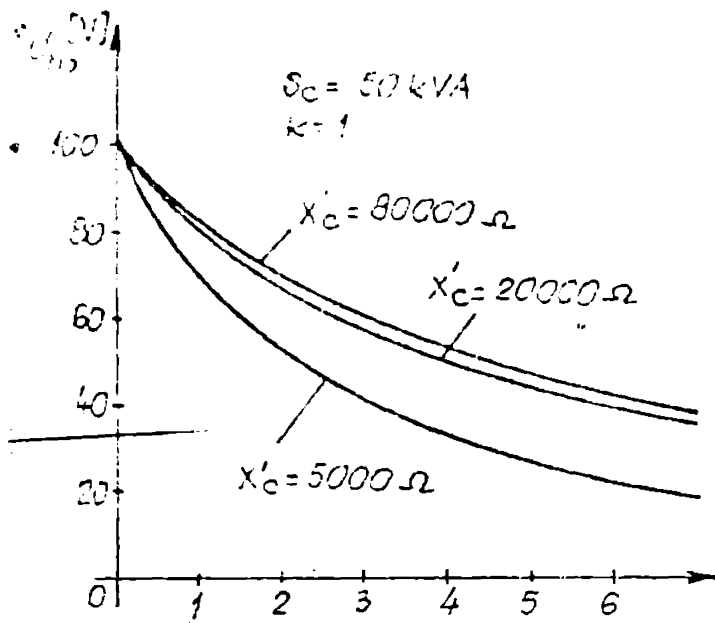


Fig.2.24. Rețea la rezonanță

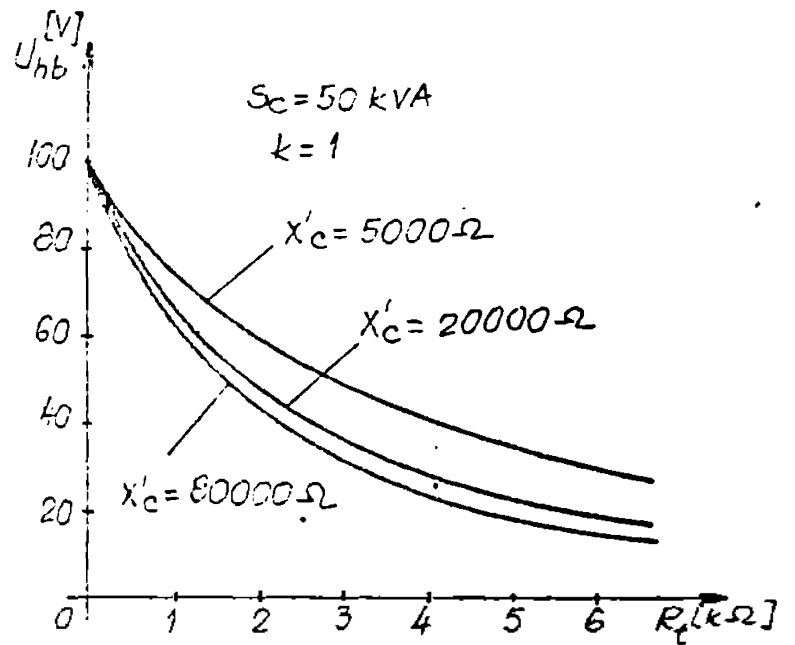


Fig.2.25. Rețea supracompensată la

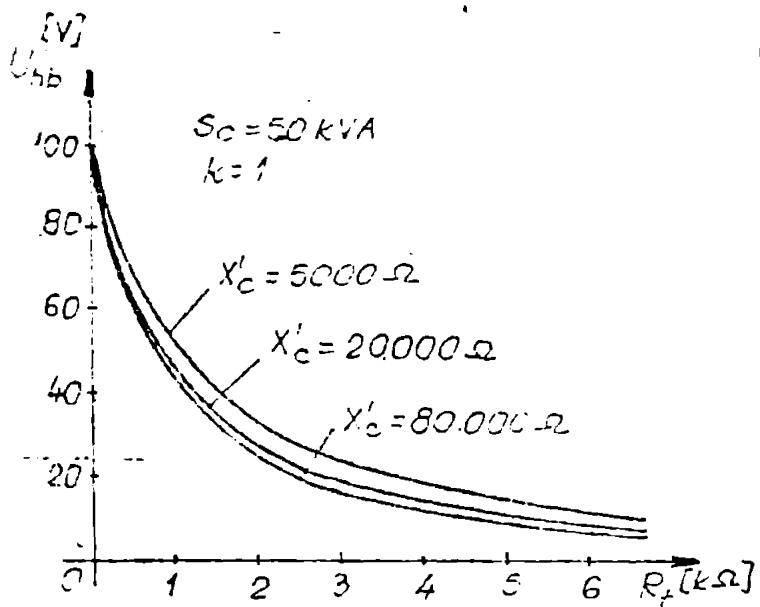


Fig.2.26. Rețea supracompensată 2a.

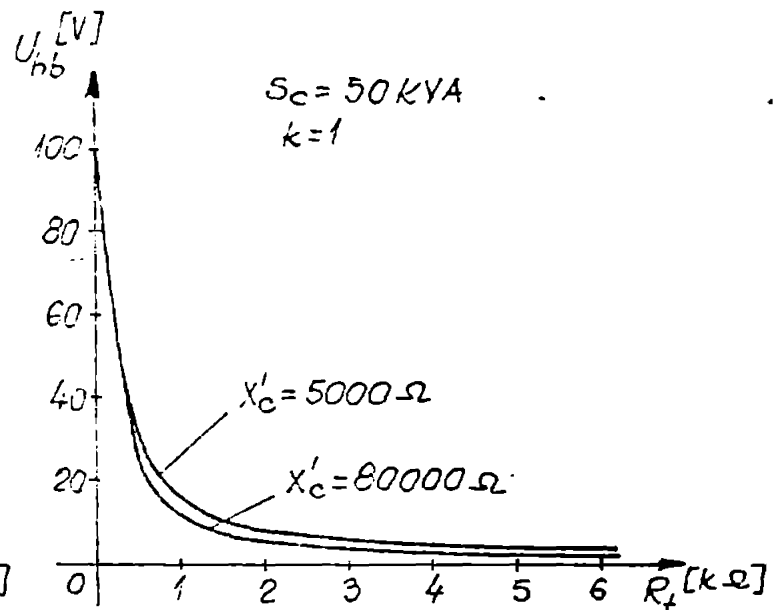


Fig.2.27. Rețea cu nulul izolat

Pentru rețeaua care funcționează în regim de rezonanță situația este inversă. Desigur, din punct de vedere al exploatarei acestor rețele nu prezintă interes regimul de rezonanță deoarece în mod normal nu se funcționează cu rețeaua în regim de rezonanță. Din calculele efectuate s-a constatat că sarcina consumatorilor alimentați prin linia cu defect, modifică destul de puțin tensiunea U_{hb} motiv pentru care acest parametru poate fi neglijat în calcule.

În cazul rețelei de medie tensiune cu nulul izolat se constată o micșorare foarte rapidă a tensiunii U_{hb} (fig.2.27) cu creșterea

rezistenței de trecere la locul de defect R_f . De asemenea în acest caz reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului X'_c influențează foarte puțin valoarea tensiunii U_{hb} motiv pentru care acest parametru poate fi neglijat în calculul tensiunii U_{hb} . În acest caz tensiunea U_{hb} în aceleași condiții de defect obține valori mult mai mici decât în cazul rețelei de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere.

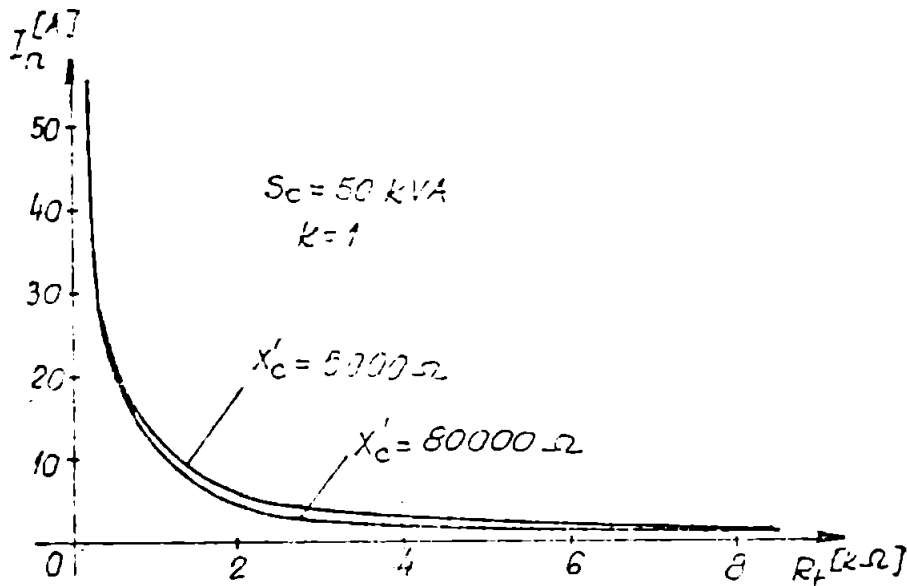


FIG.2.28. Rețea cu nulul tratat prin rezistor

tului I_n cu creșterea rezistenței R_f , de asemenea parametrul X'_c nu modifică semnificativ curentul I_n . Neglijându-se reactanța X'_c în calculul curentului I_n se fac erori acceptabile din punct de vedere tehnic. Din calculele efectuate, și în acest caz s-a constatat că sarcina consumatorilor alimentați prin linia cu defect nu modifică substanțial curentul I_n deci se poate neglija.

Comparând rezultatele prezentate în fig.2.24-2.25 cu cele obținute pentru un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă (fig.2.17-2.18) se constată existența anumitor diferențe. Tensiunea U_{hb} obținând valori mai scăzute în cazul unei simple puneri la pământ decât în cazul defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă, dacă rețeaua funcționează într-un regim apropiat de cel de rezonanță. Când rețeaua funcționează într-un regim mai îndepărtat de cel de rezonanță se constată că valorile obținute pentru tensiunea U_{hb} la cele două tipuri de defecte sînt practic aceleași (fig.2.19 și fig.2.26).

În cazul rețelei de medie tensiune cu nulul izolat rezultatele obținute pentru tensiunea U_{hb} la cele două tipuri de defecte sînt practic aceleași, deci un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă poate fi analizat ca o simplă punere la pământ,

Pentru rețeaua cu nulul tratat prin rezistor, în fig.2.28 s-a trasat dependența curentului prin rezistorul de tratare al nulului (I_n) funcție de rezistența de trecere la locul de defect R_f și reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului X'_c . Se constată o micșorare rapidă a curen-

și a face erori neacceptabile din punct de vedere tehnic.

La rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor pentru curenții I_n s-au obținut valori ceva mai mari în cazul defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă decât pentru o simplă punere la pământ (fig.2.21 și fig.2.28). Diferențele nefiind prea mari și în acest caz un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă poate fi analizat ca o simplă punere la pământ (scurtcircuit monofazat). Din cele prezentate rezultă că în majoritatea cazurilor un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă poate fi analizat ca o simplă punere la pământ pe când un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator trebuie analizat, în toate cazurile ca un defect dublu (un scurtcircuit monofazat și o întrerupere de fază).

3. METODA MODELIZĂRII PENTRU ANALIZA DEFECTELOR DE TIP CONDUCTOR INTERRUPT ȘI CAZUT LA PĂLIND ÎNTR-O REȚEA DE MĂDIE TENSIUNE

Valabilitatea rezultatelor obținute din studiul analitic al defectelor analizate se verifică prin măsurători efectuate în rețeaua reală și cu ajutorul modelelor de rețea. În rețeaua reală numărul probelor ce se pot efectua este limitat deoarece pe timpul efectuării acestor verificări alimentarea consumatorilor este perturbată. De asemenea aceste măsurători sînt și costisitoare implicînd utilizarea unei aparaturi complexe precum și deplasarea acestuia la locul de efectuare a probelor. Pe lângă aceste dezavantaje pe timpul efectuării de măsurători în rețeaua reală există și riscul de a se deteriora anumite echipamente. Din aceste motive pentru o verificare mai completă a rezultatelor analitice s-a recurs și la metoda modelizării respectiv la realizarea unui model de rețea cu ajutorul căruia să se poată reproduce astfel de defecte în laborator. S-a considerat defectul în regim permanent sinusoidal. Determinările experimentale efectuate în rețelele reale precum și literatura [7], [40], [45], [46], [68] arată că după aproximativ 0,1 secunde de la apariția defectului, componenta aperiodică a curentului de defect poate fi considerată nulă. Deci pentru defecte ce sînt eliminate după 0,1 secunde de la apariția acestora se pot accepta în studiu măsurile ca fiind periodice. În ceea ce privește precizia reproducerii fenomenelor din rețeaua reală cu ajutorul modelelor, în literatură [21], [35], [43], [83] se arată că aceasta nu depășește în general 10%, ceea ce este cu totul acceptabil avînd în vedere faptul că și parametrii utilizați în calcul nu pot fi determinați cu o precizie mai bună. La realizarea modelului analogic de rețea s-a avut în vedere și posibilitatea utilizării acestuia pentru verificarea protecțiilor existente în sistemul energetic național. Deoarece protecția de distanță este o protecție de bază în sistemele energetice la alegerea parametrilor modelului s-a avut în vedere în primul rînd posibilitatea verificării acesteia cu ajutorul modelului de rețea. Cu ajutorul modelului electrodinamic de rețea același defect poate fi reprodus în diverse condiții, sau poate fi repetat ceea ce permite o verificare mult mai corectă a echipamentului utilizat în protecții. Aceasta are o mare importanță deoarece fiabilitatea acestor echipamente este esențială în asigurarea funcționării corecte a sistemelor energetice.

Avându-se în vedere scopul urmărit s-a realizat un model fizic de rețea [1], [12], [23], [72], [83], [136], [140].

3.1. Criterii de similitudine

Se prezintă criteriile de similitudine pentru transformatoare, linii electrice și mașini electrice.

3.1.1. Transformatoare

Realizarea modelului de transformator respectând principiile similitudinii complete este practic imposibilă în condiții obișnuite [56], [83], [135], [140]. Construind un model de transformator criogenic se pot satisface în mai mare măsură condițiile impuse de similitudinea completă, dar un astfel de model este foarte costisitor în condițiile actuale. Din acest motiv la realizarea modelului de transformator se impune o similitudine incompletă funcție de utilizarea modelului realizat. În literatură se dau mai multe moduri de stabilire a criteriilor de similitudine incompletă [56], [83], [139], [140]. Un mod de a stabili aceste criterii este și cel în care se utilizează ecuațiile lui Maxwell sub formă integrală [86].

$$\begin{aligned} \oint_{S_r} \vec{E} \cdot d\vec{l} &= - \frac{d}{dt} \int_{S_r} \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ \oint_{S_r} \vec{H} \cdot d\vec{l} &= \int_{S_r} \vec{J} \cdot d\vec{S} + \int_{S_r} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Reducînd cele două ecuații la o formă adițională se obțin criteriile de similitudine conform primei teoreme a similitudinii.

$$\bar{T}_1 = \frac{\mu H \cdot l \cdot N}{E \cdot t} = \text{idem} ; \quad \bar{T}_2 = \frac{N \cdot I}{H \cdot l} = \text{idem} ; \quad \bar{T}_3 = \frac{\epsilon E \cdot l \cdot N}{H \cdot t} = \text{idem} \quad (3.2)$$

Conform teoremei \bar{T} avînd trei criterii de similitudine independente trei parametri din opt sînt independenți. Deci trei factori de scară pot fi aleși arbitrar. Relațiile pe care le satisfac factorii de scară sînt de aceeași formă ca și criteriile de similitudine, și anume:

$$\frac{m_E \cdot m_H \cdot m_N \cdot m_l}{m_E \cdot m_t} = 1 ; \quad \frac{m_N \cdot m_I}{m_H \cdot m_l} = 1 ; \quad \frac{m_\epsilon \cdot m_E \cdot m_N \cdot m_l}{m_H \cdot m_t} = 1 \quad (3.3)$$

La realizarea modelului electromagnetic de transformator se aleg de obicei factorii de scară independenți m_1 , m_t și m_H . Utilizînd la realizarea miezului modelului de transformator același material

ca și la transformatorul original rezultă $m_1 = 1$. Dacă și dielectricul la model și original este același $m_2 = 1$. Având în vedere faptul că mărimile E și H variază în timp sinusoidal este necesar să fie satisfăcut și criteriul homocronismului ($\omega, t = \text{idem}$). Folosind aceeași frecvență în model și în original rezultă $m_3 = 1$. Funcționându-se cu aceeași inducție în model și în original pentru a se asigura aceeași pierdere relativă în miezul feromagnetic 140 factorul de scară al intensității cîmpului magnetic devine unitar $m_4 = 1$. Cu aceste precizări din relațiile (3.3) se obțin ceilalți factori de scară:

$$m_1 = \frac{m_1}{m_N} ; m_2 = \frac{m_N \cdot m_1}{m_t} \text{ respectiv } m_U = \frac{m_N \cdot m_1^2}{m_t} ; m_R = \frac{m_U}{m_1} = \frac{m_N^2 \cdot m_1}{m_t} ;$$

$$m_L = m_U \cdot m_1 \cdot m_N^2 ; m_C = \frac{m_t \cdot m_N^2 \cdot m_1}{m_t} ; \quad (3.4)$$

În situația în care interesează doar comportarea acestuia ca element component al unei rețele electrice soluția cea mai avantajoasă este alegerea coeficientului de scară al numărului de spire (m_1) astfel încît $m_C = 1$. Utilizînd aceleași materiale pentru realizarea modelului ca și pentru original condiția ca $m_C = 1$ conduce la $m_U = m_1$ care uneori este greu de realizat. Dacă modelul reproduce măști domeniul liniar al originalului valoarea tensiunii nu influențează desfășurarea fenomenului, de aceea poate fi aleasă arbitrar. Altfel, scara tensiunii trebuie respectată sau corectată prin practicarea unui istm în coloanele transformatorului corespunzător indicelui de scară impus de tensiunea nominală a modelului.

În literatură [23], [72], [136], [140], se arată că în situația în care interesează doar desfășurarea fenomenelor în timp pentru modelul transformatorului este suficient să se impună următoarele criterii de similitudine:

$$\bar{T}_1 = \frac{L_1 f + L_2 f}{M} = \text{idem} \text{ sau } \frac{X_L}{X_U} = \text{idem} ;$$

$$\bar{T}_2 = \frac{R_1 + R_2}{M} \cdot t = \text{idem} \text{ sau } \frac{R_L}{X_U} = \text{idem} ; \quad (3.5)$$

la care se adaugă criteriile suplimentare și anume:

- pierderile relative în înfășurări constante

$$P_{Cu_r} = \frac{R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2}{S_N} = \text{idem} ;$$

- pierderile relative în fier constante $P_{Fe_r} = \frac{P_{Fe}}{S_N} = \text{idem}$

- caracteristicile relative de mers în gol identice $\frac{U_N}{I_N} = f\left(\frac{I_{0N}}{I_N}\right) ;$

în relațiile (3.5) mărimile au următoarele semnificații: L_{1f} , L_{2f} inductivitățile de dispersie; M - inductivitatea mutuală dintre înfășurările transformatorului; R_1 , R_2 - rezistențele celor două înfășurări ale transformatorului.

La transformatoarele de mare putere raportul X/R este mult mai mare decât la transformatoarele de mică putere, de aceea pentru satisfacerea criteriului \bar{V}_1 este necesară mărirea dispersiei transformatorului model. Aceasta se realizează fie prin așezarea corespunzătoare a înfășurărilor, fie prin inserarea transformatorului de mică putere cu bobine ce au factori de calitate foarte mare și sînt liniare.

La stabilirea criteriilor (3.5) s-au neglijat capacitățile dintre spire, dintre înfășurări și dintre înfășurări și curbă, care pentru regimurile de scurtcircuit nu prezintă importanță prea mare.

3.1.2. Linii electrice

Similitudinea liniilor electrice se studiază riguros pornind de la similitudinea câmpurilor [86], [140]. Avînd în vedere faptul că interesează tensiunile și curenții este suficientă o similitudine incompletă, neglijîndu-se similitudinea geometrică și radiația energiei electromagnetice în spațiu [29], [78], [83], [137], [140].

Presupunînd parametrii liniei constante în timp ecuațiile diferențiale ale liniilor lungi sînt:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L \frac{\partial i}{\partial t} + R \cdot i = 0 ; \quad \frac{\partial i}{\partial x} + C \frac{\partial u}{\partial t} + G \cdot u = 0 \quad (3.6)$$

Matricea dimensională a mărimilor din relațiile (3.6) este [86], [140]:

$$\begin{bmatrix} [u] \\ [R] \\ [G] \\ [t] \\ [L] \\ [C] \\ [i] \\ [x] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & -3 & -1 \\ 1 & 1 & -3 & -2 \\ -3 & -1 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & -2 \\ -3 & -1 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Aplicînd teorema a doua a similitudinii se obțin criteriile de similitudine [29], [86], [136], [140]:

$$\bar{V}_1 = \frac{L}{R \cdot t} ; \quad \bar{V}_2 = \frac{C}{G \cdot t} ; \quad \bar{V}_3 = x \sqrt{RG} ; \quad \bar{V}_4 = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{R}{G}} \quad (3.8)$$

Patru parametri fiind independenți, patru factori de scară sînt independenți și se aleg m_U , m_R , m_G și m_t . Păstrînd aceeași frecvență

în model și original factorul de scară al timpului devine $m_t=1$, iar factorii de scară sînt dependenți și se determină cu relațiile:

$$m_L=m_R, m_C=m_G, m_X = \frac{1}{m_G \cdot m_R}; m_1 = m_U \cdot \sqrt{\frac{m_G}{m_R}}; \quad (3.9)$$

Pentru modulul și faza impedanței caracteristice a modelului unei linii cu pierderi se obțin expresiile [86], [140]:

$$Z_{cm} = \sqrt{\frac{m_R}{m_G}} \cdot Z_{c_{or}}; \varphi_{cm} = \varphi_{c_{or}}; \quad (3.10)$$

Viteza de propagare a undelor în model se determină cu relația

$$v_m = m_X \cdot v_{or}; \quad (3.11)$$

Deci viteza de propagare a undelor în model și în linia reală diferă prin factorul de scară m_X . Pentru a se asigura aceeași viteză de propagare a undelor este necesar ca $m_X=1$. În cazul nostru avînd în vedere scopul modelului, faptul că $v_m \neq v_{or}$ nu deranjează, deci nu este necesar ca $m_X=1$. Factorul de scară al impedanței caracteristice este:

$$m_{Z_c} = \frac{m_U}{m_1} = \sqrt{\frac{m_R}{m_G}} \quad (3.12)$$

Alegînd factorii de scară m_U, m_1, m_R, m_G se pot determina ceilalți factori de scară. Din criteriile de similitudine (3.8) se constată pentru cazul cînd $m_t=1$ că în model și original constantele de timp sînt aceleași.

$$\tau_{L,m} = \frac{L}{R} = \tau_{L_{or}} \quad \text{și} \quad \tau_{cm} = \frac{C}{G} = \tau_{c_{or}} \quad (3.13)$$

Din cele patru criterii de similitudine (3.8) numai trei sînt independente conform ecuației de criteriu.

3.1.3. Mașini electrice

Studiul fenomenelor din sistemul energetic impune modelarea mașinilor electrice ca element de circuit, fără a interesa distribuția câmpului electromagnetic din interiorul mașinii. Deci la modelizarea mașinilor electrice folosim modelarea incompletă [23], [136], [140]. Stabilirea criteriilor de similitudine se face separat pentru mașinile asincrone respectiv sincrone, din ecuațiile pe care le satisfac.

Ecuațiile mașinii asincrone în sistemul de coordonate $d, q, 0$ (Park) sînt [32], [47], [81], [82]:

$$\begin{aligned} u_{d1} &= \frac{d\psi_{d1}}{dt} - \omega \cdot \psi_{q1} + R_1 \cdot i_{d1}; \\ u_{q1} &= \frac{d\psi_{q1}}{dt} + \omega \cdot \psi_{d1} + R_1 \cdot i_{q1}; \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}
 u_0 &= \frac{d\psi_0}{dt} ; \\
 0 &= \frac{d\psi_{d2}}{dt} + R_2 \cdot i_{d2} ; \\
 0 &= \frac{d\psi_{q2}}{dt} + R_2 \cdot i_{q2} ; \\
 0 &= \frac{d\psi_{d3}}{dt} + R_3 \cdot i_{d3} ; \\
 0 &= \frac{d\psi_{q3}}{dt} + R_3 \cdot i_{q3} ; \\
 \frac{J_p}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} + C + \Delta C &= C_e ;
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

$$C_e = \frac{1}{2} (\psi_{d1} \cdot i_{q1} + \psi_{q1} \cdot i_{d1}) .$$

unde legătura dintre fluxuri se exprimă matricial prin relația (3.15).

$$\begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{q1} \\ \psi_0 \\ \psi_{d2} \\ \psi_{q2} \\ \psi_{d3} \\ \psi_{q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M+L_{1\sigma} & 0 & 0 & M & 0 & M & 0 \\ 0 & M+L_{1\sigma} & 0 & 0 & M & 0 & M \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & 0 & 0 & M+L_{2\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & M+L_{2\sigma} & 0 & 0 \\ M & 0 & 0 & M+L_{2\sigma} & 0 & M+L_{3\sigma} & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & M+L_{2\sigma} & 0 & M+L_{3\sigma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_0 \\ i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{d3} \\ i_{q3} \end{bmatrix}
 \tag{3.15}$$

În această relație parametri au următoarea semnificație: M - inducivitatea mutuală între stator și rotor; $L_{1\sigma}$ - inductivitatea totală de dispersie a unei faze a înfășurării statorice; $L_{2\sigma}$ - inductivitatea totală de dispersie a unei faze a primei înfășurări rotorice; $L_{3\sigma}$ - inductivitatea totală de dispersie a unei faze a celei de a doua înfășurări rotorice; $M_{1\sigma}$ - inductivitatea totală mutuală de dispersie dintre două faze ale înfășurărilor rotorice; L_0 - inductivitatea corespunzătoare înfășurării echivalente homopolare; R_1 - rezistența unei faze statorice; R_2 - rezistența unei faze a primei înfășurări rotorice; R_3 - rezistența unei faze a celei de a doua înfășurări rotorice.

Din sistemul de ecuații (3.14) rezultă următoarele criterii de similitudine: [23], [52], [110], [136], [140].

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 &= \frac{M + L_1 \omega}{R_1 \cdot t} = \text{idem}; & \bar{T}_2 &= \frac{M}{R_1 \cdot t} = \text{idem}; & \bar{T}_3 &= \frac{L_1 \omega}{R_1 \cdot t} = \text{idem}; \\ \bar{T}_4 &= \frac{M}{R_2 \cdot t} = \text{idem}; & \bar{T}_5 &= \frac{M + L_2 \omega}{R_2 \cdot t} = \text{idem}; & \bar{T}_6 &= \frac{M + L_1 \omega}{R_2 \cdot t} = \text{idem}; \\ \bar{T}_7 &= \frac{M}{R_3 \cdot t} = \text{idem}; & \bar{T}_8 &= \frac{M + L_3 \omega}{R_3 \cdot t} = \text{idem}; & \bar{T}_9 &= \frac{M + L_1 \omega}{R_3 \cdot t} = \text{idem}; \\ \bar{T}_{10} &= \frac{T_1}{\omega_0 t^2} = \text{idem}; & \bar{T}_{11} &= \frac{AC}{C_H} = \text{idem}; & \bar{T}_{12} &= \frac{C}{C_H} = \text{idem}; \end{aligned} \quad (3.16)$$

Numărul criteriilor de similitudine obținute prin scrierea ecuațiilor în coordonate naturale ar fi mult mai mare decât cel obținut prin scrierea ecuațiilor în coordonate d, q, e , motiv pentru care s-a preferat acest mod de scriere al ecuațiilor motorului asincron. La criteriile de similitudine stabilite (3.16) se adaugă următoarele criterii suplimentare [72], [110], [140]:

- criteriul acolorași pierderi relative în înfășurări similare;

$$\bar{T}_{13} = \frac{R_j \cdot I_j^2}{P_n} = \text{idem} \quad (3.17)$$

unde P_n - este puterea nominală a motorului, I_j - curentul înfășurării j , R_j - rezistența înfășurării j .

- criteriul acolorași tensiuni relative la bornole înfășurărilor similare:

$$\bar{T}_{14} = \frac{U_j}{R_j \cdot I_j} = \text{idem}; \quad (3.18)$$

unde U_j - este tensiunea la bornole înfășurării j .

- criteriul coincidenței caracteristicilor relative în raport cu permeabilitatea magnetică și inductivități

$$\bar{T}_{15} = \mu^m = \frac{\mu}{\mu_{\max}} = f(i^m) = f\left(\frac{1}{I_{\max}}\right) = \text{idem}; \quad (3.19)$$

$$\bar{T}_{16} = L^m = \frac{L}{L_{\max}} = \varphi(i^m) = \varphi\left(\frac{1}{I_{\max}}\right) = \text{idem};$$

Dacă nu se are în vedere natura criteriului (3.19) poate lipsi.

Deoarece se acceptă variație sinusoidală în timp pentru tensiuni și curenți trebuie satisfăcut și criteriul homocronismului:

$$\bar{T}_{17} = \omega \cdot t = \text{idem} \quad (3.20)$$

Procedându-se la fel pentru mașinile sincrone se obțin criterii de similitudine analoge cu cele obținute pentru mașina asincronă (relațiile 3.16) [23], [72], [136], [140].

Având în vedere forma criteriilor de similitudine ale motorilor asincroni și sincroni pot fi formulate criteriile de similitudine sub formă generală, valabile pentru orice tip de motor electric de curent alternativ. Aceste criterii generale pot fi formulate astfel:

- pentru fiecare din circuitele motorului (înfășurările statorului și ale rotorului) trebuie să fie îndeplinit criteriul de similitudine

$$T_j^t = \frac{L_j}{R_j \cdot t} = \text{idem} \quad (3.21)$$

unde L_j este inductivitatea proprie a circuitului j , R_j - este rezistența totală a circuitului j , t - este timpul.

O relație analogă satisfac și inductivitățile mutuale între înfășurările j și k :

$$T_{jk}^t = \frac{M_{jk}}{R_j \cdot t} = \text{idem}; \quad T_{kj}^t = \frac{M_{kj}}{R_j \cdot t} = \text{idem} \quad (3.22)$$

Din ecuația mișcării rezultă criteriul de similitudine general:

$$T_j = \frac{T_1}{\omega_0 t^2} \quad (3.23)$$

unde $T_j = \frac{J_0 \omega_0}{p C_M} = \frac{J_0 \Omega_0}{C_M}$ este constanta de timp de inerție a rotorului, ω_0 - este pulsația unghiulară sincronă, iar Ω_0 - este viteza unghiulară sincronă, C_M - cuplul nominal al motorului, p - numărul perechilor de poli, J_0 - momentul de inerție al rotorului motorului.

3.2. Modelul electrodinamic de rețea

Modelul electrodinamic de rețea este un model fizic destinat reproducerii unor defecte din rețeaua de 110 kV respectiv din rețeaua de medie tensiune în laborator, precum și de-a verifica funcționarea protecțiilor în condiții cât mai apropiate de cele reale [58], [60]. Realizarea modelului electrodinamic de rețea s-a făcut după concepția unui colectiv din care a făcut parte și autorul. Acest model electrodinamic de rețea este unic în țară, autorii obținând brevet de invenție înregistrat la OSIM [123]. La realizarea acestui model s-au folosit componente existente în țară. Modelul este realizat în cadrul laboratorului de protecții și automatizări Deva, laborator care aparține secției de cercetare-proiectare din cadrul Centralei Industriale de Netaj Electric București.

Autorul a activat în cadrul acestui laborator, iar după angajarea sa la Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, în fiecare an a avut contracte de cercetare științifică cu acest laborator, contracte în care s-au rezolvat și probleme legate de

realizarea modelului electrodinamic de rețea.

Schema principială a modelului electrodinamic de rețea este prezentată în fig.3.1 și cuprinde: sursa considerată de putere infinită

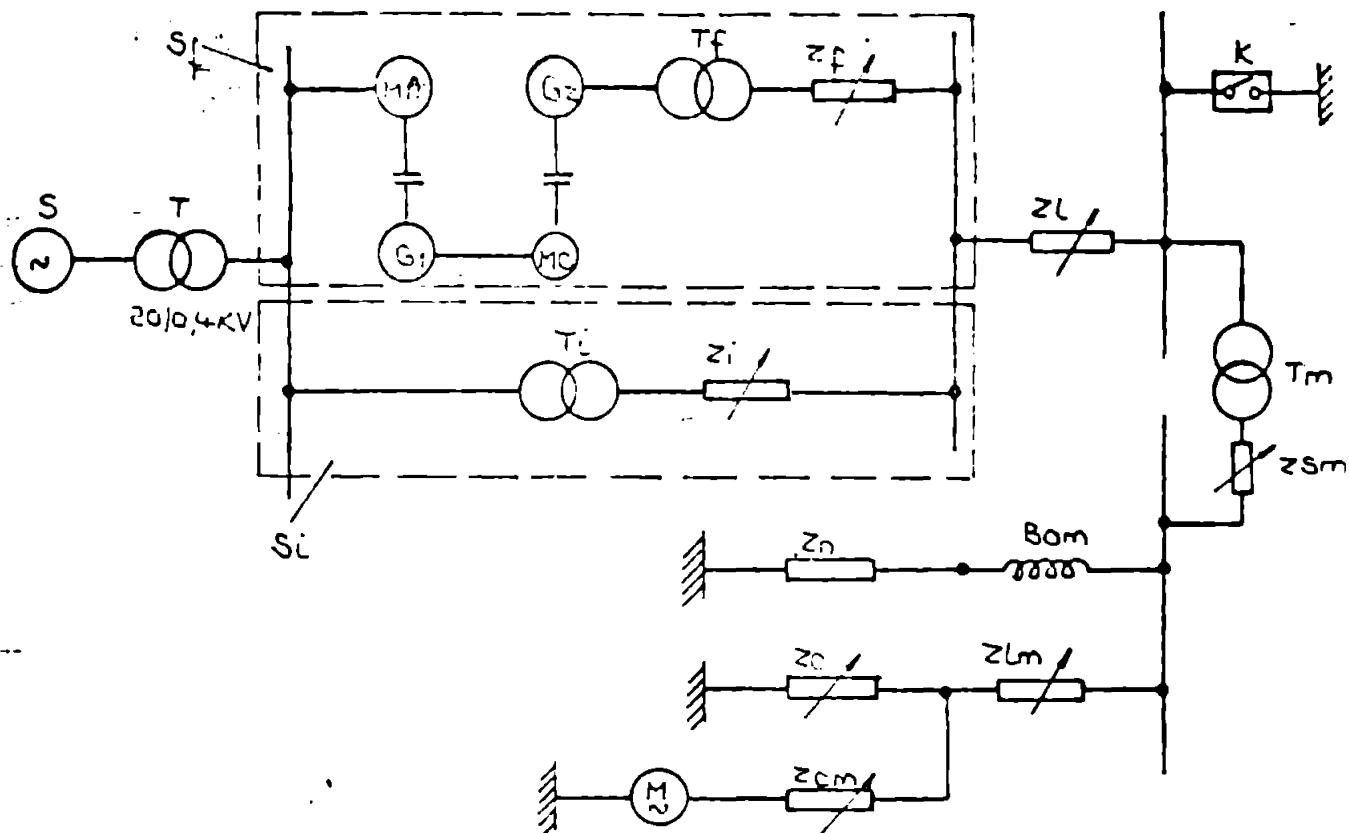


Fig.3.1. Schema de principiu a modelului electrodinamic de rețea

nită realizată din transformatorul T_1 și impedanțele variabile Z_1 ; sursa de putere finită realizată din motorul asincron MA, generatorul de curent continuu G1, motorul de curent continuu MC, generatorul asincron GS, transformatorul T_2 și impedanța variabilă Z_p ; modelul liniei de 110 kV realizat prin impedanța variabilă Z_l ; comutatorul static K; modelul transformatorului 110 kV/M.T realizat prin transformatorul T_m și impedanța variabilă Z_{sm} ; bobina de creștere a nulului B_{om} ; impedanța de tratare a nulului Z_n , modelul liniei de medie tensiune realizat prin impedanța variabilă Z_{lm} ; modelul de consumator realizat prin impedanța variabilă Z_c și motorul asincron M înseriat cu impedanța variabilă Z_{om} .

Pornindu-se de la necesitatea de a putea verifica și protecțiile existente în sistemul energetic național cu modelul electrodinamic de rețea s-a ales curentul nominal al acestuia 50 A, iar pentru timp scurt (sub 3 secunde) suportă un curent de 500 A. Alimentarea modelului se realizează printr-un întrerupător tip ML - 400, care are $I_n = 400$ A, $U_n = 500$ V și este prevăzut cu relee electromagnetice reglate la 1000 A și relee termice reglate la 400 A. Protecția de rezervă este reglată la 400 A și $t = 4$ secunde. Tot pentru a se putea verifica relee modelul este prevăzut cu transformatoare de curent și de tensiune

INSTITUTUL DE RESEARCH
TIARA
RESEARCH SYSTEM

tensiune.

În fig.3.2 este prezentată în vedere de ansamblu a pupitrului de comandă aferent modelului de rețea, în fig.3.3 o vedere a panoului de măsură, iar în fig.3.4 o vedere a ansamblului octopozitelor ce modelizează linia de 110 kV.



Fig.3.2. Vedere de ansamblu a pupitrului de comandă

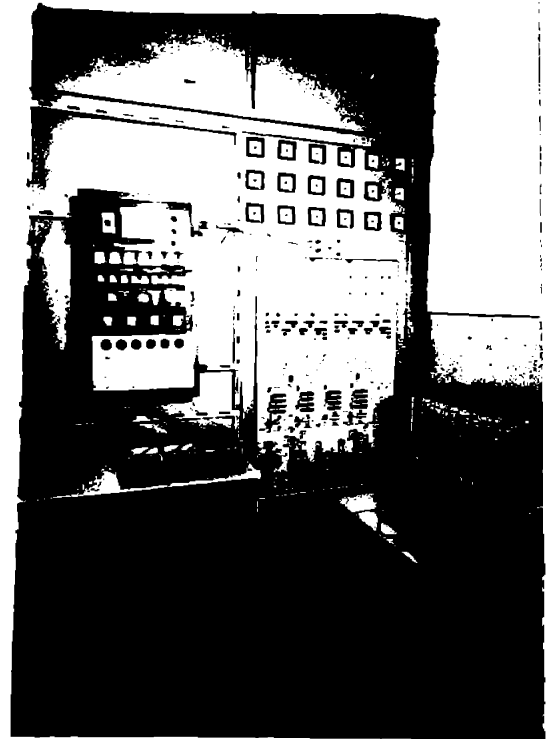


Fig.3.3. Vedere a panoului de măsură



Fig.3.4. Vedere a octopozitelor ce modelizează linia de 110 kV

3.2.1. Descrierea elementelor componente ale modelului

În acest subcapitol se prezintă caracteristicile elementelor conținute de modelul de rețea conform schemei principale prezentate în fig.3.1.

Sursa considerată de putere infinită se realizează cu ajutorul transformatorului T_1 și a impedanței variabile Z_1 . Transformatorul T_1 are următoarele caracteristici: $S_n = 75 \text{ KVA}$; $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $U_{2n} = 380 \text{ V}$, 440 V , 660 V ; $I_{1n} = 110 \text{ A}$; $I_{2n} = 110 \text{ A}$, 96 A , 64 A . La transformator se pot realiza conexiunile Y_0/Y_0 , Y_0/Y sau Y_0/Δ încoputurile și sfirgiturile înfăgurărilor secundare fiind accesibile. Treccrea de la o conexiune la alta se face cu ajutorul unor comutatoare.

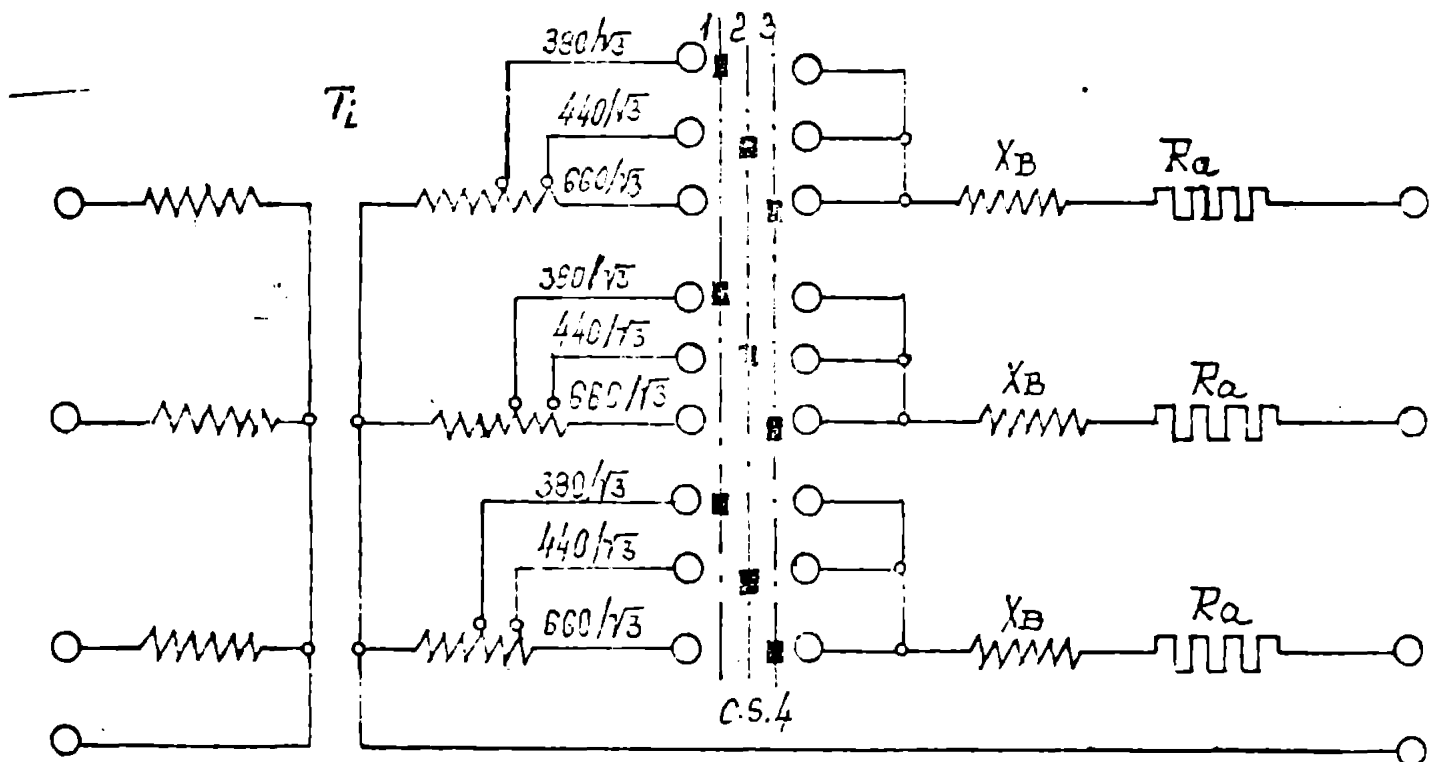


Fig.3.5. Schema de conexiuni a sursei considerată de putere infinită

În fig.3.5 este prezentată schema de modelare a sursei considerată de putere infinită. Modul cum se realizează impedanța variabilă Z_1 din fig.3.1 respectiv reactanțele X_B respectiv rezistențele R_a din fig.3.5 este prezentat în fig.3.6. Pentru frecvența de 50 Hz reactanța $X_{B1} = 7 \Omega$ iar $X_{B2} = 14 \Omega$. Cu schema prezentată în fig.3.6 se pot realiza impedanțe cuprinse între $1,17 - 84 \Omega$ în 24 de trepte conform tabelului 3.1, schimbând poziția cheilor C_1 , C_2 , C_3 . Cu ajutorul cheii C_4 se modifică raportul X/R în patru trepte și anume: 30 ($\varphi = 88^\circ$); 20 ($\varphi = 87^\circ$); 10 ($\varphi = 84^\circ 17'$); $2,75$ ($\varphi = 70^\circ$) corespunzător celor patru poziții ale cheii. Bobinele cu care s-au realizat aceste reactanțe sînt fără miez feromagnetic pentru a asigura liniaritatea acestora. În fig.3.7 este prezentată o vedere de ansamblu a acestor bobine.

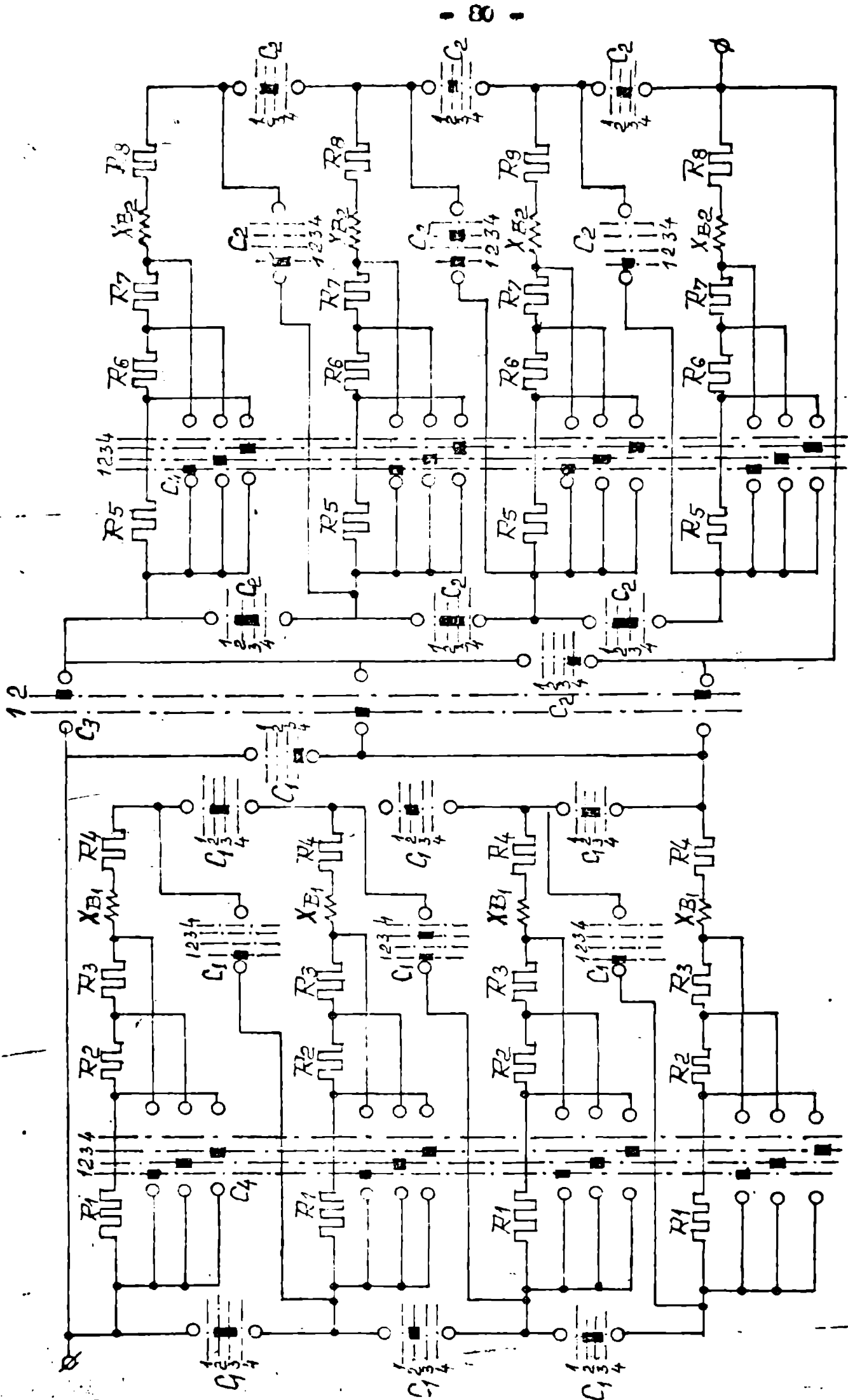


FIG.3.6. Schema de conexiuni a impedanțelor Z_1 și Z_E

Tabelul 3.1. Valorile reactanței X_B funcție de poziția cheilor C_1, C_2, C_3

Nr. crt.		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X_B	a		1,17	1,55	1,7	1,75	2,33	3,11	3,5	4,66	5,27	6,22	7
Poziția cheii	C_1	b	2	2	2	2	3	1	4	3	2	3	3
	C_2	c	2	3	1	4	2	2	2	3	2	1	4
	C_3	d	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1

Nr. crt.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
a	9,3	10,88	14	15,75	18,66	21	28	33,75	42	56	57,75	63	84
b	1	3	4	2	1	3	1	1	1	4	2	3	1
c	3	2	3	3	1	3	4	2	3	1	1	1	1
d	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1



Fig. 3.7. Vedere a bobinelor cu care se realizează impedanța Z_1

Sursa de putere finită : se realizează cu ajutorul grupului constituit din motorul asincron M.C., generatorul de curent continuu G_1 , motorul de c.c. M.C., generatorul sincron G_2 , transformatorul T_2 și impedanța variabilă Z_f din fig. 3.1. Elementele principale ale sursei finite au următoarele caracteristici:

- motorul asincron (M.C.) este de tip M.C.I. - 575 - 4, fabricație I.M.S. București; $P = 75 \text{ kW}$; $U_n = 380 \text{ V}$; $I_n = 141 \text{ A}$; $n = 1470 \text{ rot/min}$; 50 Hz ; $\cos \varphi = 0,88$; la pornire $I_p/I_n = 7,5$; la pornire $\Delta I_p/I_n = 2,3$.
- generator de curent continuu (G_1) tip $G_0 - 355$ fabricație I.M.S. București; $P = 110 \text{ kW}$; $U_n = 220 \text{ V}$; $I_n = 556 \text{ A}$; $n = 1500 \text{ rot/min}$; $U_{ex} = 220 \text{ V}$, excitație mixtă;

- motor de curent continuu (M.C.) tip $G_0 - 200$ fabricat de I.M.S. București; $P = 55 \text{ kW}$; $U_n = 220 \text{ V}$; $I_n = 224 \text{ A}$; $n = 1500 \text{ rot/min}$. $U_{ex} = 110 \text{ V}$; $I_{ex} = 3,7 \text{ A}$;

- generator sincron tip SCR - 80/400 fabricație I.M.B.

Sucursă: $S = 80 \text{ KVA}$; $U_n = 400 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $n = 1500 \text{ rot/min.}$;
 $U_{ex} = 58 \text{ V}$; $I_{ox} = 16 \text{ A}$.

Generatorul sincron este prevăzut cu regulator automat de tensiune. De asemenea pentru ca pe timpul unui scurtcircuit valoarea tensiunii la bornele generatorului sincron să nu scadă foarte mult transformatorul T_2 este construit cu reactanță de scurtcircuit mărită. Tensiunea de scurtcircuit a acestui transformator este de 15%. Celelalte caracteristici ale transformatorului T_2 sînt identice cu ale transformatorului T_1 .

Impedanța Z_f poate lua patru valori și anume $0,07 \Omega$, $0,6 \Omega$, $1,4 \Omega$, respectiv $2,2 \Omega$, cu rapoartele X/R : 30, 15, 10, 2,75. Bobinele cu care se realizează impedanța Z_f sînt prezentate în fig. 3.8.

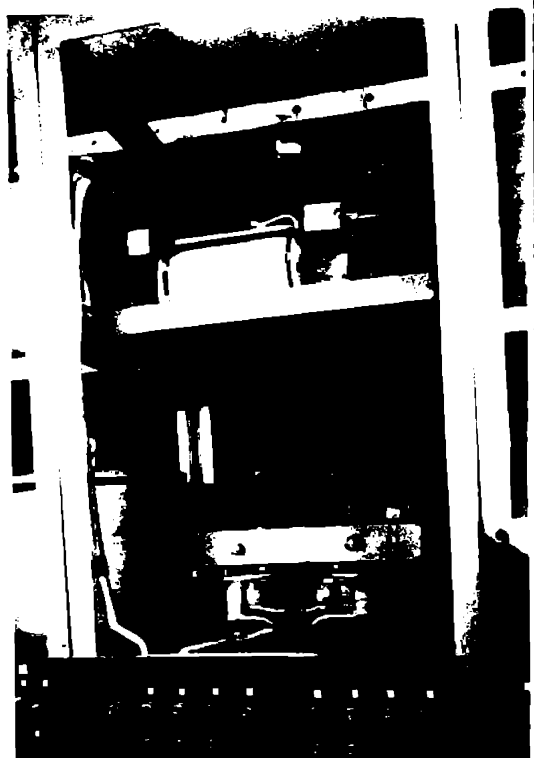


Fig. 3.8. Bobinele cu care se realizează impedanța Z_f

zentată în fig. 3.10.

Valorile ce le obțin reactanțele utilizate la realizarea octopoliilor cu care se modelizează linia sînt prezentate în tabelul 3.2.

Bobinele utilizate pentru realizarea octopoliilor au raportul $X/R = 10$.

Cu ajutorul cheii K_4 se obțin rapoartele X/R de următoarele valori: 2,75; 1,73; 1; inserînd rezistența de valori corespunzătoare cu bobinele ce modelizează linia.

Sursa de putere finită este prevăzută cu o protecție maximală de curent temporizată, reglată la 250 A și $t = 0,5 \text{ sec.}$, și o protecție la suprasarcină reglată la un curent de 150 A și $t = 6 \text{ sec.}$

Linia de înaltă tensiune se modelizează cu doi octopoli în \bar{U} . Schema acestor octopoli este prezentată în fig. 3.9. Reactanțele X_{Lm} și X_{nm} sînt variabile în trepte de la $0,166 \Omega - 12 \Omega$. Pentru modificarea acestor reactanțe se folosește o schemă identică cu cea prezentată în fig. 3.6.

Reactanțele bobinelor utilizate în realizarea octopoliilor ce modelizează linia au valorile de 1Ω și 2Ω . O vedere de ansamblu a acestora este prezentată în fig. 3.10.

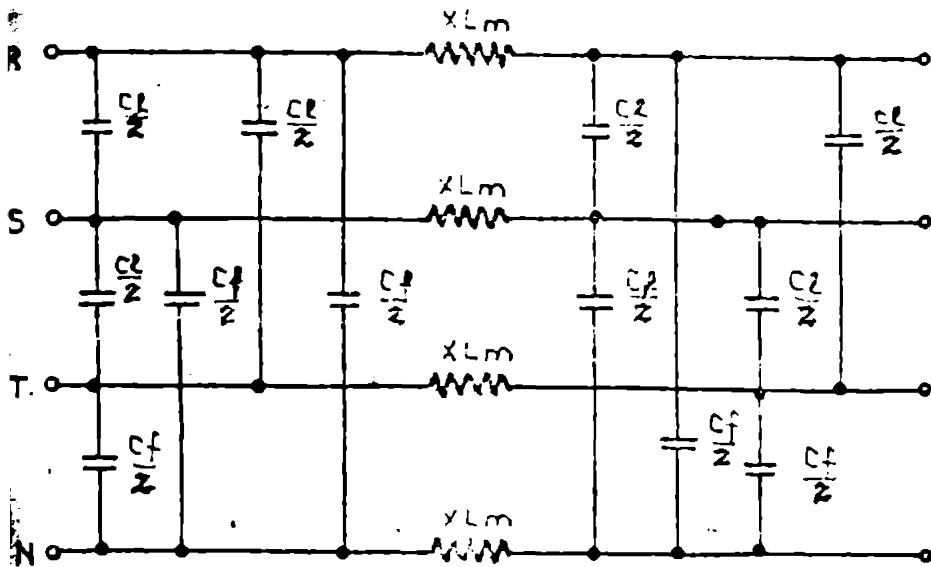


Fig. 3.9. Schema octopoliilor ce modelizează linia



Fig. 3.10. Octopol al liniei de înaltă tensiune

Tabelul 3.2. Valorile impedanței liniei funcție de poziția cheilor C_1, C_2, C_3

Nr. crt.		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X_{lm}	a	0,166	0,22	0,24	0,25	0,33	0,44	0,5	0,66	0,75	0,89	1	
Poziția cheii	C_1	b	2	2	2	2	3	1	4	3	2	3	3
	C_2	c	2	3	1	4	2	2	2	3	2	1	4
	C_3	d	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1

Nr. crt.		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
a		1,33	1,5	2	2,25	2,66	3	4	4,5	6	8	8,25	9	12
b		1	3	1	2	1	3	1	1	1	4	2	3	1
c		3	2	3	3	1	3	4	2	3	1	1	1	1
d		2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1

În cazul defectelor foarte apropiate de barele stației de transformare raportul X/R scade sub 1. În astfel de situații octopoli trebuie să fie completați cu rezistențe suplimentare.

Conectarea octopoliilor cu care se modelează linia se realizează prin trei întrerupătoare (câte unul pentru fiecare fază) al căror timp

de acționare poate fi reglat astfel încât să se poată reproduce timpri de acționare a întreruptoarelor reale, existente în exploatare. Cele trei întreruptoare pot fi acționate monofazat sau trifazat, la fel ca și întreruptoarele din sistemul energetic național.

Transformatoarele de curent s-au realizat în două variante având curentul secundar nominal de 5 A respectiv de 1 A [125], [126]. Schema electrică a transformatorului de curent este prezentată în fig.3.11.

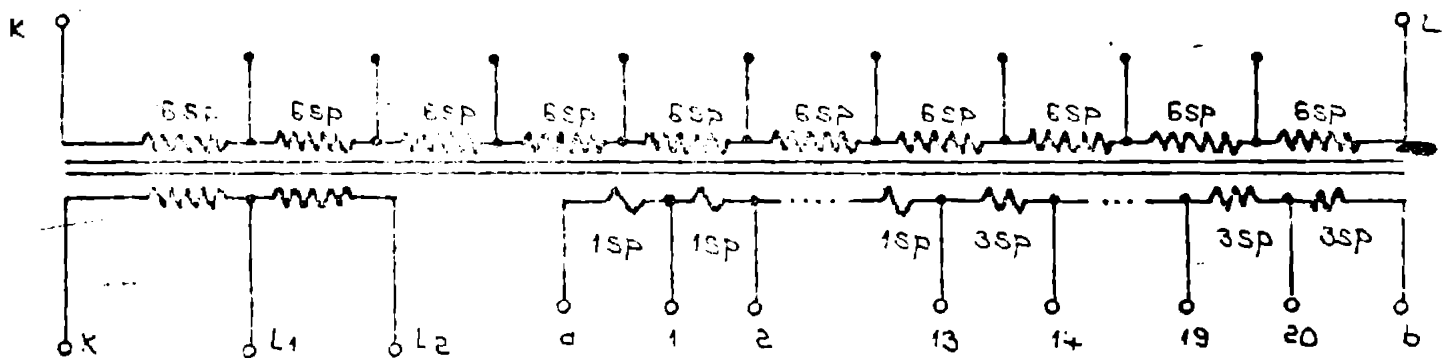


Fig.3.11. Schema transformatorului de curent

O vedere de ansamblu a transformatorilor de curent este prezentată în fig.3.12



Fig.3.12. Vedere de ansamblu a transformatoarelor de curent
realiza o corecție cât mai fină.

Transformatoarele de curent s-au realizat pe un miez toroidal, construit din tablă laminată la rece cu cristale orientate tip ANICO-16A, având inducția de saturație 1,8 T. Cu ajutorul prizelor se pot obține rapoarte de transformare cuprinse în intervalul 1-20. Alegerea unui raport de transformare se face funcție de lungimea liniei care se modelizează prin cei doi octopoli, respectiv funcție de impedanța octopolilor. Infășurarea a - b (Fig.3.11) din secundarul transformatorului de curent are rolul de a corecta raportul de transformare și este prevăzută cu multe prize pentru a se putea

Transformatorul de curent de 1 A este construit la fel ca cel de 5 A doar în secundar înfăgurarea $k=1$ este prevăzută cu 300 de spire. Cu acest transformator se pot realiza rapoarte de transformare între 5 și 50. Cifra de supracurent impusă transformatorului de curent este 20.

Erorile transformatoarelor de curent sînt prezentate în tabelul 3.3, pentru transformatorul de 5 A și tabelul 3.4 pentru cel de 1 A.

Tabelul 3.3. Erorile transformatorului de curent cu $I_{ns} = 5 A$.

	$Z_2=1,1\Omega; Z_t=1,3\Omega; \cos\varphi=0,8$						$Z_2=0,2\Omega; Z_t=0,33\Omega; \cos\varphi=0,8$					
I/I_n	1,2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	1,2	1	0,5	0,2	0,1	0,05
$\Delta I \%$	0,42	0,45	0,52	0,69	1,1	1,8	0,14	0,15	0,25	0,45	0,9	1,66
$\Delta\varphi'$	7,42	8,22	10,7	16,8	28,7	50,4	2,9	3,4	6,1	12,5	36,4	51

În tabelul 3.3 și 3.4 mărimile au următoarea semnificație:

$\Delta I \%$ este eroarea modulului curentului exprimată în %; $\Delta\varphi'$ - este eroarea de unghi exprimată în minute; Z_2 - modulul impedanței conectată în secundarul transformatorului de curent; Z_t - modulul impedanței rezultante a secundarului transformatorului de curent împreună cu impedanța de sarcină; $\cos\varphi$ - factorul de putere al sarcinii.

Tabelul 3.4. Erorile transformatorului de curent cu $I_{ns} = 1 A$.

	$Z_2=12\Omega; Z_t=14\Omega; \cos\varphi=0,8$						$Z_2=1\Omega; Z_t=2,92\Omega; \cos\varphi=0,8$					
I/I_n	1,2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	1,2	1	0,5	0,2	0,1	0,05
$\Delta I \%$	0,22	0,22	0,29	0,5	0,9	1,8	0,11	0,1	0,17	0,32	0,5	1,2
$\Delta\varphi'$	4,5	4,5	6,5	14,3	25	58	3	3	5,1	12,5	20	35

Transformatorul de tensiune are următoarele caracteristici:

125, 126 : Tensiunea din primar $300/\sqrt{3} V, 440/\sqrt{3} V, 660/\sqrt{3} V$; tensiunea din secundar $100V, 100/\sqrt{3}V, 100/3 V$; puterea nominală $S_n = 200 VA$; $S_{2max} = 400 VA$ (puterea maximă din secundar).

În tabelul 3.5 sînt prezentate erorile transformatorilor de tensiune. Semnificația mărimilor din acest tabel este: U_n - tensiunea nominală a transformatorilor; $\Delta U \%$ - eroarea de tensiune în modul exprimată în %; $\Delta\varphi'$ - eroarea de unghi exprimată în minute.

Tabelul 3.5. Erorile transformatorilor de tensiune

U/U_n	1,2	1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,001
$\Delta U\%$	0,2	0,15	0,1	-0,25	-0,3	-0,35	-3
$\Delta \varphi'$	10	5	-5	-10	-15	-30	-60

În secundarul transformatorului de tensiune sînt racordate voltmetre cu care se măsoară tensiunile de fază și care sînt montate în panoul de măsură. Transformatoarele de tensiune pot fi racordate înainte sau după transformatoarele de curent. Comutarea prizelor transformatoarelor de tensiune se face simultan cu comutarea prizelor transformatoarelor de forță. La pupitrul de comandă este semnalizată priza pe care se găsesc transformatoarele de tensiune.

Comutatorul static s-a realizat în cadrul contractului de cercetare științifică nr.294/14.12.1975 încheiat cu C.I.R.E. - SCP, București, Colectiv Deva [112].

La alegerea schemei comutatorului static s-a avut în vedere necesitatea acționării separate a celor trei faze, motiv pentru care s-a recurs la schema prezentată în fig.3.13 [88].

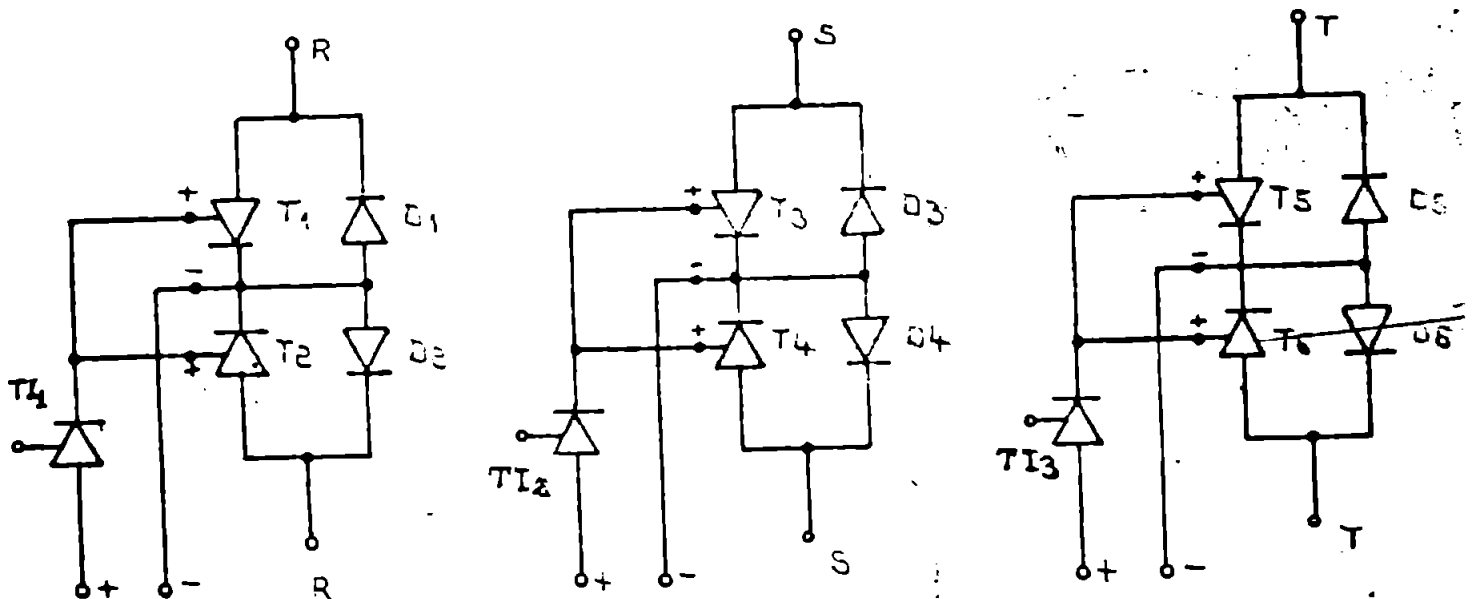


Fig.3.13. Schema comutatorului static

Pentru ca tiristoarele utilizate la realizarea comutatorului static să suporte condițiile în care sînt puse să funcționeze este necesar să se calculeze valoarea maximă a curentului ce poate apărea prin tiristoare precum și supratensiunile ce se pot aplica acestora. Deoarece curentul cel mai mare prin tiristoare este atunci cînd impedanțele octopolilor ce modelază linia sînt nule, circuitul sursei fiind de tip RL expresia curentului prin circuit este: [37].

$$i(t) = \frac{U_R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \left[\sin(\omega t - \varphi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \right]; \quad (3.24)$$

în care R și L sînt parametrii circuitului, iar tensiunea la bornele acestuia este $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha)$. Din această relație se observă că valoarea maximă a curentului se obține atunci cînd faza inițială a tensiunii este $\alpha = -\frac{\pi}{2} + \varphi$, $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$. Tiristoarele s-au ales astfel încît să suporte acest șoc de curent.

Din punct de vedere al supratensiunilor care pot să apară în nodul, acestea sînt numai interne și pot apărea la conectarea liniei în gol, respectiv la deconectarea sursei după ce s-a produs scurtcircuitul. Supratensiunile mari la comutatorul static apar doar în primul caz. Supratensiunea ce apare la conectarea în gol se poate calcula cu relația: [37].

$$u(t) = \frac{U_R}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cdot \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - e^{-\frac{R}{2L}t} \frac{\sin(\frac{1}{LC}t + \alpha) \sin(\alpha - \varphi)}{\sin \alpha} \right. \\ \left. + \frac{\sin(\sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2} \cdot t) \cdot \cos(\alpha - \varphi)}{\sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}} \right]; \quad (3.25)$$

în care $\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$; R, L, C sînt parametrii circuitului iar α este faza inițială a tensiunii.

Calculîndu-se această tensiune în condițiile cele mai defavorabile s-a obținut valoarea de 1531 V, valoare care este mai mică decît tensiunea inversă admisă de tiristoare și diodă. De altfel, prin schema aleasă pentru comutatorul static se scurtcircuitează supratensiunile de polaritate inversă prin diodele montate în paralel pe tiristoare (fig.3.13). La alegerea tiristoarelor este necesară determinarea vitezei de creștere a tensiunii și a curentului. Depășirea vitezei de creștere a tensiunii nu conduce la distrugerea tiristorului și la intrarea acestuia în conducție necontrolată, ceea ce pentru cazul nostru înseamnă un scurtcircuit necontrolat. Deoarece circuitul în care este introdus comutatorul static este puternic inductiv, viteza de creștere a curentului este scăzută, fiind mai mică decît cea admisă pentru tiristoarele utilizate la realizarea comutatorului static.

Pentru realizarea comutatorului static s-au ales tiristoare tip T400 care au următoarele caracteristici: $I_m = 400$ A, $U_m = 1600$ V, $du/dt = 1000$ V/ μ s; $di/dt = 50$ A/ μ s, curentul de vîrf repetitiv 200 A, curentul de supraîncălzire accidentală în stare de conducție 400 A admisibil 10 ms. Valoarea maximă a curentului de scurtcircuit în nodul este de 650 A. Impunînd condiția ca să nu se depășească $\int i^2 dt$ a tiristorului

rezultă timpul de deconectare a modelului la un scurtcircuit de aproximativ 200 ms, timp care se asigură prin protecțiile cu care este dotat modelul de rețea.

Dispozitivul de comandă al comutatorului asigură aplicarea unui semnal treaptă la cele șase tiristoare ale comutatorului la orice fază inițială a tensiunii. Faza inițială a tensiunii la care tiristorele intră în conducție este reglabilă pe intervalul $0 - 360^\circ$. Dispozitivul de comandă cuprinde două blocuri funcționale [112]: Blocul A produce o succesiune de impulsuri de comandă al căror defazaj față de tensiunea de pe o fază poate fi modificat după dorință; Blocul B produce un semnal treaptă de tensiune, având frontul decalat față de trecerea prin zero a tensiunii de fază luată ca referință cu același interval de timp cu care este decalat primul impuls pe care îl primește de la blocul A. Schema principială a blocului A este prezentată în fig.3.14.

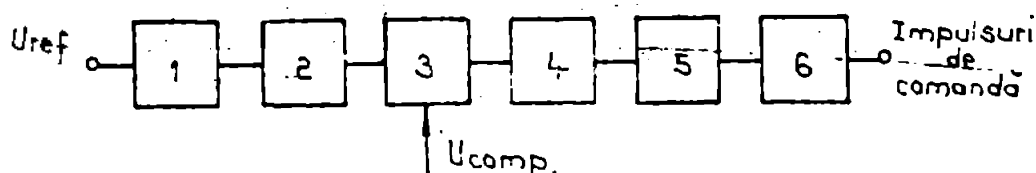


Fig.3.14. Schema principială a blocului A

La intrarea blocului 1 se aplică tensiunea de referință sinusoidală, obținându-se la ieșire o tensiune dreptunghiulară (blocul 1 este circuit formator). Integrându-se această tensiune în blocul 2 (blocul 2 este circuit integrator) la ieșirea acestuia se obține tensiunea liniar crescătoare cu perioada jumătate din perioada tensiunii de referință sinusoidală. În blocul comparator 3 această tensiune se compară cu tensiunea continuă U_{comp} reglabilă ca viteză la ieșirea acestuia rezultând impulsul dreptunghiular. În blocul 4 care este un circuit de derivare, impulsurile dreptunghiulare se derivatează obținându-se impulsuri de scurtă durată. Aceste impulsuri se aplică blocului selector 5, la ieșirea acestuia obținându-se numai impulsurile ce corespund semnaltemanței pozitive a tensiunii de referință. Aceste impulsuri sînt amplificate în blocul 6 care apoi se aplică blocului B. Schema de detaliu a blocului A este prezentată în fig.3.15. Cu acest bloc se poate regla unghiul de comandă al tiristoarelor între $15^\circ - 175^\circ$. Pentru a se asigura reglajul unghiului de comandă al tiristoarelor între $0 - 360^\circ$ se schimbă faza de referință în felul următor: $\alpha \in [30^\circ, 150^\circ]$ faza de referință este R, $\alpha \in [150^\circ, 270^\circ]$ faza de referință este S, $\alpha \in [270^\circ, 360^\circ]$ U $[0^\circ, 30^\circ]$ faza de referință este T.

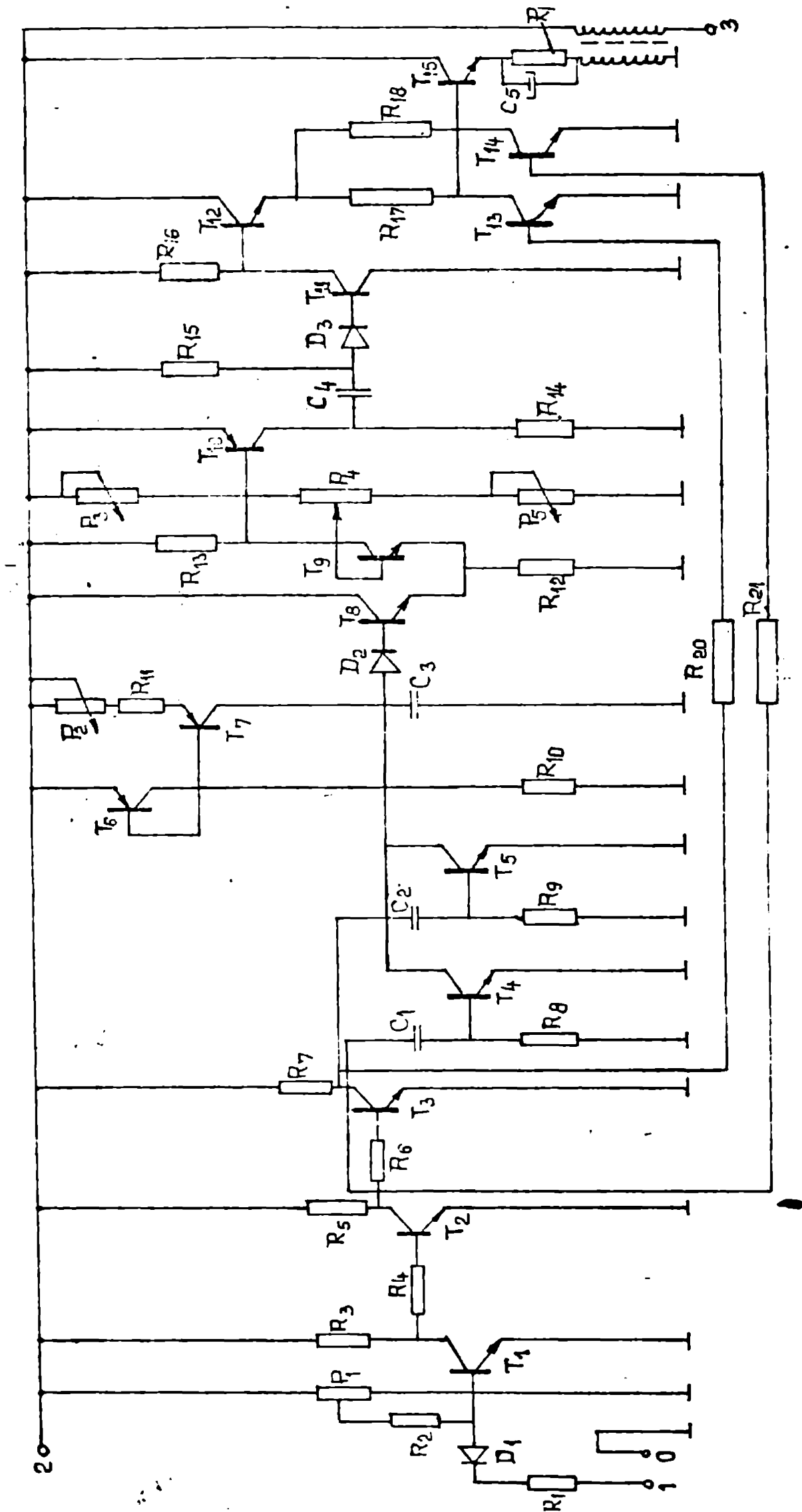


Fig. 1.15. Schema blocului funcțional A

Blocul B are rolul de-a realiza tensiunile treaptă necesară menținerii tiristoarelor în stare de conducție pe durata scurtcircuitului realizat. Schema acestui bloc este prezentată în fig.3.16

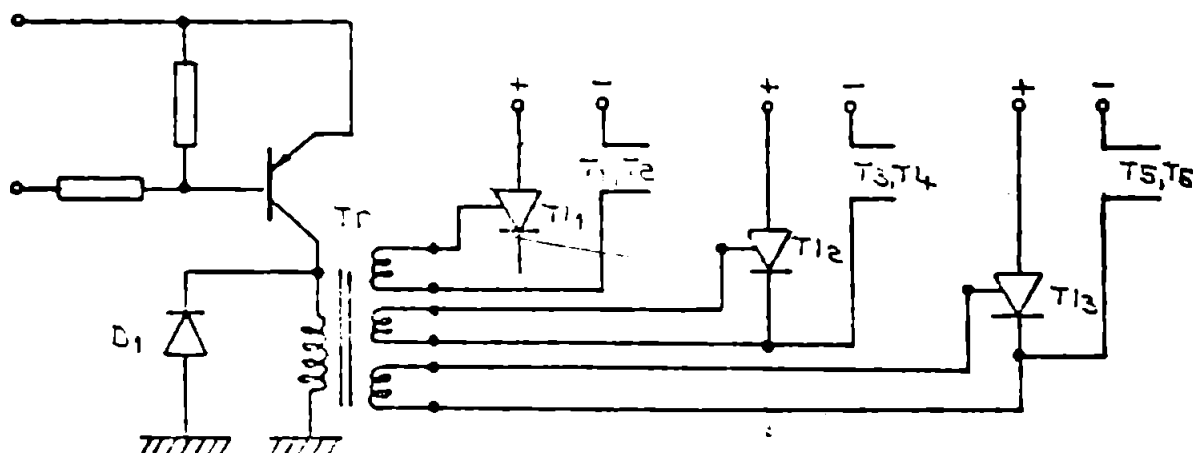


FIG.3.16. Schema blocului B

Impulsurile de comandă obținute la ieșirea blocului A se aplică la intrarea b, a blocului B obținându-se în secundarul transformatorului Tr (fig.3.16) impulsurile necesare amorțirii celor trei tiristoare T_1 , T_2 , T_3 . Aceste tiristoare odată amorțite rămân în stare de conducție pînă cînd dispare tensiunea continuă aplicată între anodul și catodul acestora. Tiristoarele T_1 , T_2 și T_3 intră în conducție de la aplicarea impulsului de comandă în 2-6 us, deci pentru frecvența de 50 Hz se poate considera ca amorțirea acestora este instantanee.

Prin vizualizarea simultană pe un osciloscop cu două spoturi a tensiunii de referință și a impulsurilor de comandă de la ieșirea blocului A se alege urghiul dorit pentru comanda tiristoarelor, modificîndu-se valoarea tensiunii de comparație (U_{comp}) prin intermediul potențiometrului P_4 din fig.3.15.

Comutatorul static realizat are următoarele caracteristici tehnice :

- tensiunea nominală a circuitului de forță $U_n = 3 \times 660 \text{ V}$; 50 Hz;
- tensiunea nominală de comandă $U_{no} = 5 \text{ V}$;
- curentul nominal al circuitului de forță $I_n = 400 \text{ A}$;
- curentul nominal al circuitului de comandă $I_{no} = 5 \text{ A}$;
- tensiunea nominală a sursei de alimentare a blocului de comandă $U_{nca} = 220 \text{ V}$; 50 Hz;
- tensiunea nominală de referință $U_{nrf} = 3 \times 220 \text{ V}$; 50 Hz;
- tensiunea nominală de ieșire a blocului de comandă $U_{ni} = 5 \text{ V}$, cu posibilități de extindere pînă la 1200 V;

- curentul nominal de ieşire a blocului de comandă $I_{ni}=5A$ cu posibilităţi de folosire până la 25 A;
- consumul blocului de comandă 5 VA
- variaţii de tensiuni admise: pentru U_{no} şi $U_{ni} \pm 0,2V$, pentru $U_{nea} \pm 10\%$, pentru $U_{nrf} \pm 5\%$;
- plaşa de reglaj al unghiului de comandă $0^\circ - 360^\circ$;
- curentul maxim prin circuitul de forţă timp de 0,4 sec., 100 A;
- căderea de tensiune pe tiristoare şi diode la curentul nominal maxim 4 V.



Fig.3.17. Modelul transformatorului 110kV/L.T.

$U_n = 3 \times 660V$, 50Hz, $I_{ni} = 16 A$,

$Z_n = (1,63 + j12,6)\Omega$, $Z_d = Z_1 =$

$= (4,2 + j864)\Omega$. Este prevăzută

cu posibilitatea modificării acestor parametri.

Impedanta de tratare a nulului este realizată dintr-o bobină cu reactanță variabilă între $10 - 50\Omega$, modificându-se miezul feromagnetic, pentru cazul în care rețeaua este cu nulul tratat prin bobină, respectiv cu rezistor cu rezistență variabilă între $8-14\Omega$ pentru cazul în care rețeaua este cu nulul tratat prin rezistor. Curentul nominal al bobinei și al rezistorului este 50 A.

Modelul liniei de medie tensiune este realizat cu ajutorul octopelilor de tip A cu ca schema prezentată în fig.3.19 respectiv a octopelilor de tip B cu ca schema prezentată în fig.3.20.

Modelul transformatorului 110kV/L.T.

se realizează prin transformatorul T_m , care este identic cu transformatorul T_1 și T_2 , și prin impedanțele variabile Z_m identice cu impedanțele Z_2 utilizate pentru modelarea sursei de putere finită. În fig.3.17 este prezentată o vedere a modelului acestui transformator.

Bobina de creare a nulului B_n are schema prezentată în fig.3.18 [69], [99] și are următoarele caracteristici:

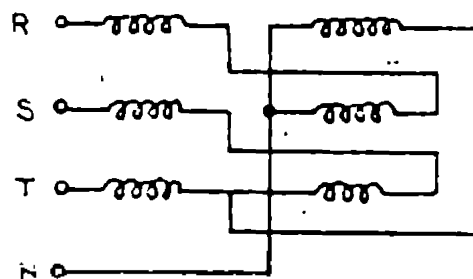


Fig.3.18. Schema bobinei de creare a nulului

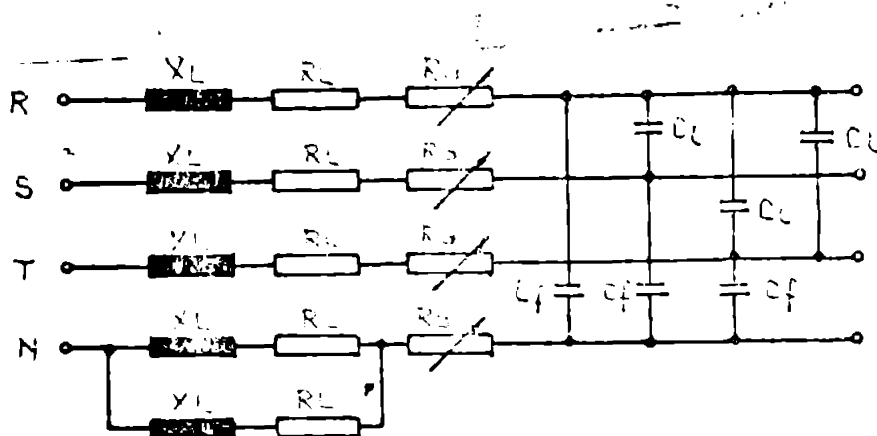


Fig.3.19. Octopol tip A

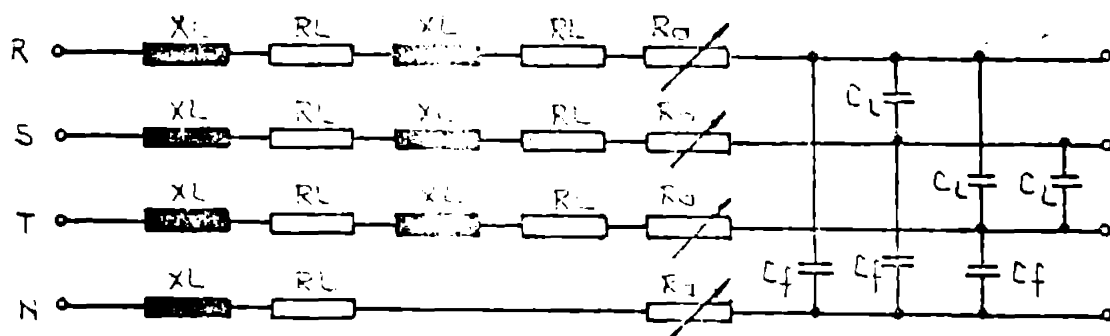


Fig.3.20. Octopol tip B

dintre acestea.

Octopolul tip A conține șase bobine sub formă de disc, câte două pe fiecare fază. Dimensiunile geometrice ale acestor bobine sînt prezentate în fig.3.21. Dimensiunile din fig.3.21 sînt date în mm. Pentru verificarea influenței dintre grupurile de bobine utilizate în realizarea octopolelor este necesar să se determine reactanța de cuplaj

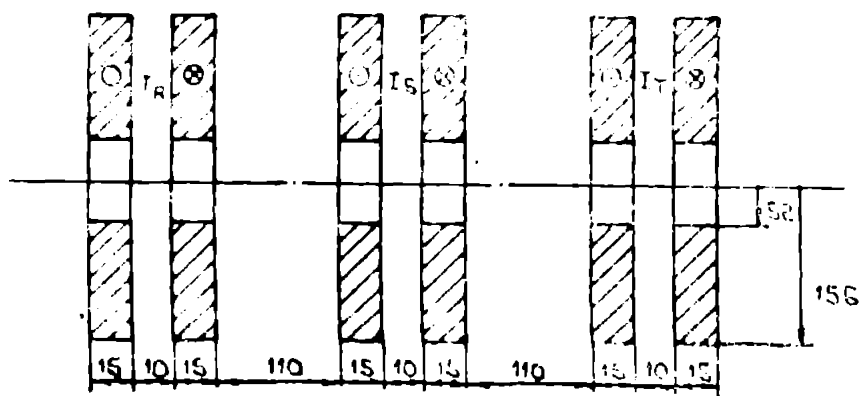


Fig.3.21. Dimensiunile bobinelor utilizate la realizarea octopolelor liniei de medie tensiune

În fig.3.22 este prezentată o vedere de ansamblu a bobinelor utilizate la realizarea modelului liniei de medie tensiune.

Modelul consumatorului se realizează printr-un motor asincron și impedanța variabilă Z_{cm} (fig.3.1) respectiv prin impedanța



Fig.3.22. Vedere de ansamblu a bobinelor modelului liniei de medie tensiune

Z_c (fig.3.1). Modelul este prevăzut cu patru motoare asincrone de următoarele tipuri: B3 - 71 x 0,25 , $P_n = 250$ W; B3 - 80 x 0,55 , $P_n = 550$ W; B3 - 100L x 3, $P_n = 3$ kW; B3 - 132M x 7,5, $P_n = 7,5$ kW. Prin impedanța variabilă Z_{cm} se realizează raportul X_c/R_c la consumatorul real și în model, același. Prin impedanța Z_c variabilă se modelează consumatorii statici alimentați prin linia de medie tensiune respectivă.

O vedere de ansamblu a modelului de medie tensiune este prezentată în fig.3.23.

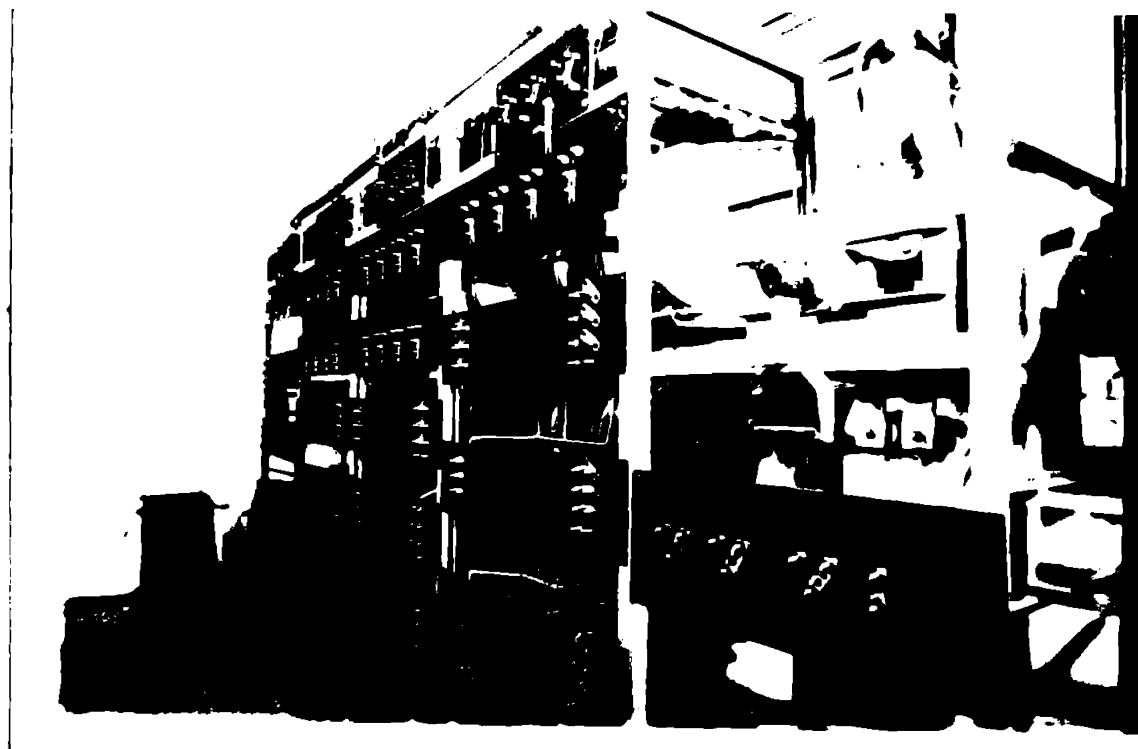


Fig.3.23. Vedere de ansamblu a modelului de medie tensiune

3.2.2. Calculul reacțanței mutuale dintre bobinole utilizate la realizarea modelului liniei de medie tensiune

Calculul reacțanței mutuale dintre bobinole utilizate la realizarea modelului liniei de medie tensiune presupune determinarea cîmpului magnetic într-un punct oarecare creat de aceste bobine. Pentru calculul cîmpului magnetic se folosește metoda integrării numerice a relației lui Biot-Savart-Laplace [76], [93], [133], admitîndu-se următoarele ipoteze simplificatoare: regimul se consideră staționar; se folosește o densitate echivalentă de curent obținută prin raportarea curentului total din suprafața transversală a bobinei la suprafața transversală a secției (densitatea se acceptă ca fiind constantă); mediul se consideră liniar (bobinele fiind în aer) și omogen.

Considerînd o distribuție în volum a curentului electric (fig. 3.24), în ipotezele menționate, inducția magnetică într-un punct oarecare P se determină cu relația cunoscută:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{r^3} dv \quad (3.26)$$

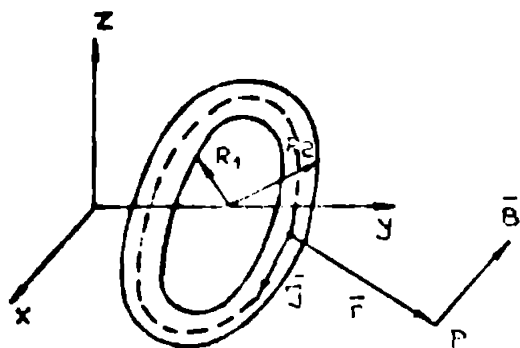


Fig.3.24. Explicativ privind calculul cîmpului magnetic

în care integrala se referă la întregul domeniu parcurs de curent. Metoda integrării numerice a relației lui Biot-Savart-Laplace constă în următoarele:

- se descompune bobina într-un număr finit de tuburi (\$N_g\$) de curent, cu suprafața transversală \$\Delta S\$ (fig.3.25), parcurse de curentul \$\Delta I = J \cdot \Delta S\$.
- B. Dacă \$N_g\$ este mare suprafața \$\Delta S\$ este mică astfel încît domeniul parcurs de curent

este echivalent cu \$N_g\$ spire filiforme parcurse de curentul \$\Delta I\$, care nu sînt spire reale ci doar spire de calcul;

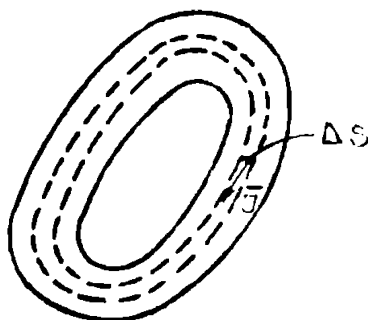


Fig.3.25. Descompunerea domeniului bobinei în tuburi de curent

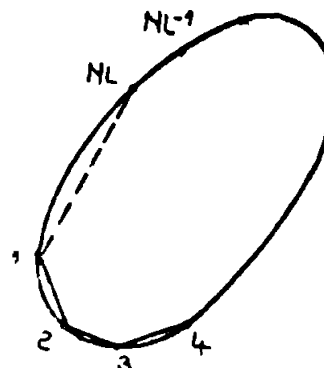


Fig.3.26. Aproximarea spirei de calcul printr-un contur poligonal

- fiecare spirală filiformă se aproximează printr-un contur poligonal cu \$N_1\$ laturi, astfel alese încît aproximarea să fie cît mai fidelă, ceea ce nu presupune neapărat \$N_1\$ mare [93] ci îndeosebi pozițiile vîrfurilor conturului poligonal să fie alese convenabil;
- se însumează în fiecare punct contribuția tuturor celor \$N_1\$ laturi ale celor \$N_g\$ fire filiforme de calcul.

Inducția magnetică într-un punct \$P(x,y,z)\$ determinată de o latură a conturului poligonal este:

$$\Delta \vec{B} = \mu_0 \frac{\Delta I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_{1+1}) \cdot \vec{u} \quad (3.27)$$

unde mărimile sînt precizate în fig.3.27. Introducînd un factor ce ține seama de geometria sistemului \$G = (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_{1+1}) \frac{1}{r}\$ relația

(3.27) devine:

$$\vec{B} = 10^{-7} \cdot G \cdot \Delta I \cdot \vec{H} \quad (3.28)$$

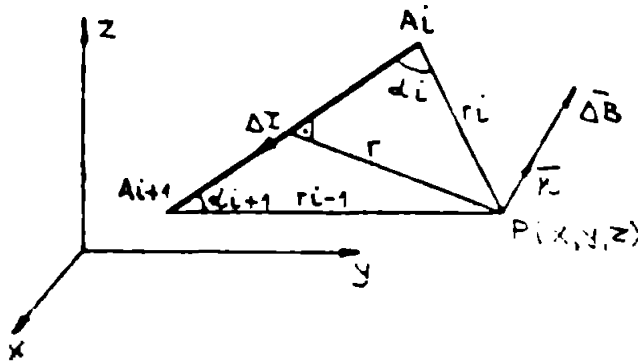


Fig. 3.27. Câmpul magnetic corespunzător unui segment de dreaptă

bobine fiind determinată numai de această componentă.

Pentru calculul înălțurii magnetice dintre cele două bobine, bobina a doua se împarte în suprafețe finite de suprafață ΔS sub formă de coroană circulară, în care se acceptă inducția magnetică (B_z) constantă și egală cu media valorilor acesteia pentru limitele coroanei (fig. 3.28).

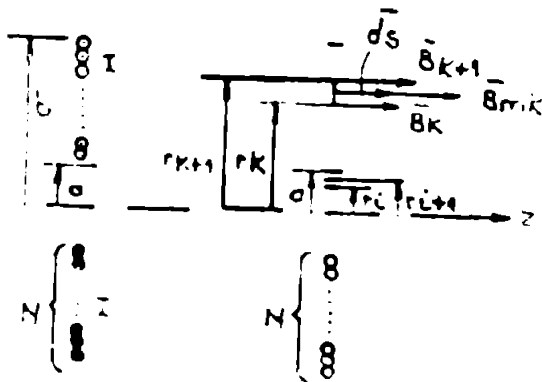


Fig. 3.28. Explicativă privind calculul înălțurii magnetice dintre bobine

spire echivalente prin secțiunea cărora se acceptă inducția constantă. Înălțuirea magnetică totală dintre cele două bobine devine:

$$\psi_t = \frac{\bar{I}}{2} \sum_{s=1}^{N_1} \sum_{k=2}^{N_2} (B_k + B_{k-1}) (r_k^2 - r_{k-1}^2) \quad (3.31)$$

unde n_1 (n_2 pentru $s=1$) este numărul de zone sub formă de vid în care s-a împărțit suprafața circulară de rază a (fig. 3.28) a fiind raza interioară a bobinei, N_2 = numărul de spire echivalente în care s-a împărțit bobina. Desigur aplicarea relației (3.31) pentru calculul

Câmpul magnetic resultant devine:

$$\vec{H} = \sum_1^N \sum_1^N \Delta \vec{H} \quad (3.29)$$

însumarea făcându-se pe componente

Pentru ca însumarea pe componente să se facă algebric se folosește sistemul cartezian de coordonate. Considerând axa celor două bobine fig. 3.21 ca fiind axa Z în calculul inducției magnetice intervine doar componenta după axa Z deci se va determina numai componenta B_z . Înălțuirea dintre cele două

Fluxul magnetic pentru o astfel de coroană infinitesimală se exprimă prin relația:

$$\Delta \phi_s = \int_{\Delta S} B_{zn} \cdot ds = (B_k + B_{k-1}) \cdot \frac{r_k^2 - r_{k-1}^2}{2}$$

Suprafața ΔS poate fi considerată chiar o spirală dacă pe secțiunea acestuia se poate accepta inducția constantă. Aceasta desigur depinde de grosimea spirăi. În general bobina se împarte în N_2

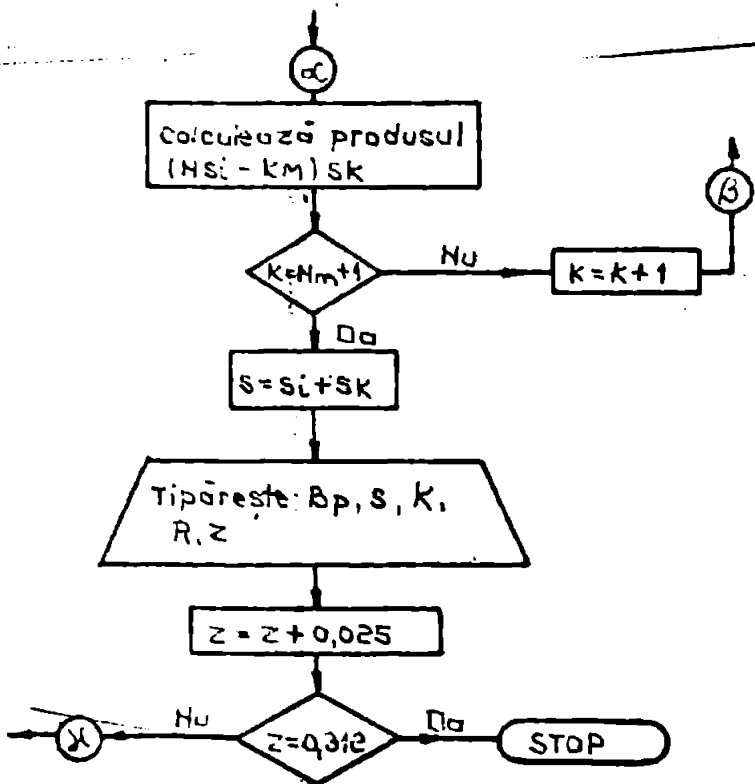
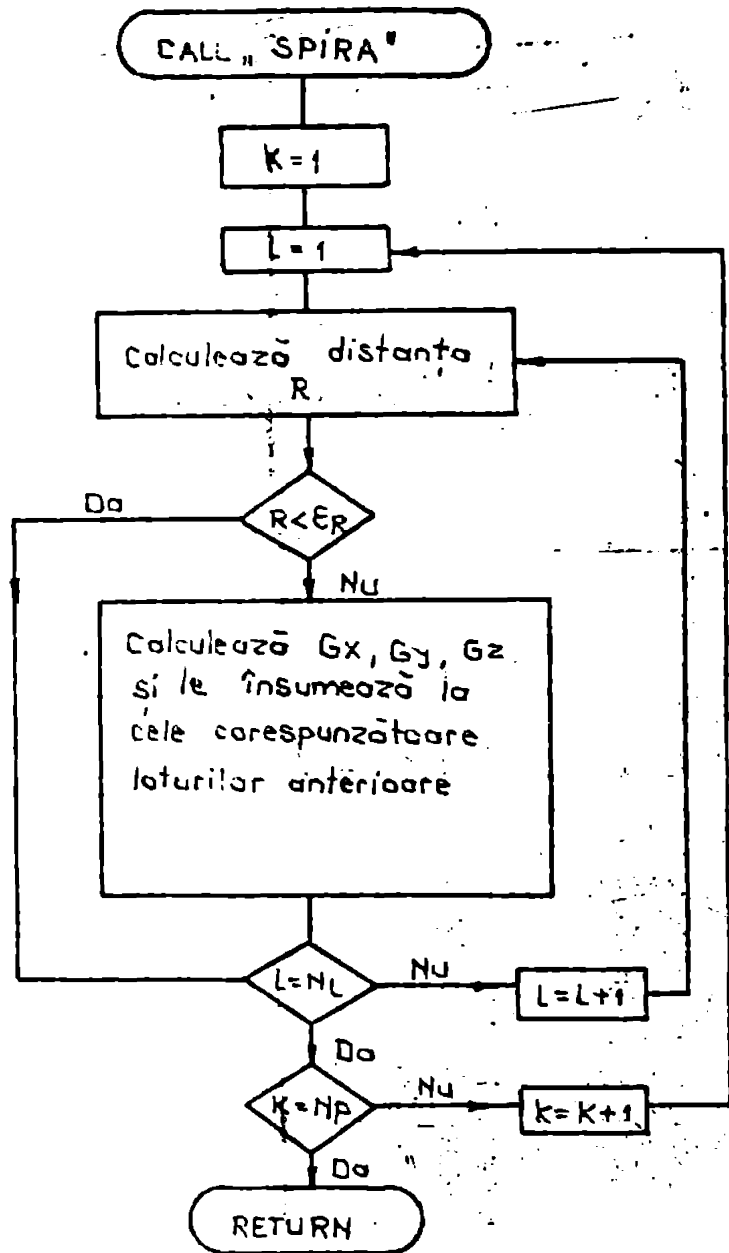
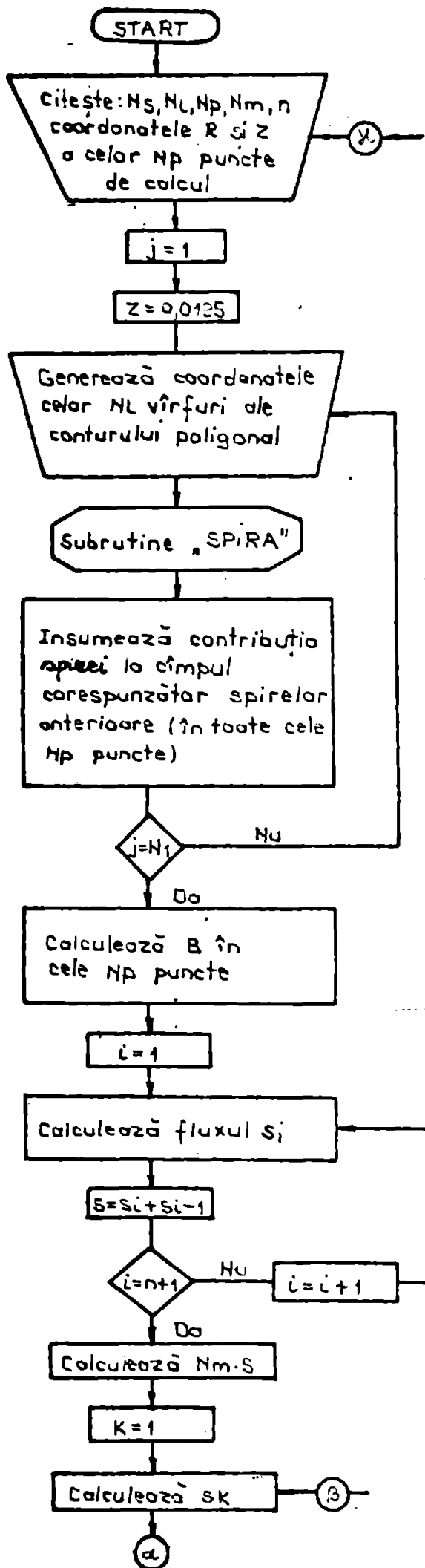


Fig.3.29. Ordinograma de calcul a înălțurii magnetice dintre bobine

înlănțuirii magnetice este avantajoasă numai dacă se utilizează calculatorul electronic. În acest scop s-a conceput un program de calcul, a cărui ordinogramă de principiu este prezentată în fig.3.29.

Pentru calculul efectiv al inductivității mutuale dintre perechile de bobine utilizate la modelizarea liniei de medie tensiune și a inductivității proprii echivalente perechii de bobine (fig.3.21) bobinele reale s-au înlocuit cu bobine fictive plate (fără grosime) plasate în mijlocul bobinelor reale. Aceasta micșorează timpul necesar pentru calcul și eroarea care se face este neglijabilă datorită simetriei sistemului [93]. De asemenea s-a calculat înlănțuirea magnetică prin suprafața unei singure bobine pentru determinarea reactanței echivalente celor două bobine utilizate pentru modelizarea unei faze deoarece datorită simetriei reactanța echivalentă celor două bobine este dublul celei corespunzătoare înlănțuirii magnetice determinată prin suprafața unei singure bobine fictive. S-a determinat reactanța de cuplaj dintre cele două bobine ce modelizează o fază și o bobină identică cu acestea, plasată coaxial cu ele și la diferite distanțe de acestea. În calcule s-au considerat următoarele elemente: numărul punctelor în care se calculează inducția - $N_p=40$; numărul vîrfurilor poligonului regulat ce substituie spira filiformă fictivă - $N_1=24$; numărul zonelor în care s-a împărțit cercul de rază a (raza interioară a bobinei) - $n_1=13$; numărul zonelor în care s-a divizat bobina fictivă prin care se calculează înlănțuirea magnetică $N_m=26$; lățimea unei zone este 4 mm; numărul spirelor fictive în care s-a divizat bobina reală ce produce cîmp magnetic $N_g=52$; valoarea curentului ce parcurge bobinele reale - 50A; densitatea curentului fictiv prin bobină considerînd bobina ca avînd o singură spirală și avînd în vedere că bobina reală are 26 de spire este $0,833A/mm^2$.

Cu aceste valori ținînd seama și de dimensiunile bobinelor prezentate în fig.3.21 pentru reactanța mutuală dintre bobinele ce modelizează o fază și o bobină ce modelizează altă fază plasată coaxial cu primele două (fig.3.21) s-au obținut valorile din fig.3.30. Dacă se are în vedere faptul că cele două bobine folosite pentru modelizarea unei faze sînt bobinate în sens invers reactanța de cuplaj dintre fazele modelului este diferența dintre reactanța mutuală a fiecărei bobine și bobinele ce modelizează o fază, care este foarte mică dacă distanța dintre acestea (a) depășește 8 cm. La distanța de 8 cm dintre bobinele ce modelizează două faze reactanța mutuală reprezintă 2% din reactanța echivalentă celor două bobine (fig.3.30). Deoarece bobinele ce modelează fazele rețelei de medie tensiune sînt amplasate conform figurii 3.21 se poate neglija reactanța mutuală dintre fazele modelului

verificările experimentale au confirmat rezultatele obținute prin calcul, deci ipotezele de calcul admise sînt acceptabile.

În aceleași condiții s-a determinat și reactanța mutuală dintre două bobine coaxiale utilizate la modelizarea liniei de medie tensiune, funcție de distanța (z) dintre ele. Rezultatele obținute sînt prezentate în fig.3.31. Considerîndu-se rezultatele obținute cu cele care ar rezulta folosind relațiile de calcul al acestor inductivități date în literatură [66] se constată diferențe sub 10%. Aceste bobine permit modelizarea liniei de medie tensiune reproducîndu-se și cuplajele dintre fazele liniei reale, putîndu-se reproduce chiar și nesimetriile din acest punct de vedere ale liniei reale. Utilizînd pentru modelizarea liniei reale cîte o astfel de bobină pe fiecare fază octopolii vor fi nesimetrice, bobinele fiind coaxiale. Pentru simetrizarea octopolilor se modelizează fiecare fază cu trei astfel de bobine și se transpun fazele. Distanța dintre aceste bobine se stabilește astfel încît să se obțină același raport între reactanța mutuală și cea proprie a fazelor modelului ca și pentru linia reală, folosindu-se de dependența acestei reactanțe funcție de distanța dintre bobine prezentată în fig.3.31. Acest mod de a modeliza linia de medie tensiune este avantajos în cazul în care prin model se reproduc defecte multiple.

Modelul permite modelizarea simultană a patru linii de medie tensiune. Fiecare linie putîndu-se modeliza prin cinci octopoli de tip A deci pentru fiecare linie modelizată se dispune de 30 bobine.

Elementele transversale ale rețelei de medie tensiune se modelează prin condensatoare alese corespunzător lungimii de linie modelizată prin cuadripol de tip A sau B. Cunoscuindu-se coeficienții de scară pentru curenți și tensiuni, deci și pentru puteri rezultă coeficienții de scară pentru rezistența, reactanța și capacități.

$$X_{fm} = X_f \cdot \frac{K_1}{K_u} ; \quad R_{fm} = R_f \cdot \frac{K_1}{K_u} ; \quad C_{fm} = C_f \cdot \frac{K_u}{K_1} ; \quad (3.39)$$

Cum în cazul nostru reactanța octopolilor ce modelizează linia are o valoare precizată din factorul de scară al reactanțelor rezultă reactanța liniei reale și deci se obține lungimea liniei modelizată de fiecare octopol. Avînd lungimea liniei ce se modelizează prin fiecare octopol se determină valoarea capacităților dintre faze și fază pămînt necesare în realizarea octopolilor pentru ca prin acapăt să se modelizeze lungimea respectivă de linie.

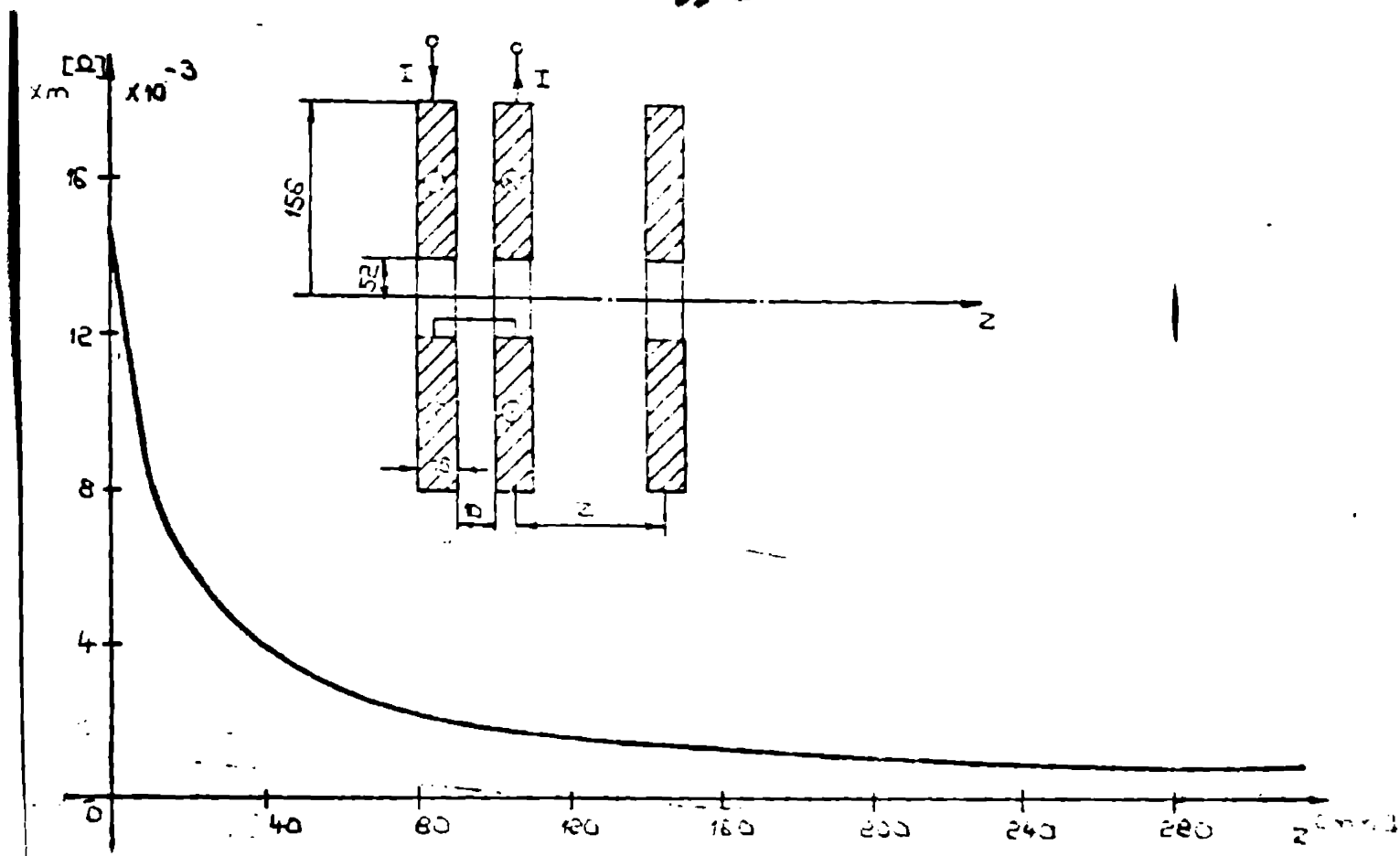


Fig. 3.30. Dependenta reactanței mutuale dintre bobinele folosite la modelarea unei faze și o bobină de uoelagi tip coaxială cu primele aflate la distanța z de primele

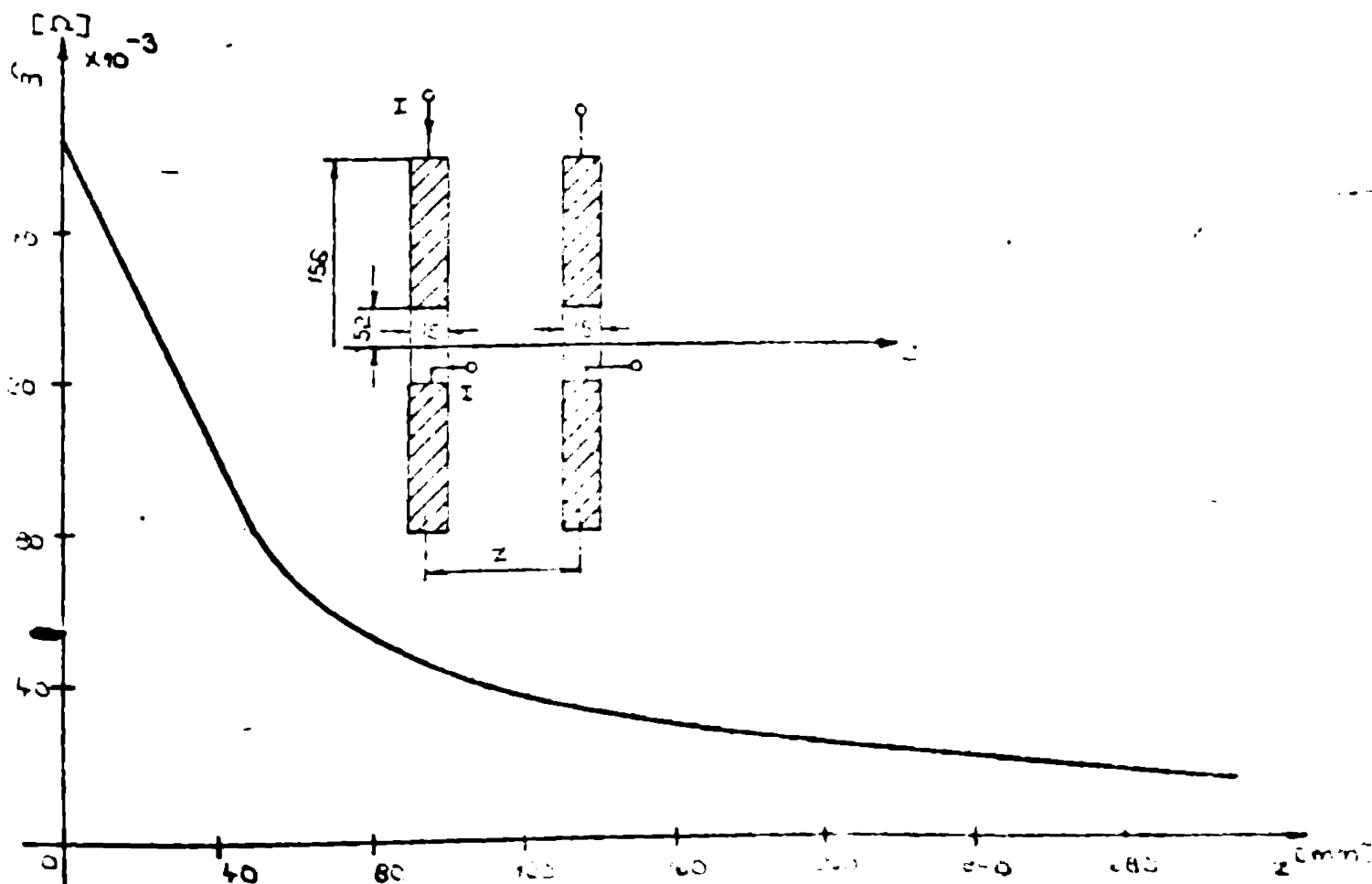


Fig. 3.31. Dependenta reactanței mutuale dintre două bobine coaxiale utilizate la modelarea liniei de medie tensiune.

Raportul X/R al bobinelor folosite la realizarea octopoli-
lor este 7,2, (din construcție) pentru ca acest raport să fie
identic cu al liniei reale este necesară introducerea rezisten-
țelor R_{m_1} și R_{m_2} în serie cu bobinele respective din model.

Pământul se modelizează prin bobine de același tip ca cele
folosite la modelizarea fazelor liniei de medie tensiune.

3.2.3. Determinări experimentale pe modelul de rețea

Cu ajutorul simulatorului de rețea s-au reprodus de-
fecte de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă
respectiv spre consumator în scopul analizei unor astfel de defec-
te. S-a modelizat rețeaua de medie tensiune în care au fost provo-
cate astfel de defecte în vederea efectuării unor măsurători în
rețeaua reală, și cauze s-a considerat cazul prezentat la subcapi-
tolul 4.1. Caracteristicile rețelei reale sînt următoarele [118]:

- transformatorul 110/20 kV : $S_n = 25$ MVA
- curentul capacitiv al întregii rețele de medie tensiune este
110 A;
- puterea consumatorului alimentat prin linia cu defect $S_0 = 1076$ KVA,
respectiv 816 KVA;
- lungimea liniei de medie tensiune pînă la locul de defect 4825m;
- lungimea totală a liniei pe care s-a provocat defectul 24125 m;
- curentul capacitiv al liniei pe care s-a provocat defectul 3A;

Cu ajutorul simulatorului de rețea s-a reprodus linia cu defect,
iar pentru celelalte linii de medie tensiune s-a luat în conside-
rare numai capacitatea față de pământ și s-a modelat concentrat pe
barele de medie tensiune ale simulatorului (fig.3.1).

Pentru stabilirea parametrilor modelului este necesară de-
terminarea factorilor de scară. Impunem condiția ca printr-un oc-
topol să modelăm linia de medie tensiune pînă la locul de defect,
ceea ce determină factorul de scară al impedanțelor.

Reactanța de secvență directă a conductorului de fază al li-
niei cu defect pînă la locul de defect avînd în vedere secțiunea
conductorului de fază 50 mm^2 și rezistivitatea solului $f = 100 \Omega \cdot \text{m}$
este $1,785 \Omega$ [10], [26], [27], [30], [33], [65], [86], [97], [141],
[142].

Reactanța de fază a octopolului modelului de tip B este
 $0,288 \Omega$.

Deci factorul de scară al impedanțelor este:

$$m_2 = m_R = m_X = \frac{X_{OF}}{X_M} = 6,2$$

Factorul de scară al tensiunilor alegând tensiunea modelului de 660V este:

$$m_U = \frac{U_{OF}}{U_M} = \frac{20.000}{380} = 52,63 ;$$

Factorul de scară al curenților este:

$$m_I = \frac{I_{OF}}{I_M} = \frac{m_U}{m_2} = 8,49$$

Factorul de scară al capacităților este:

$$m_C = \frac{C_{OF}}{C_M} = \frac{1}{m_2} = 0,16 ;$$

Reactanța capacitivă pe fază a întregii rețele de medie tensiune fără linia pe care s-a produs defectul este de $323,75 \Omega$ [118], [120], ceea ce corespunde unei capacități fază pământ de $9,83 \mu F$. Capacitatea prin care modelizăm reactanța capacitivă a rețelei de medie tensiune este de $61,44 \mu F$. Această capacitate se realizează, avînd în vedere faptul că s-a dispus de condensatori de $6,3 \mu F$, 400V, $4,2 \mu F$, 400 V și $3,7 \mu F$, 400 V, conectînd în paralel 9 condensatori de $6,3 \mu F$ și unul de $4,2 \mu F$. Capacitatea echivalentă diferă cu 0,88% față de cea necesară a se realiza în model.

Capacitatea conductor pământ a liniei până la locul de defect este $57 nF$. Avînd în vedere factorul de scară al capacităților, capacitatea de fază a unui octopol devine $0,356 \mu F$.

Considerînd reactanța de secvență monopolară a liniei de trei ori reactanța de secvență directă [10], [30], [31], [33], [00], [07], [97], [138] rezultă reactanța pe nul $2x_d/3$. Deci reactanța pe nul a octopolului țînd seona de factorul de scară al impedanțelor devine $0,192 \Omega$, care se realizează înscriind o bobină cu alte două legate în paralel astfel încît reactanța mutuală să fie negativă. Cele două bobine legate în paralel fiind situate la distanța de 3,5 cm (între planele lor medii) reactanța echivalentă este de $0,028 \Omega$ (fig.3.30). Cele două bobine legate în paralel nu se aşază coaxial cu prima pentru ca reactanța mutuală dintre ele să fie neglijabilă.

Resistența adițională pe fază a octopolilor este de $0,43 \Omega$, iar cea de pe nul este de $0,2 \Omega$.

Avînd în vedere factorul de scară al puterilor rezultă puterea consumatorului în modelul de rețea ca fiind 2408 VA. Acest consumator se reproduce utilizînd un motor de 3 kW (tip B3-100Lx3x1500A), încărcat

cu o sarcină de 2 kW. Determinându-se experimental parametrii acestui motor încărcat cu 2 kW s-a obținut $X=43,6 \Omega$ și $R=43,36 \Omega$ deci $\cos \varphi=0,705$. Având în vedere factorul de putere al consumatorului real de 0,92 este necesar montarea unor condensatoare la bornele motorului utilizat ca model de $52,3 \mu F$. Puterea de 0,408 kW se modelizează printr-un consumator static (Z_0 din fig.3.1) care are reactanța $139,5 \Omega$ și rezistența $327,4 \Omega$.

Transformatorul de 110/20 kV are rezistența de $0,1 \Omega$ și reactanța de $2,1 \Omega$. Ținând seama de factorul de scară al impedanțelor pentru model rezultă rezistența sursei de $0,0161 \Omega$ și o reactanță de $0,339 \Omega$. Parametrii transformatorului T_n din fig.3.1 sînt $R=0,014 \Omega$; $X=0,29 \Omega$. Pentru impedanța Z_{om} se introduc valorile $X=0,06 \Omega$ și $R=0,003 \Omega$. Deci reactanța totală a sursei modelizată este $0,35 \Omega$ și rezistența de $0,017 \Omega$, realizându-se un raport $X/R=20,5$ față de 21 al sursei reale.

Bobina de creere a nulului reală are următorii parametri $Z_{01}=(2,28+j8,3) \Omega$. Impedanța de secvență directă (inversă) fiind mult mai mare nu afectează rezultatele.

Ținând seama de factorul de scară al impedanțelor rezultă parametrii bobinei de creere a nulului din modelul de rețea $Z_{02}=(0,37+j1,34) \Omega$.

Bobina de tratare a nulului se reglează la valoarea de $17,4 \Omega$, pentru a se asigura regimul de funcționare la rezonanță respectiv $19,92 \Omega$ pentru regimul de supracompensare $14,5 \Omega$.

Dacă rețeaua ar fi cu nulul tratat prin rezistor la care curentul maxim de scurtcircuit monofazat este 300 A rezistența rezistorului de tratare al nulului este de $37,5 \Omega$, rezistența corespunzătoare în model este de 6Ω .

Rezultatele experimentale obținute pe modelul de rețea pentru un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator respectiv spre sursă sînt prezentate în tabelul 3.6. Din acest tabel se constată, că valorile tensiunii U_{hb} determinată cu ajutorul modelului de rețea respectiv prin calcul diferă cu cel mult $12,1\%$ pentru defectul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă, respectiv cu $11,1\%$ pentru defectul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator. Având în vedere precizia cu care se cunosc parametrii rețelei reale, aceste abateri sînt justificate.

Tabloul 3.6. Rezultate obținute pe model al prin calcul

Condițiile de defect în rețeaua reală	R_f [Ω]	Conductor căzut la pământ										Regimul de funcționare al rețelei		
		sursa sursei					sursa consumator							
		U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	U_{ph} [V]	ΣI [A]	U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	U_{ph} [V]	ΣI [A]			
$Z_{ed} = Z_{d1} = (0,1 + j2,1) \Omega$	10	99	98,6	6	99,5	99	0,5	64	75,6	46,4	33,2	35	5,1	supracompen- săți 14,2%
$Z_{ed} = Z_{d2} = (2,28 + j0,3) \Omega$	2000	68	87	32	56,2	52	8,1	65,2	74,1	52,3	24,1	26,2	8,9	
$Z_{ed} = Z_{d3} = (2,94 + j1,8) \Omega$	5000	61,4	63	52	15,2	13,8	19,1	66,1	68,2	54	14,1	15,6	9,6	
$Z_{ed} = Z_{d4} = (3,18 + j5,4) \Omega$	7000	65	62	51	14,8	13,2	12,1	67,2	63,3	56	13,2	14,1	6,4	
$R_f = 13692 \Omega$	10	99,2	98,5	4	99,8	100	0,2	55,6	81,3	45,3	41,2	45	8,4	rezonanță
$R_f = 6,5 \Omega$	2000	77,5	91,3	23,2	68	72	5,5	69,1	76,2	48,3	32,1	35,2	8,8	
$U_0 = 1076 \text{ kVA}$	5000	62,3	68,7	46,2	24,3	27,1	10,3	65,4	71,2	50,1	20,1	22,6	11,1	
	7000	60,5	69,4	49	21,2	23,5	9,8	62,3	67	51	17,3	18,2	4,9	

Obs.: Valorile din tabel au unitățile semnificate: Z_{ed} , Z_{d1} , Z_{d2} , Z_{d3} , Z_{d4} - impedanțele de scurtcircuit ale sursei; Z_{d1} , Z_{d2} , Z_{d3} , Z_{d4} - impedanțele de scurtcircuit ale liniei până la locul de defect; U_{ph} - reactanța capacitivă în spațiile defectului; R_f - rezistența prizor de pământ al st. Ipului la care are loc defectul; S_0 - puterea consumatorului alimentat prin linia cu defect; U_A , U_B , U_C - tensiunile de fază din barele de medie tensiune ale stației de transformare (în secunđarul transformatorilor de tensiune); U_{ph} - tensiunea homopolară pe barele de medie tensiune ale stației de transformare (în secunđarul filtrului homopolară); R_f - rezistența de trecere la locul de defect.

Cu ajutorul modelului de rețea s-a reprodus rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor prezentată în subcapitolul 4.3. (fig.4.3) în care s-au provocat defecte de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă, respectiv spre consumator. Rezultatele experimentale obținute în acest caz sînt prezentate în tabelul 3.7.

Tabelul 3.7. Rezultate obținute pe model și prin calcul

Nr. crt.	S_c [kVA]	X_l [Ω]	R_f [Ω]	Conductor căzut la pământ					
				spre sursă			spre consumator		
				I_n [A]			I_n [A]		
				model	calc.	ε%	model	calc.	ε%
1	63	4950	2.6	284	292.1	2.7	1.62	1.71	5.3
2	63	19.560	100	117.3	121.4	3.4	1.31	1.38	5.1
3	63	19.560	1000	11.63	12.15	4.3	1.02	1.12	9.3
4	63	19.560	5000	2.15	2.26	4.9	0.84	0.92	8.7
5	63	75.423	10000	0.91	1.03	11.6	0.36	0.395	8.9
6	63	19.560	10000	0.915	1.02	10.3	0.75	0.78	3.8
7	563	19.560	5000	2.13	2.26	5.7	1.31	1.34	2.2
8	563	75423	10000	0.905	0.94	3.7	0.51	0.53	3.8
9	563	19560	10000	0.91	0.96	5.2	0.95	0.98	3.1

Din tabelul 3.7 se constată că valoarea curentului I_n determinată din modelul de rețea și prin calcul analitic diferă cu cel mult 11,6% pentru un defect conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă, respectiv cu cel mult 9,3% pentru un defect conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator. Aceste erori sînt acceptabile din punct de vedere tehnic, fiind justificate de aproximările făcute în calcule precum și în realizarea modelului.

4. DETERMINARI EXPERIMENTALE IN REȚEAUA REALA DE MEDIE TENSIUNE

În vederea verificării rezultatelor obținute s-au efectuat măsurători și în rețeaua reală de medie tensiune, provocându-se defecte de simplă punere la pământ, conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă respectiv spre consumator. Aceste tipuri de defecte s-au provocat în rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin bobine de stingere sau prin rezistor. Rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere funcționează la rezonanță sau supracompensat. Pentru a putea constata influența diverșilor parametri experimentările s-au efectuat în diverse condiții de climă (iarnă, vară, toamnă) și la diverse valori ale acestor parametri. Valori diferite pentru rezistența de trecere la locul de defect s-au obținut considerând conductorul căzut la pământ pe sol umed 2-3 m ($R_f < 300 \Omega$), pe nisip introducând conductorul de fază 20-30 cm într-o ladă metalică cu nisip ($R_f \approx 8000 \Omega$), pe zăpadă înghețată pe o lungime de 2-3 m ($R_f < 8000 \Omega$) sau legat galvanic la priza stîlpului ($R_f < 50 \Omega$). De asemenea pentru a constata influența consumatorilor asupra tensiunii homopolare de pe barele de medie tensiune ale stației de transformare, respectiv asupra curentului ce se închide prin elementul de tratare a nulului (bobină sau rezistor) s-au realizat aceste tipuri de defecte la diverse valori ale sarcinii pe linia cu defect. Prin modificarea locului în care s-a provocat defectul s-a modificat și capacitatea liniei în spatele defectului. Au fost efectuate astfel de defecte în mai multe situații dar în continuare se prezintă rezultatele obținute pentru defectele provocate pe linii de medie tensiune alimentate din următoarele stații de transformare: stația de transformare 110/20 kV Orăștie; stația de transformare 110/20/6 kV Bărbant - Alba Iulia; stația de transformare 110/20 kV Sineria.

4.1. Rezultatele măsurătorilor efectuate în stația 110/20 kV Orăștie

Rețeaua de medie tensiune este cu nulul tratat prin bobină de stingere. Curentul capacitiv al întregii rețele de medie tensiune este 110 A (s-a determinat experimental). Compensarea acestui curent se realizează cu două bobine de stingere care au $I_{nom} = 100$ A. Defectul s-a provocat pe linia Căstăn care are curentul capacitiv 3 A, la distanța de 4825 m (stîlpul nr.67) de la barele de medie tensiune ale stației de transformare. În fig.4.1 este prezentată schema monofilară

15

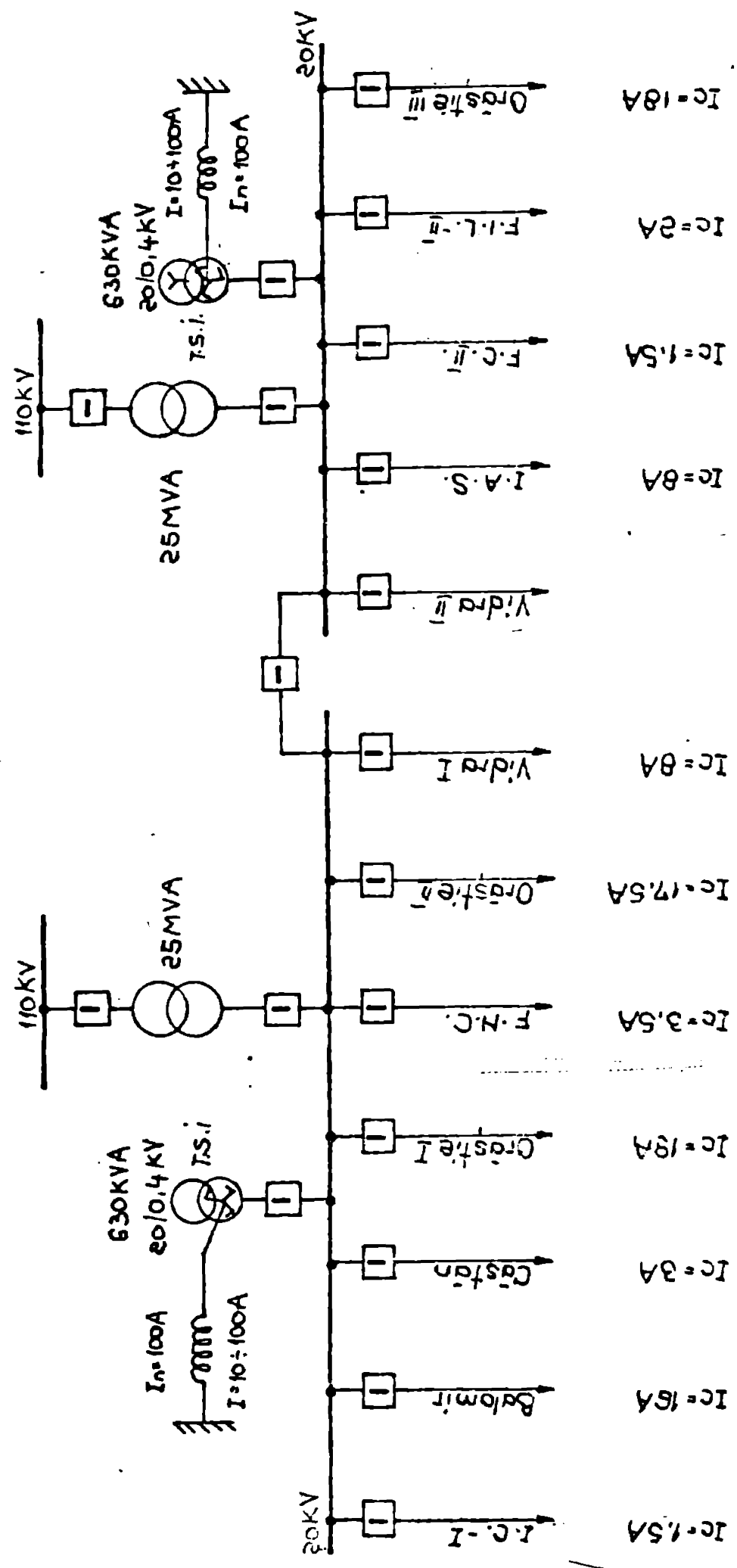


FIG. 4.1. SCHEMA MONOFILARĂ A STAȚIEI 110/20 KV ORĂȘTIE

Taboul nr.4.1. Siplă punere la pământ

Condițiile în care are loc defectul	U_R [V]	U_S [V]	U_T [V]	U_{hb} [V]		Regimul de funcționare al rețelei	Obs.
				med.	calc. %		
$Z_{ed} = (0,1 + j2,1)\Omega$ $Z_{rs} = (2,28 + j8,3)\Omega$ $Z_{ld} = (2,94 + j1,8)\Omega$ $Z_{lh} = (3,18 + j5,4)\Omega$ $X_C^0 = 13692\Omega$ $R_p = 6,5\Omega$	105	103	0	106	100	rezonanță	a funcționat rețeaua RPP
	104	102	0	103	100	supracom-pensat 14,5%	" - "
$R_p = 1350$	77,5	91,7	27,2	70	65	" - "	nu a funcționat rețeaua RPP
$S_0 = 816$ KVA	100	97,2	0	102,6	100	" - "	a funcționat rețeaua RPP.

Obs.: Mărimile din tabel au următoarea semnificație: Z_{ed} , Z_{rs} , Z_{ld} , Z_{lh} sunt impedanțele de serie ale sursei și ale liniei până la locul de defect; X_C^0 este reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului; R_p este rezistența prizei de pământ a stîlpului la care s-a provocat defectul; S_0 este puterea aparentă a transformatorilor alimentați prin linia cu defect; U_R , U_S , U_T - sînt tensiunile de fază pe barele de medie tensiune ale stației de transformare (în secundaarul transformatorului de tensiune); U_{hb} este tensiunea homopolară de pe barele de medie tensiune ale stației de transformare în secundaarul filtrului homopolar de tensiune; R_f este rezistența de trecere la locul de defect.

Tabelul nr.4.2. Conductor întrerupt și cîșut la pîmînt spre surse

Condițiile în care are loc defectul	U_R [V]	U_Y [V]	U_T [V]	U_{ab} [V]		Rețeaua de funcționare al rețelei	Obs.
				med.	calc.		
$Z_{ed} = Z_{ef} = (0,1 + j2,1) \Omega$ $Z_{nrs} = (2,28 + j8,3) \Omega$	64,9	60,1	50	14	13,2	supracompensați 14,5%	nu a funcționat rețeaua RPP
	60,5	69,4	49	20,6	23,5	rezonanță	" "
$Z_{ed} = Z_{ef} = (2,94 + j1,8) \Omega$ $Z_{nrs} = (3,18 + j5,4) \Omega$	99	101,6	6	101,2	99	supracompensați 14,5%	a funcționat rețeaua RPP
$X_C = 13692 \Omega$ $R_p = 6,5 \Omega$ $S_0 = 1076 \text{ KVA}$	62,3	68,9	46,6	24	27,1	rezonanță	nu a funcționat rețeaua RPP.
" "	65,2	62	51	14,7	13,8	supracompensați 14,5%	" "

Obs. Valorile din tabelul 4.2 au aceeași semnificație ca și în tabelul 4.1.

Tabelul nr.4.3. Conductorul intrerupt ed cizut la piment spre consumator

Condițiile în care are loc defectul	$U_R [V]$	$U_{S_1} [V]$	$U_T [V]$	$U_{hh} [V]$		Obs.		
				calc.	Σ%			
$S_0 = 1076 \text{ kVA}$ $Z_{ed} = (0,1 + j2,1) \Omega$ $Z_{gr} = (2,28 + j8,3) \Omega$ $Z_{ld} = (2,94 + j1,8) \Omega$ $Z_{ab} = (3,18 + j5,4) \Omega$ $X_0 = 13692 \Omega$ $R_p = 6,5 \Omega$	55,2	79,4	46	40,8	45	10,3 rezonanță	nu a funcționat rețeaua RPP.	
	64	77	46,2	34,7	35	0,8	supraom-pensată 1,5%	" "
	67,1	63,3	56	15,5	14,1	9	" "	" "
	67,3	74,2	54,5	23,8	23,4	1,7	supraom-pensată 1,5%	" "
$S_0 = 816 \text{ kVA}$	59	65,5	50	14,5	13,8	4,8	supraom-pensată 1,5%	" "
	58,0	69,4	46,3	21,6	20,8	3,7	" "	" "

Obs.: Mărimile din tabelul 4.3 au aceeași semnificație ca în tabelul 4.1

a stației de transformare din care este alimentată linia cu defect. În tabelul nr.4.1 se prezintă valorile tensiunilor de fază și a tensiunii homopolare (U_{hb}) obținute la o simplă punere la pământ pentru diverse valori ale rezistenței de trecere la locul de defect, diverse regimuri de funcționare ale rețelei și diverse valori ale puterii consumatorilor alimentați prin linia cu defect. Din tabelul 4.1 se constată că deși valoarea tensiunii homopolare are valori ridicate totuși releul RPP nu sesizează un astfel de defect dacă rezistența de trecere la locul de defect este mare.

În tabelul 4.2. se prezintă valorile obținute pentru tensiunile de fază și tensiunea homopolară a barelor de medie tensiune din stația de transformare în cazul unui defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă. Din acest tabel se constată că releul RPP sesizează acest defect numai dacă conductorul este căzut la pământ pe sol umed, deci rezistența de trecere la locul de defect nu atinge valori prea ridicate ($R_f < 300 \Omega$). Dacă conductorul este căzut la pământ pe un strat de zăpadă rezistența de trecere la locul de defect crește iar valoarea tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune ale stației de transformare scade.

În tabelul 4.3. sînt prezentate rezultatele măsurătorilor obținute în cazul unui defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator. Se constată în acest caz că valoarea tensiunii homopolare este mai scăzută decît pentru defectele anterioare și în nici unul din cazuri releul RPP nu a sesizat acest defect.

În tabelele 4.1, 4.2, 4.3 s-au prezentat și valorile tensiunii U_{hb} obținute prin calcul. Se constată că valorile obținute prin calcul față de cele determinate experimental nu diferă cu mai mult de 1%. Această abatere este acceptabilă deoarece parametrii utilizați în calculul tensiunii U_{hb} nu se cunosc cu o precizie mai mare.

Rețeaua prezentată în fig.4.1 s-a modelizat (paragraful 3.2.2) rezultatele obținute pe nodal sînt prezentate în tabelul 3.6. Comparînd aceste rezultate cu cele din tabelele 4.2 și 4.3 se constată o diferență mai mică între valorile tensiunii U_{hb} determinate în rețeaua reală și cele determinate cu ajutorul modelului de rețea, aceste diferențe fiind sub 1%. Eroarea mai mică obținută prin modelizare se poate datora faptului că în model liniile s-au reprodus prin octopoli (o linie s-a reprodus prin mai mulți octopoli) pe cînd în calculul analitic liniile electrice s-au

considerat cu parametri concentrați (scheme în Γ). Desigur rezultatele obținute în model și în rețeaua reală sînt afectate și de clasa de precizie a instrumentelor utilizate la măsurători. În urma rezultatelor obținute se poate aprecia că modelul realizat reproduce rețeaua reală cu precizia necesară din punct de vedere tehnic, pentru studiul acestor tipuri de defect.

4.2. Rezultatele măsurătorilor efectuate în stația de transformare 110/20/6 kV Bărbant

Rețeaua de medie tensiune este cu nulul tratat prin bobini de stingere. Schema principială a stației de transformare este prezentată în fig.4.2. Defectele s-au provocat pe linia 20 kV Dren-Talna la o distanță de 1520 m (stîlpul nr.19 al liniei). Cele trei bobine de stingere au curentul nominal 100 A. Rezultatele măsurătorilor obținute pentru cele trei tipuri de defecte sînt prezentate în tabelele 4.4, 4.5 și 4.6.

Din tabelele 4.4, 4.5 și 4.6 se constată că în majoritatea cazurilor releul RPP nu sesizează aceste tipuri de defecte. Se constată de asemenea că valoarea tensiunii homopolare pe barele de medie tensiune ale stației de transformare la o simplă punere la pămînt și la un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pămînt spre sursă este influențată în primul rînd de valoarea rezistenței de trecere la locul de defect. Regimul în care funcționează rețeaua (rezonanță sau supra-compensată) influențează de asemenea valoarea tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune ale stației de transformare, mai pronunțat pentru un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pămînt spre consumator. Valorile cele mai ridicate ale tensiunii U_{hb} se obțin în cazul în care rețeaua funcționează în regim de rezonanță. În cazul în care conductorul întrerupt a căzut la pămînt spre consumator o influență mare asupra tensiunii homopolare U_{hb} o are și puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect. Acest parametru este cu atît mai important cu cît rețeaua funcționează într-un regim mai îndepărtat de cel de rezonanță.

Din tabelele 4.3 - 4.6 se constată că valorile tensiunii U_{hb} determinate experimental și prin calcul nu diferă cu mai mult de 13% ceea ce este acceptabil dacă se are în vedere precizia cu care pot fi apreciați parametri rețelei.

Experimentările efectuate în cele două stații de transformare în diverse condiții sînt clar în evidență faptul că releul RPP destinat pentru a sesiza punerile la pămînt într-o rețea de medie tensiune cu nulul compensat, nu face acest lucru decât în anumite cazuri favorabile. Dacă se are în vedere faptul că într-o astfel de rețea prizele stîlpilor

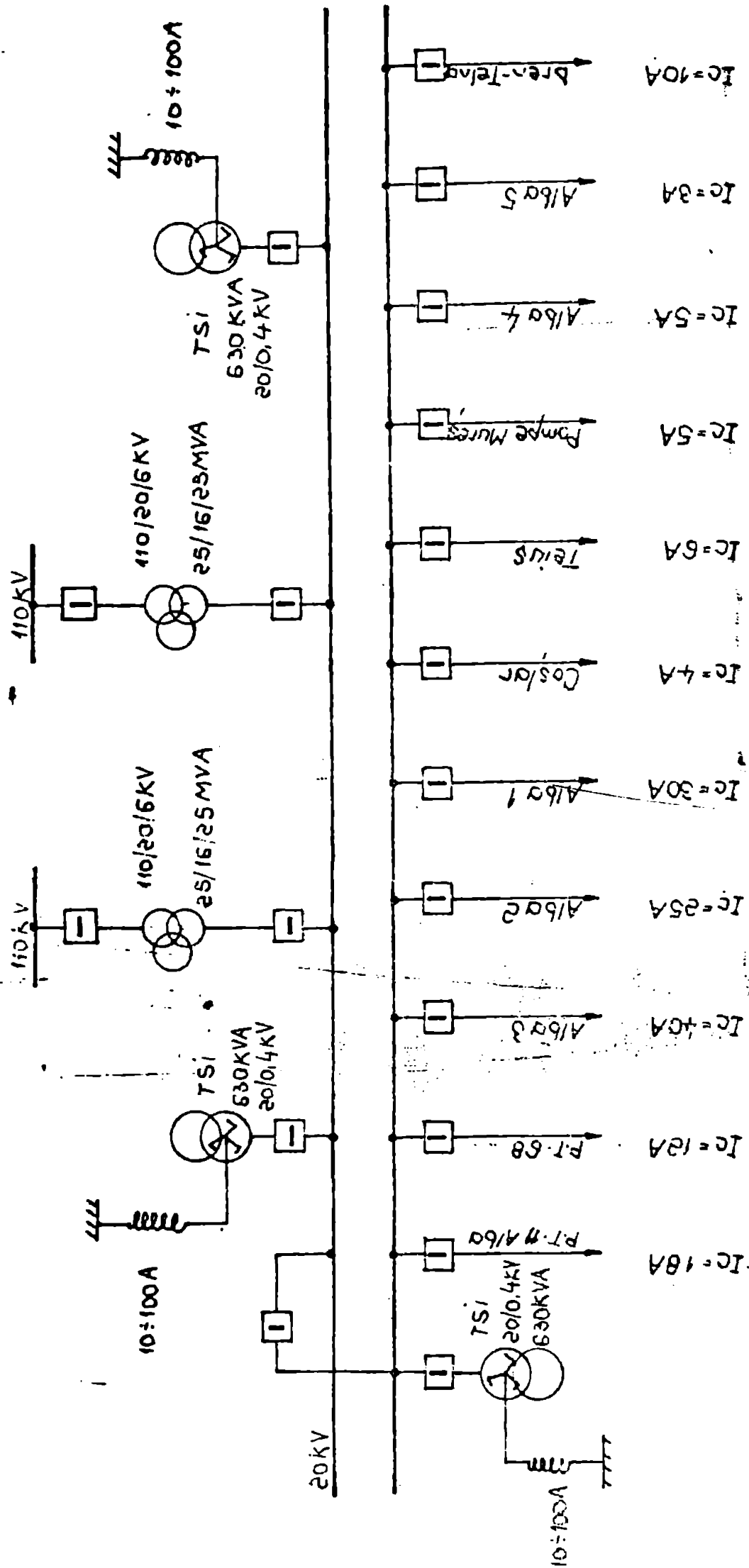


FIG. 4.2. SCHEMA MONOFILARĂ A STAȚIEI 110/20/6KV BĂRBANȚ

Tabelul nr.4.4. Simpla punere la pământ

Condițiile în care are loc defectul	U_R [V]	U_S [V]	U_T [V]	U_{bb} [V]		Obs.
				măș. calc.	măș.	
$Z_{ed} = Z_{ad} = (0,1+j2,1)\Omega$ $Z_{ad} = Z_{ld} = (1,1+j0,65)\Omega$ $Z_{TUT} = (2,78+j8,34)\Omega$ $Z_{lb} = (1,5+j1,6)\Omega$ $X_C = 6543\Omega$ $R_p = 2,4\Omega$	100	100	4	103	100	a funcționat releul RPP
Conducătorul legat galvanic la priza stîlpului ($R_f \approx 0$)	100	100	4	103	100	rezonanță
$S_G = 630$ KVA	14	90	96	85	86,2	nu a funcționat releul RPP
Conducător legat la priza stîlpului printr-o rezistență de 500 ($R_f = 500\Omega$)	33	97	70	73	78,1	supracompenență 13%
- " -	-	-	-	-	-	- " -

Tabelul nr.4.5. Conducător întrerupt și căzut la pământ spre surse

Condițiile în care are loc defectul	U_R [V]	U_S [V]	U_T [V]	U_{bb} [V]		Obs.
				măș. calc.	măș.	
$Z_{ed} = Z_{ad} = (0,1+j2,1)\Omega$ $Z_{ad} = Z_{ld} = (1,1+j0,65)\Omega$ $Z_{TUT} = (2,78+j8,34)\Omega$ $Z_{lb} = (1,5+j1,6)\Omega$ $X_C = 6543\Omega$ $R_p = 2,4\Omega$	53	64	67	10,3	21,1	regimul de funcționare al releului
Conducător introdus în nisip 25cm ($R_f = 7800\Omega$)	77	41	71	40,5	38,5	supracompenență 13%
- " -	8	97	100	101	99,5	rezonanță
Conducător căzut pe sol ($R_f = 200\Omega$)	5	103	101	104	99,8	a funcționat releul RPP
Conducător legat la priza stîlpului ($R_f = 0$)	-	-	-	-	-	- " -

Obs.: Mărimile din tabelul 4.4 și 4.5 au aceeași semnificație ca cele din tabelul 4.1.

Tabelul 4.6. Conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator

Condițiile în care are loc defectul		U_R [V]	U_S [V]	U_T [V]	U_{ab} [V]	Regiul de funcționare al sistemului	Obs.		
$Z_{ed} = Z_{ed} = (0,1 + j2,1)\Omega$	$S = 38 \text{ KVA}$	57	60	62	7,6	3,4	10,5	supracompensați 13.	nu a funcționat rețeaua RPP
$Z_{ntSI} = (2,88 + j8,34)\Omega$	- " -	46	63	68	23	24,7	7,4	rezonanță	- " -
$Z_{ed} = Z_{ed} = (1,1 + j0,65)\Omega$	$S_c = 1200 \text{ KVA}$	55	84	56	42	46,5	10,7	- " -	a funcționat rețeaua RPP
$Z_{ed} = (1,5 + j1,6)\Omega$	- " -	85	55	54	42	44	4,8	- " -	nu a funcționat rețeaua RPP
$R_p = 2,4\Omega$	- " -	76	50	52	31,5	35,1	11,4	supracompensați 13.	- " -
	Conductor introdus în nisip 25 cm ($R_c \approx 7000 \Omega$)	54	53	69	17,3	19,2	11	- " -	- " -

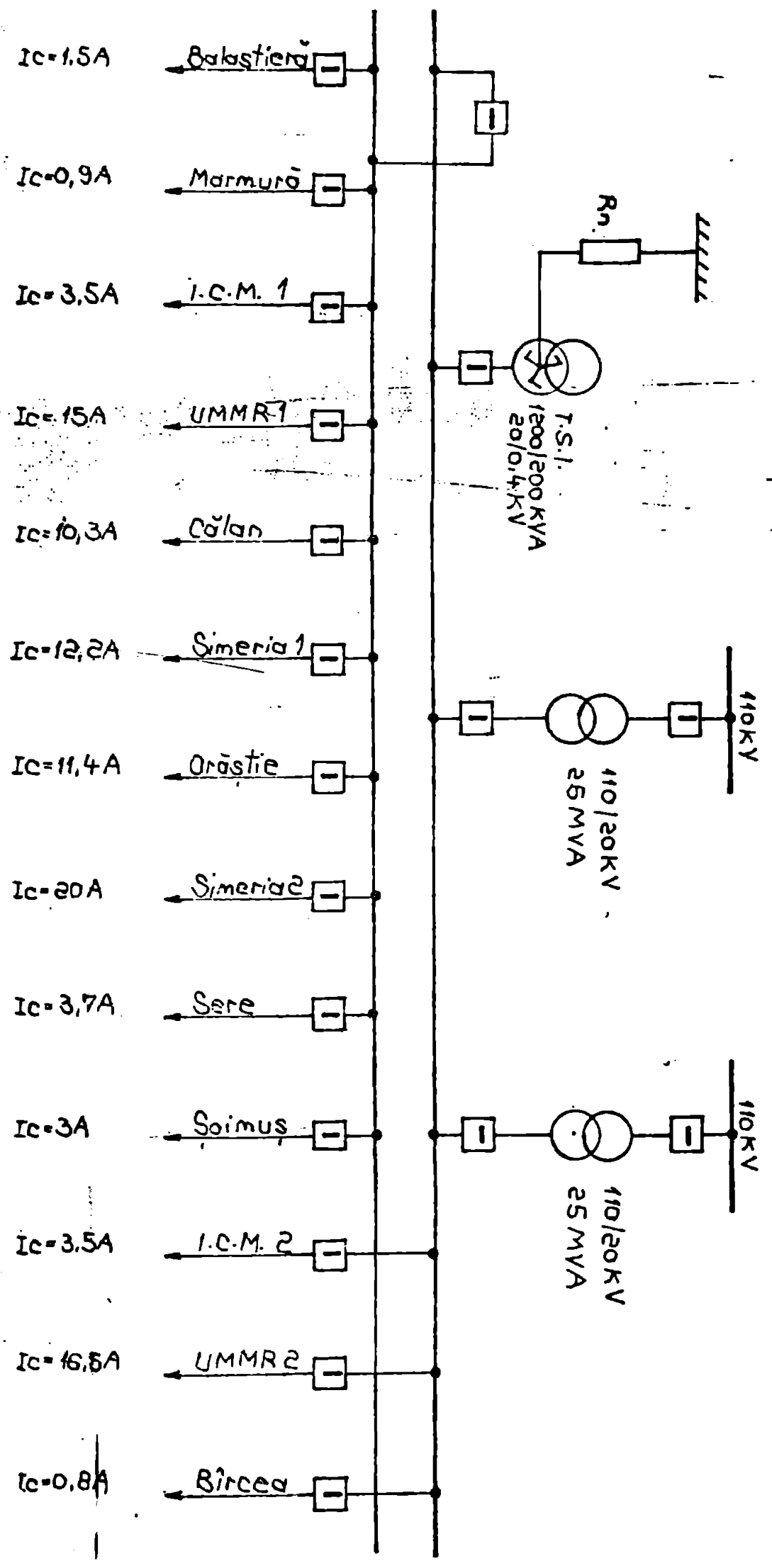
Obs.: Valorile din tabel au aceeași semnificație ca în tabelul 4.1.

pot atinge valori ridicate se poate constata că chiar o simplă punere la pământ netă (rezistență de trecere mică) este posibil ca releul RPP să nu o sesizeze. De aceea este absolut necesar ca rețelele de medie tensiune de acest tip să fie prevăzute cu relee de minimă tensiune cu ajutorul cărora să se controleze valoarea tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune. Deoarece această tensiune nu depășește 5% din valoarea tensiunii de fază [2], [85], [90], [146], [147] în regim normal de funcționare, se poate introduce un releu de tensiune care să sesizeze creșterea tensiunii homopolare de la 7-8% din valoarea tensiunii de fază. Cu un astfel de releu pot fi sesizate majoritatea defectelor provocate în cadrul determinărilor experimentale efectuate în rețeaua reală de medie tensiune. Se remarcă faptul că la valori mici ale tensiunii homopolare conținutul în armonici al acesteia este ridicat [39], [41], [57], [113], [142], de aceea pentru a sesiza un defect de tipul celor precizate este necesar ca releul maximal de tensiune să fie prevăzut cu un filtru astfel încât să se controleze numai fundamentală tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune din stația de transformare.

4.3. Rezultatele măsurărilor efectuate în stația 110/20 kV Simeria

Rețeaua de medie tensiune are nulul tratat prin rezistor. Schema principială a stației de transformare este prezentată în fig. 4.3. În această figură sînt trecute și valorile curenților capacitivi ai fiecărei linii. Rezistorul folosit pentru tratarea nulului rețelei de medie tensiune are rezistența de $37,5 \Omega$. Pentru creșterea nulului artificial este utilizat transformatorul de servicii interne (TSI). Defectele s-au provocat pe linia 20 kV Soirnaș la 5 km de barele de medie tensiune ale stației de transformare, linia avînd conductoarele din Al-AI cu secțiunea 50 mm^2 . Deci impedanțele de secvență ale liniei pînă la locul de defect sînt: $Z_{Ld} = Z_{Ld} = (3,1 + j1,75) \Omega$; $Z_{Lh} = (0,25 + j5,1) \Omega$. Impedanțele de secvență ale transformatorului de putere au valorile $Z_{sd} = Z_{si} = (0,1 + j2,1) \Omega$, iar ale transformatorului de servicii interne au valorile: $Z_{dTSI} = Z_{iTSI} = (2000 + j2,15) \Omega$, $Z_{hTSI} = (8 + j28,5) \Omega$. Deoarece în acest caz nulul artificial al rețelei este legat la pământ printr-o rezistență de valoare mică, depășirea nulului este mai puțin pronunțată decît la rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere, la același tip de defect, motiv pentru care în acest caz se controlează valoarea curenților ce se închid prin rezistorul de tratare al nulului rețelei de medie tensiune.

FIG. 4.3. SCHEMA MONOFILARĂ A STAȚIEI 110/20KV SIMERIA



În acest caz s-au provocat defecte de tipul: simplă punere la pământ și conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator. Aceste defecte s-au realizat pentru diverse valori ale rezistenței de trecere la locul de defect și pentru diverse valori a puterii consumatorilor alimentați prin linia cu defect în cazul defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator.

Valorile obținute pentru curentul de scurtcircuit și pentru curentul prin rezistorul de tratare a noului rețelei de medie tensiune în cazul în care este provocat unul din cele două tipuri de defecte sînt prezentate în tabelele 4.7 și 4.8. În aceste tabele se dau și valorile acestor curenți obținute prin calcul.

Tabelul 4.7. Simplă punere la pământ

R_t [Ω]	$S_c^{I.VA}$	I_{sc} [A]				I_n [A]				Cbs.
		măș.	calculat cu		măș.	calculat		rel. 1.46	$\varepsilon_{\%}$	
			rel.1.42	rel.1.41		rel. 1.45	$\varepsilon_{\%}$			
0,1	400	296	292,1	284	300	288,2	3,9	288,2	3,9	au funcț. toate protect.
2,6	400	279	271	271	282	274,8	2,5	274,8	2,5	"-
4,1	400	269	262	262	273	266	2,5	266	2,5	"-
3000	400	3,6	3,79	3,68	4,2	3,85	8,3	3,93	6,4	a funcț. RAP-ul
5000	400	2,04	2,26	2,1	2,15	2,33	8,4	2,2	2,3	"-
7000	400	1,2	1,64	1,1	1,25	1,56	25,4	1,12	10,4	"-
10000	400	0,9	1,03	0,95	0,91	1,17	28,6	0,96	5,5	nu a funcțion. RAP-ul

(ghg. Primul defect ($R_t=0,1 \Omega$) s-a provocat chiar în stația de transformare provocîndu-se un scurtcircuit monofazat la priza stației.

Abrevierile din tabelele 4.7 și 4.8 au următoarea semnificație:

R_t - rezistența de trecere la locul de defect; S_c - puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect; X_j - reactanța capacitivă a rețelei în spatele defectului; I_{sc} - curentul la locul de defect; I_n - curentul prin rezistorul de tratare a noului rețelei de medie tensiune.

În calculul acestor curenți pentru parametrii elementelor s-au folosit relațiile de calcul date în literatură [21], [26], [31], [41], [62], [80], [86], [87], [95], [117], [142].

Tabelul 4.8. Conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator

R_t [Ω]	S_0 KVA	X_0 [Ω]	I_n [A]			Obs.
			exp.	calc.	$\xi\%$	
2,6	63	4950	1,6	1,71	6,9	a funcționat RAP-ul
1000	63	19560	1,08	1,12	3,7	- " -
5000	63	19560	0,83	0,92	10,8	nu a funcționat RAP - ul
10000	63	19560	0,71	0,78	9,8	- " -
10000	63	75423	0,38	0,395	3,9	- " -
5000	563	19560	1,28	1,34	4,7	a funcționat RAP-ul
10000	563	19560	0,97	0,98	1,3	- " -
10000	563	75423	0,52	0,53	1,9	nu a funcționat RAP - ul

Din tabelele 4.7 și 4.8 se constată că majoritatea acestor defecte sînt sesizate cu ajutorul releului RAP. Numai în situația în care are loc un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator și consumatorul alimentat prin linia respectivă are puterea foarte mică, releul RAP nu sesizează acest tip de defect. Se remarcă de asemenea faptul că prin folosirea relației (1.46) la stabilirea căreia s-a avut în vedere elementele transversale la locul de defect, pentru calculul curentului ce se închide prin rezistor (I_n) la o simplă punere la pământ printr-o rezistență de valoare mare se obțin valori mult mai apropiate de cele determinate experimental decît folosind relațiile din literatură. Folosind pentru calculul curentului I_n relațiile din literatură s-au obținut eroare maximă de 28,6% în timp ce utilizînd relațiile (1.46) eroarea maximă a fost de 10,4% față de valorile obținute experimental. Deci, pentru calculul curentului I_n la defecte prin rezistență de trecere mare este necesar să se folosească relația (1.46).

Din tabelul 4.8 se constată că abaterea maximă dintre valoarea calculată și cea obținută experimental pentru curentul I_n este de 10,8%, ceea ce avînd în vedere precizia cu care sînt cunoscute parametrii utilizați la calculul acestui curent este acceptabilă. Rețeaua din fig.4.3 s-a reprodus și cu ajutorul modelului de rețea, rezultatele obținute în acest caz sînt prezentate în tabelul 3.7. Comparînd rezultatele din acest tabel cu cele din tabelul 4.8 se constată diferențe foarte mici între curentul I_n determinat experimental în rețeaua

reală de medie tensiune și cel obținut cu ajutorul modelului de rețea (abateri sub 5%). Aceasta evidențiază faptul că prin model s-a reprodus destul de exact rețeaua reală. Desigur, aceste rezultate sînt afectate și de erorile instrumentelor de măsură utilizate la măsurătorile efectuate în rețeaua reală precum și în model, rezultatele analitice nefiind afectate de aceste erori.

Măsurătorile efectuate în rețeaua reală de medie tensiune au scos în evidență faptul că rezultatele obținute prin calcul analitic respectiv cu ajutorul modelului de rețea în studiul defectelor de tip conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă sau spre consumator, respectiv a simplilor puneri la pământ sînt corespunzătoare. Deci aproximațiile făcute în acest studiu sînt acceptabile.

5. SESIZAREA DEFECTELOR DE TIP CONDUCTOR ÎNTRERUPT ȘI CĂȘUT LA PĂMÎNT

Sesizarea defectelor de tip conductor întrerupt și cășut la pământ se realizează cu ajutorul protecțiilor împotriva punerilor la pământ. Aceste protecții pot fi selective sau neselective. Toate rețelele de medie tensiune indiferent dacă pot funcționa timp îndelungat sau nu cu o punere la pământ sînt prevăzute cel puțin cu o schemă de semnalizare a punerilor la pământ [5]. Sesizarea selectivă a punerilor la pământ se realizează cu protecții speciale.

5.1. Sesizarea neselectivă a punerilor la pământ

Protecțiile cu ajutorul cărora sînt sesizate neselectiv punerile la pământ controlează valoarea tensiunii homopolare (U_{hb}) a barelor de medie tensiune ale stației de transformare (prin- trun releu maximal de tensiune), pentru rețele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat, respectiv valoarea curentului prin rezistorul de tratare a nulului (I_n) pentru rețele cu nulul tratat prin rezistor [5], [143], [147], [150].

5.1.1. Sesizarea neselectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin rezistor

Pentru a controla valoarea curentului din rezisto- rul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune s-a realizat un releu [124], care are schema prezentată în fig.5.1 (R.A.P).

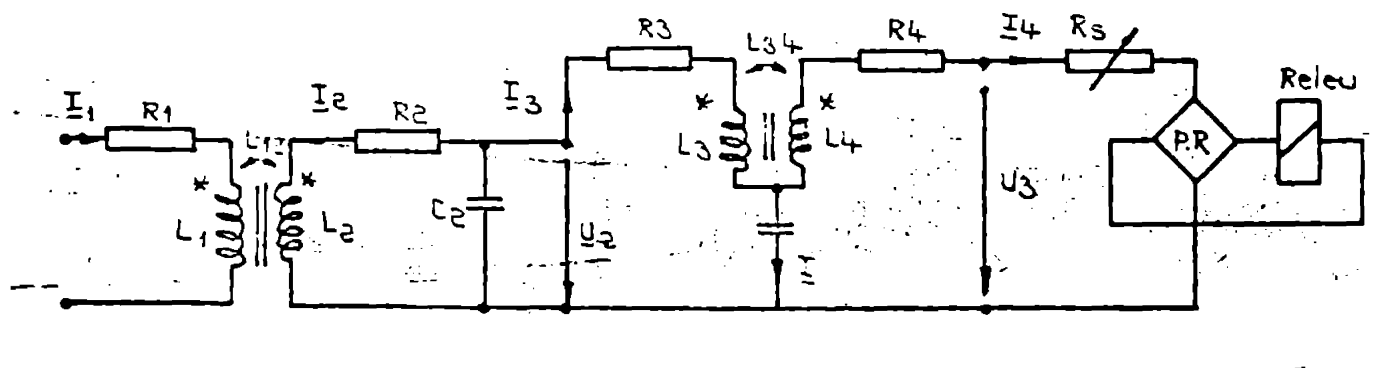


Fig.5.1.Schema releului ampermetric de puneri la pământ (R.A.P)

În cazul în care prin rețeaua de medie tensiune sînt alimentați consumatorii deformanți, curentul din rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune conține armonici superioare care fac ca valoarea acestuia să fie ridicată chiar în regim normal de funcționare [40], [113], [119], [142]. Pentru a sesiza un defect în rețeaua de medie tensiune este necesar să se controleze valoarea fundamentalei acestui curent. Din acest motiv a fost necesară introducerea unui sistem de filtrare cu ajutorul căreia să se extragă fundamentală curentului ce se închide prin rezistorul de tratare a nulului. Curentul din rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune conține armonica a 3-a în ponderea cea mai mare, din acest motiv în dimensionarea sistemului de filtrare s-a avut în vedere în primul rînd eliminarea acestei armonici. Dispozitivului i s-a impus condiția să acționeze la un curent de 0,5A, 50Hz și să nu acționeze la 5A, 150Hz [40], [68], [86], [113], [143].

a) Analiza și dimensionarea optimă a sistemului de filtrare

Analizîndu-se mai multe variante de filtru s-a ajuns la concluzia că cel care satisface mai bine condițiile impuse este filtrul cu schema prezentată în fig.5.1 [112]. În această figură filtrul conține elementele R_3 , L_3 , R_4 , L_4 , C asigură o puternică atenuare pentru armonica a 3-a, deci este un filtru oprește bandă pe armonica a 3-a. O condiție de dimensionare a filtrului este ca tensiunea cu frecvența de 150 Hz la ieșire ($U_3(3)$) să se anuleze, iar o a doua condiție este ca raportul modulelor tensiunilor U_3/U_2 (fig.5.1) să fie maxim pentru fundamentală (50 Hz). Sarcina filtrului este o rezistență deoarece releul utilizat ca element de execuție este de tip magneto-electric, deci se alimentează în curent continuu. Redresarea se face prin intermediul punții redresoare P.R. (fig.5.1).

Acceptîndu-se că elementele filtrului sînt liniare, în regim sinusoidal se pot scrie relațiile:

$$\begin{aligned} U_2 &= I_3(R_3 + j\omega L_3) - j\omega L_{43} \cdot I_4 - j \frac{1}{\omega C} \cdot I ; \\ U_3 &= -I_4(R_4 + j\omega L_4) + j\omega L_{34} \cdot I_3 - j \frac{1}{\omega C} \cdot I ; \\ U_3 &= (R_g + R') \cdot I_4 ; \\ I_3 &= I + I_4 ; \end{aligned} \tag{5.1}$$

Din relațiile (5.1) pentru raportul tensiunilor U_3/U_2 se obține expresia (5.2) în care intervin reactanțele corespunzătoare, iar $R_g + R' = R$.

$$\frac{U_3}{U_2} = \frac{R(X_C - X_{34})}{\sqrt{[X_C(R+R_3+R_4) - X_3(R+R_4) - X_4R_3]^2 + [(X_C - X_{34})(X_3 - X_{34}) + (X_C - X_3)(X_4 - X_{34}) + R_3(R+R_4)]^2}} \quad (5.2)$$

Impunând condiția ca pentru acest raport armonica a 3-a să determine o valoare nulă rezultă relația de legătură

$$X_C = 9 X_{34} \quad (5.3)$$

Tinând seama de această relație raportul U_3/U_2 devine:

$$\frac{U_3}{U_2} = \frac{8 X_{34} \cdot R}{\sqrt{[9X_{34}(R+R_3+R_4) - X_3(R+R_4) - X_4R_3]^2 + [9X_{34}(X_3 - X_{34}) + (9X_{34} - X_3)X_4 - X_{34} + R_3(R+R_4)]^2}} \quad (5.4)$$

Releul de execuție este un releu foarte sensibil, avînd curentul de acționare 0,1 mA. Pentru ca acest curent (I_4) să nu depindă de rezistența releului se introduce în serie cu acesta potențiometrul R_p (fig.5.1) de valoare mult mai mare decît rezistența releului. Rezistența releului este de aproximativ 150Ω , iar rezistența potențiometrului R_p este mai mare de 3000Ω . Pentru bobinele de inductivități L_3 și L_4 se acceptă factorul de calitate 5 și factor de cuplaj 0,9 [66], [93], [127]. Tinînd seama de acest stea relația (5.4) devine:

$$\frac{U_3}{U_2} = \frac{7,2 R \sqrt{X_3 \cdot X_4}}{\sqrt{(k_1 - k_2)^2 + (k_3 + k_4 + k_5)^2}} \quad (5.5)$$

unde s-au făcut notațiile:

$$k_1 = 8,1 \sqrt{X_3 \cdot X_4} (R + \frac{X_3 + X_4}{5}); \quad k_2 = X_3 (R + \frac{2X_4}{5});$$

$$k_3 = (X_3 - 0,9 \sqrt{X_3 \cdot X_4}) (8,1 \sqrt{X_3 \cdot X_4} - X_4); \quad k_4 = 7,2 \sqrt{X_3 \cdot X_4} (X_4 - \sqrt{X_3 \cdot X_4}); \quad (5.6)$$

$$k_5 = \frac{X_3}{5} (R + \frac{X_4}{5}) = k_2 - \frac{X_3 \cdot X_4}{5};$$

Determinarea valorii parametrilor X_3, X_4 și R pentru care raportul tensiunilor U_3/U_2 este maxim presupune derivarea relației (5.5) în raport cu cele trei variabile și rezolvarea sistemului de ecuații obținut prin anularea derivatelor respective [106], [108]. Avînd în vedere complexitatea relației (5.5) pentru determinarea celor trei parametri s-au dat valori cîte unuia din parametri ceilalți păstrîndu-se constant și s-a trasat dependența raportului U_3/U_2 funcție de cei trei parametri. Pentru calculul acestui raport s-a întocmit un program de calcul în limbaj FORTRAN a cărui schemă logică este

prezentată în fig.5.2

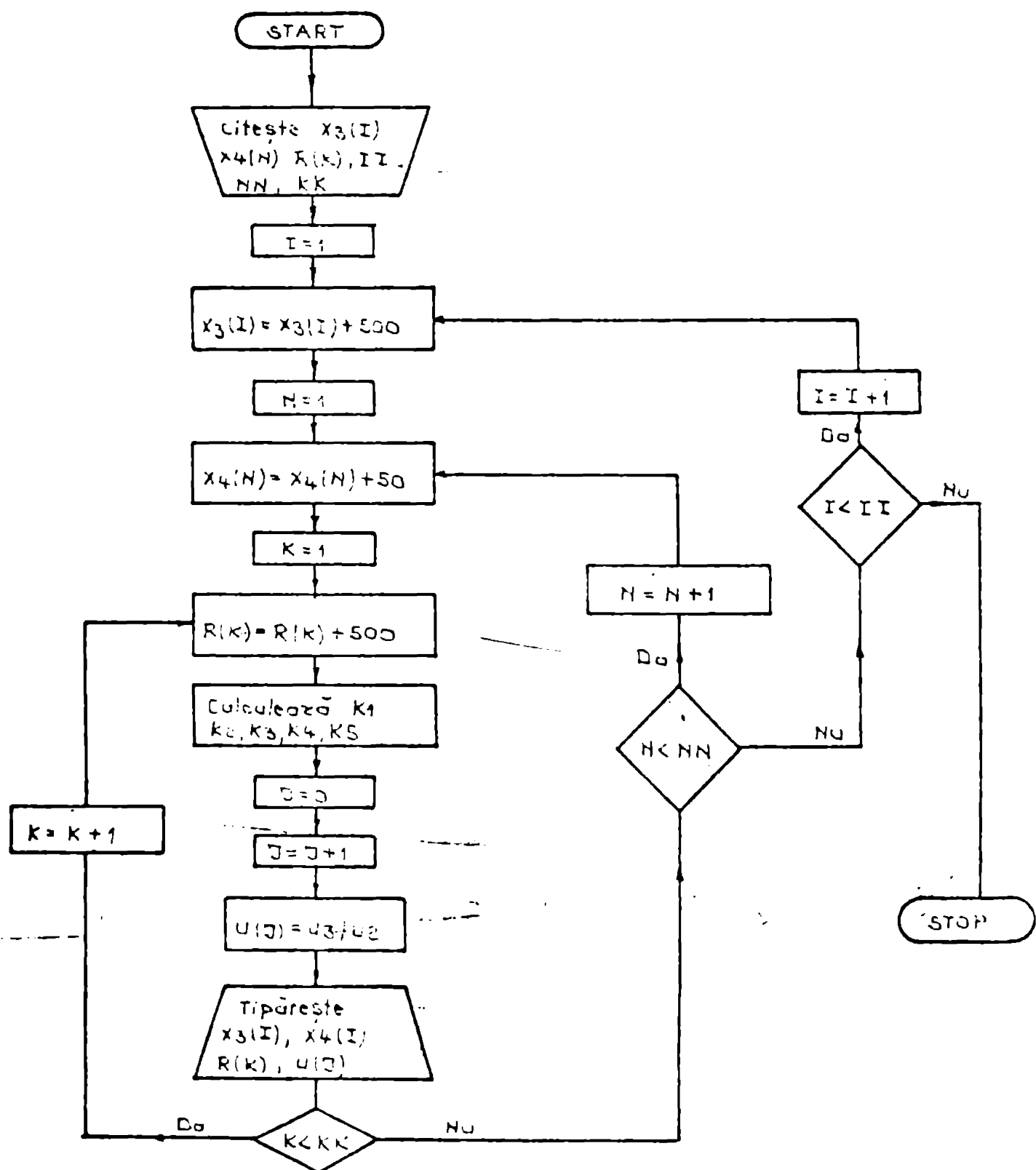


Fig.5.2. Schema logică de calcul a raportului U_3/U_2

În figurile 5.3, 5.4 și 5.5 s-a trasat dependența raportului U_3/U_2 funcție de parametrii X_3 , X_4 și R .
 Din cele trei figuri rezultă că raportul tensiunilor U_3/U_2 este maxim dacă pentru parametrii respectivi se aleg valorile: $X_3=6000 \Omega$, $X_4=100 \Omega$, $R=20 \text{ k}\Omega$. Cu aceste valori ale reactanțelor pentru frecvența de 50 Hz inductivitățile L_3 și L_4 devin: $L_3=19,1 \text{ H}$; $L_4=0,32 \text{ H}$.

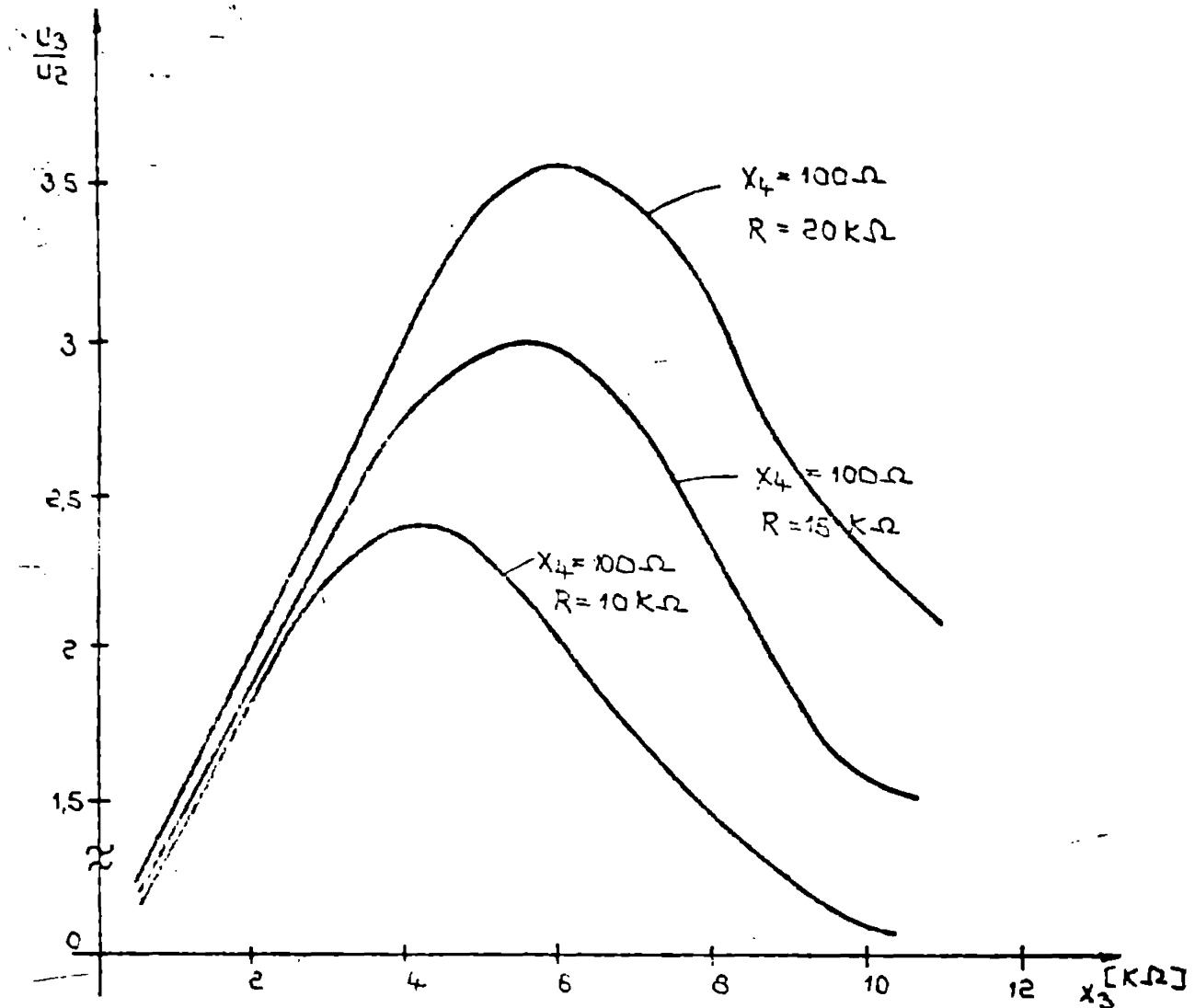


Fig.5.3. Dependența raportului U_3/U_2 de reacțanța X_3

Ținând seama de factorul de cuplaj rezultă și valoarea inductivității de cuplaj $L_{34} = 2,22$ H.

Realizarea acestor inductivități de valori ridicate (în special L_3) necesită utilizarea unor miezuri feromagnetice. Pentru a se asigura liniaritatea circuitelor (acceptată în calcule) este necesar ca miezul feromagnetic să fie prevăzut cu un întrefier. Aceasta face ca factorul de cuplaj să scadă, dar rezultatele experimentale arată că valoarea acceptată în calcul pentru coeficientul de cuplaj este corespunzătoare scopului propus [116], [127].

Din relația (5.3) pentru capacitatea C se obține valoarea $C = 0,5 \mu F$.

Cunoscând parametrii filtrului oprește bandă se poate determina impedanța echivalentă a acestuia, sarcina filtrului fiind rezistența R . Expresia acestei impedanțe este:

$$Z_3 = R_3 - jX_3 = R_3 + \frac{(R+R_4)(X_{34}-X_C)^2}{(R+R_4)^2 + (X_3-X_C)^2} + j X_3 - X_C - \frac{(X_4-X_C)(X_{34}-X_C)^2}{(R+R_4)^2 + (X_3-X_C)^2}; \quad (5.7)$$

Înlocuind în fig.5.1 filtrul oprește bandă cu impedanța Z_3 se obține schema din fig.5.6.

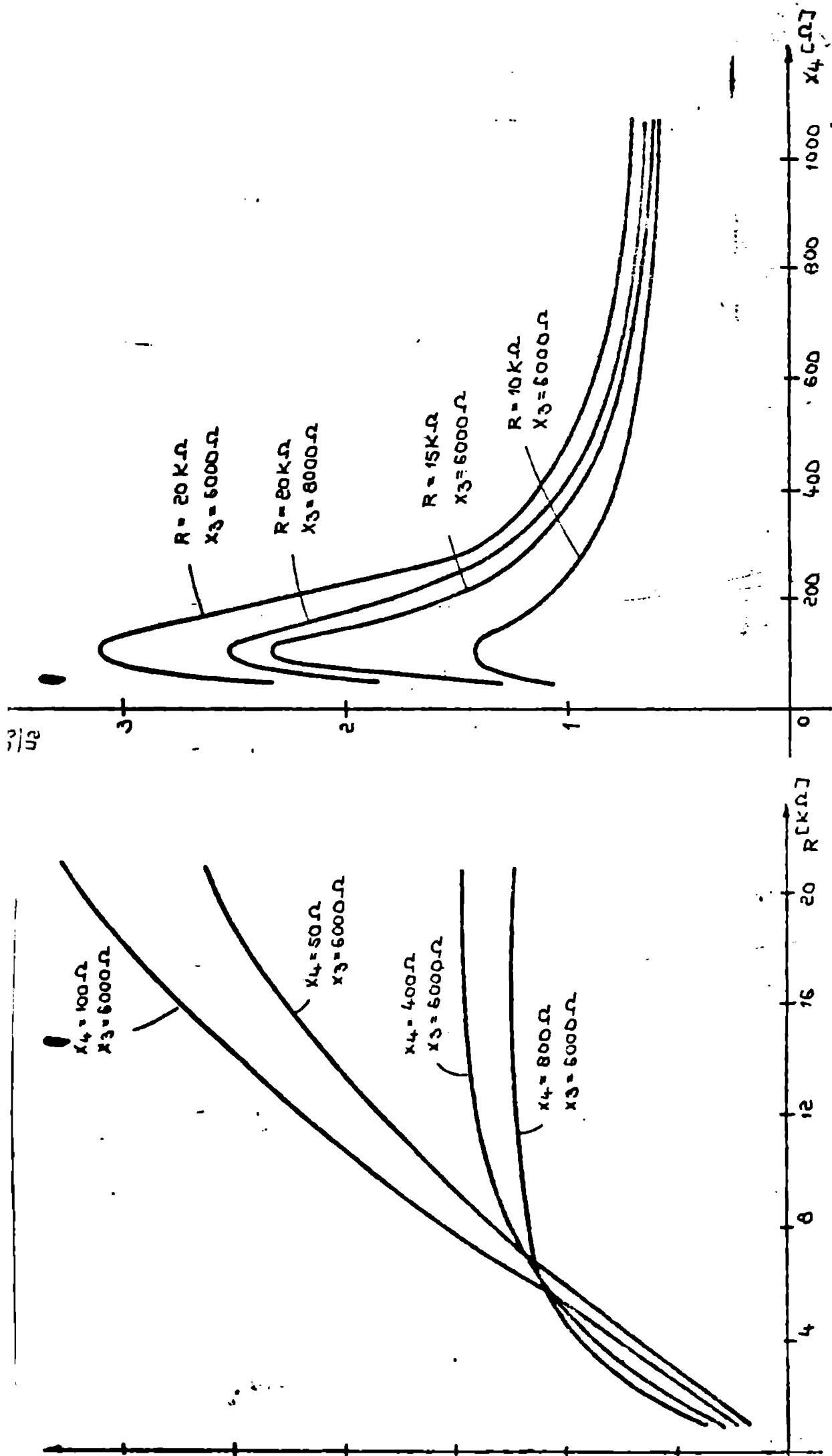


Fig. 5.4 DEPENDENTA RAPORTULUI U_3/U_2 DE R

Fig 5.5 DEPENDENTA RAPORTULUI U_3/U_2 DE REACTANTA X_4

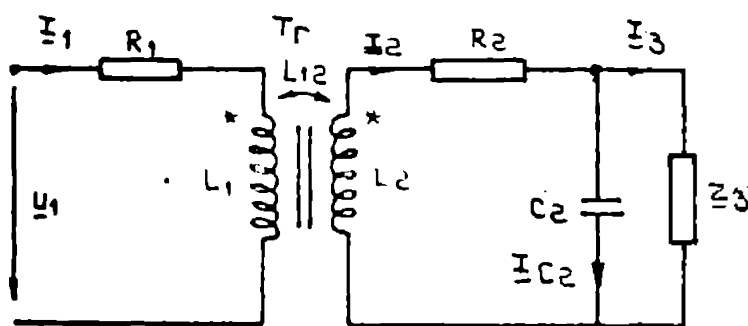


Fig. 5.6. Aplicație privind calculul raportului I_3/I_1

Transformatorul Tr se dimensionează din condiția ca la un curent $I_1 = 12,5 \text{ mA}$, 50 Hz curentul I_3 să devină $0,1 \text{ mA}$. Cunoșcând sensibilitatea acestui relee și rezistența lui internă se determină puterea aparentă necesară la bornele de intrare ale filterului

oprește bandă pentru ca releul să funcționeze. Cu aceste mărimi determinate se stabilesc parametrii transformatorului Tr , deci se obțin valorile inductivităților L_1 , L_2 , L_{12} și rezistențelor R_1 și R_2 . Este necesară determinarea capacității C_2 astfel încât pentru fundamentală (50 Hz) raportul curenților să fie maxim.

Considerându-se tensiunile și curenții pentru circuitul cu schema din fig. 5.6 ca fiind mărimi sinusoidale se pot scrie relațiile:

$$0 = (R_2 + j\omega L_2) \cdot I_2 - j\omega L_{12} \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3$$

$$0 = U_3 \cdot I_3 - j \frac{1}{\omega C_2} \cdot I_{C_2} \quad ; \quad (5.8)$$

$$I_2 = I_3 + I_{C_2} \quad ;$$

Din relațiile (5.8) pentru raportul I_3/I_1 se obține expresia:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{\omega L_{12}}{\sqrt{[R_2 + R_3 + \omega C_2 (R_2 X_3 - X_2 R_3)]^2 + [X_2 - X_3 + \omega C_2 (R_2 R_3 + X_2 X_3)]^2}} \quad ; \quad (5.9)$$

Pentru ca raportul I_3/I_1 să fie maxim este necesar ca numitorul expresiei (5.9) să fie minim. Din această condiție rezultă valoarea capacității C_2 . Se observă din expresia numitorului relației (5.9), că în raport cu C_2 reprezintă un polinom de gradul doi, coeficientul termenului de gradul doi fiind pozitiv. Deci, acest polinom prezintă un minim în punctul în care se anulează derivata a întâi a lui $|106|$. Efectuând derivate de ordinul întâi al acestui polinom și anulându-le pentru capacitatea C_2 se obține expresia:

$$C_2 = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{(X_2 R_3 - R_2 X_3)(R_2 + R_3) - (X_2 - X_3)(R_2 R_3 + X_2 X_3)}{(X_2 R_3 - R_2 X_3)^2 + (R_2 R_3 + X_2 X_3)^2} \quad ; \quad (5.10)$$

Dimensionându-se inductivitățile L_3 și L_4 pentru rezistențele R_3 și R_4 se obțin valorile: $R_3=118\Omega$, $R_4=19,2\Omega$. Alegând pentru capacitatea C valoarea de $0,51 \mu F$ impedanța Z_3 devine: $Z_3=(2720-j410)\Omega$;

Dimensionându-se transformatorul Tr (fig.5.6) s-au obținut următoarele valori pentru parametri: $L_1=0,1 H$, $L_2=10,2 H$, $L_{12}=1 H$, $R_1=1,3\Omega$, $R_2=100\Omega$ [66], [111], [127]. Înlocuind aceste valori în relația (5.10) pentru capacitatea C_2 se obține valoarea de $0,82 \mu F$. Impedanța de intrare a ansamblului (fig.5.6) este:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{(\omega L_{12})^2}{R_2 - \frac{jX_{C2} \cdot Z_3}{Z_3 - jX_{C2}} + j\omega L_2} ; \quad (5.11)$$

Deci se înlocuiesc valorile parametrilor în relația (5.11) pentru impedanța Z_1 se obține valoarea: $Z_1 = (28,2 + j2,26) \Omega$.

Prin conectarea la bornele de intrare a filtrului oprește banda a capacității C_2 se obține filtrul trece jos.

Pentru determinarea caracteristicii de frecvență a filtrului trece jos se exprimă raportul modulelor curenților I_4/I_1 (fig.5.1) funcție de parametri schemei și se obține expresia:

$$\frac{I_4}{I_1} = \frac{\omega L_{12} \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_{34} \right)}{\sqrt{[(R+R_4)R_1 - X_2^2 \left(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + \left[\left(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C} \right) R_1 + X_2^2 (R+R_4) \right]^2]} ; \quad (5.12)$$

unde s-au făcut notațiile:

$$R_1^2 = \left[R_3 + \frac{(R+R_4) \left(\omega L_{34} - \frac{1}{\omega C} \right)^2}{(R+R_4)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \right] (1 - \omega C_2 R_2) + R_2 \left[1 + \omega C_2 \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_3 + \frac{(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C}) (\omega L_{34} - \frac{1}{\omega C})^2}{(R+R_4)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \right) \right] ; \quad (5.13)$$

$$X_2^2 = X_2 + \omega C_2 R_2 \left[R_3 + \frac{(R+R_4) \left(\omega L_{34} - \frac{1}{\omega C} \right)^2}{(R+R_4)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \right] + (1 - \omega^2 C_2 L_2) \left[\omega L_3 - \frac{1}{\omega C} - \frac{(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C}) (\omega L_{34} - \frac{1}{\omega C})^2}{(R+R_4)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \right] ; \quad (5.14)$$

Având toți parametri din relația (5.12) determinați, înlocuindu-i în această relație se obține dependența raportului I_4/I_1 de frecvență. În fig.5.8 este trasată caracteristica de frecvență

schemei în ansamblu (fig.5.1).

b) Verificări experimentale

Dispozitivul pentru sesizarea defectelor prin rezistenți de trecere mare s-a realizat practic și s-a determinat experimental dependența raportului curenților I_4/I_1 funcție de frecvență. În fig.5.7 este prezentată o vedere de ansamblu a dispozitivului (R.A.P.-1).

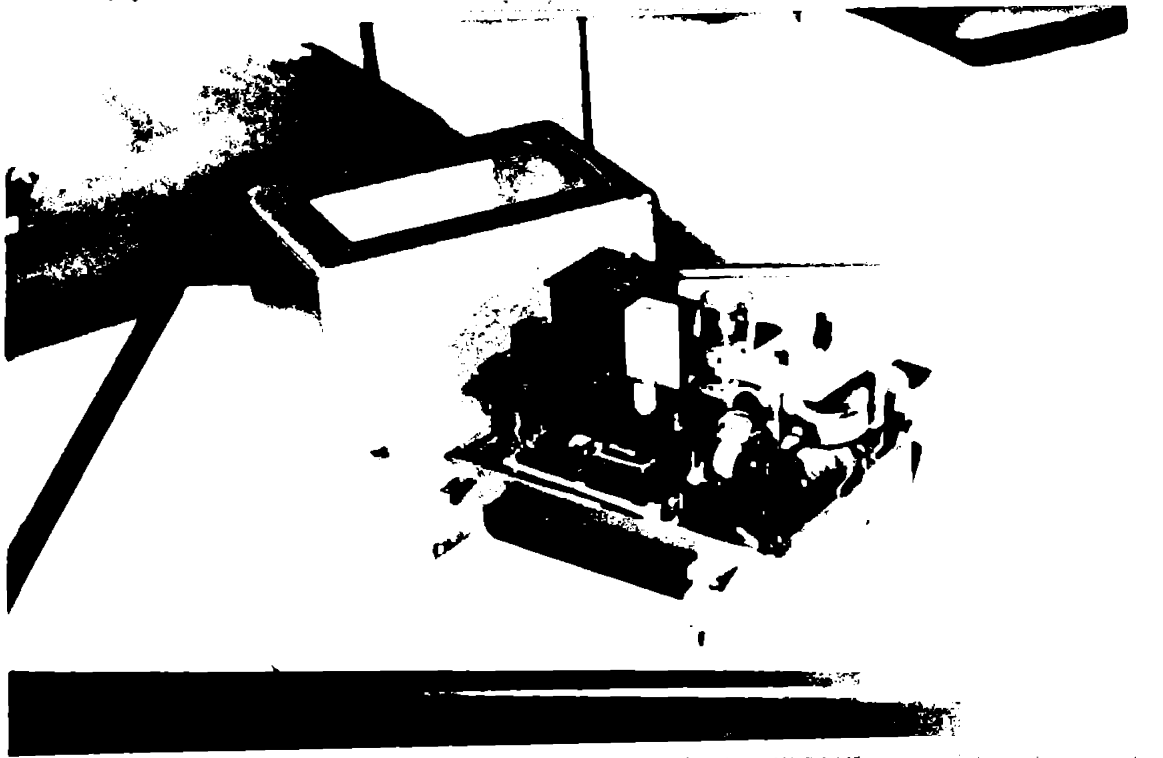


Fig.5.7. Vedere de ansamblu a releului R.A.P. - 1

Pentru determinarea acestei caracteristici s-a folosit montajul din fig.5.8



Fig.5.8. Schema de verificare a releului R.A.P. - 1

Generatorul de semnal sinusoidal utilizat a fost de tipul PO-21A cu frecvența reglabilă pe domeniul (20...20.000 Hz) și puterea la ieșire 10 W.

În fig.5.9 s-a trasat caracteristica de frecvență a schemei în ansamblu obținută experimental și prin calcul. Se constată o anumită diferență între cele două caracteristici, diferență justificată de faptul că în calcule nu s-a luat în considerare pierderile de putere din miezurile feromagnetice precum și cele din condensatoa

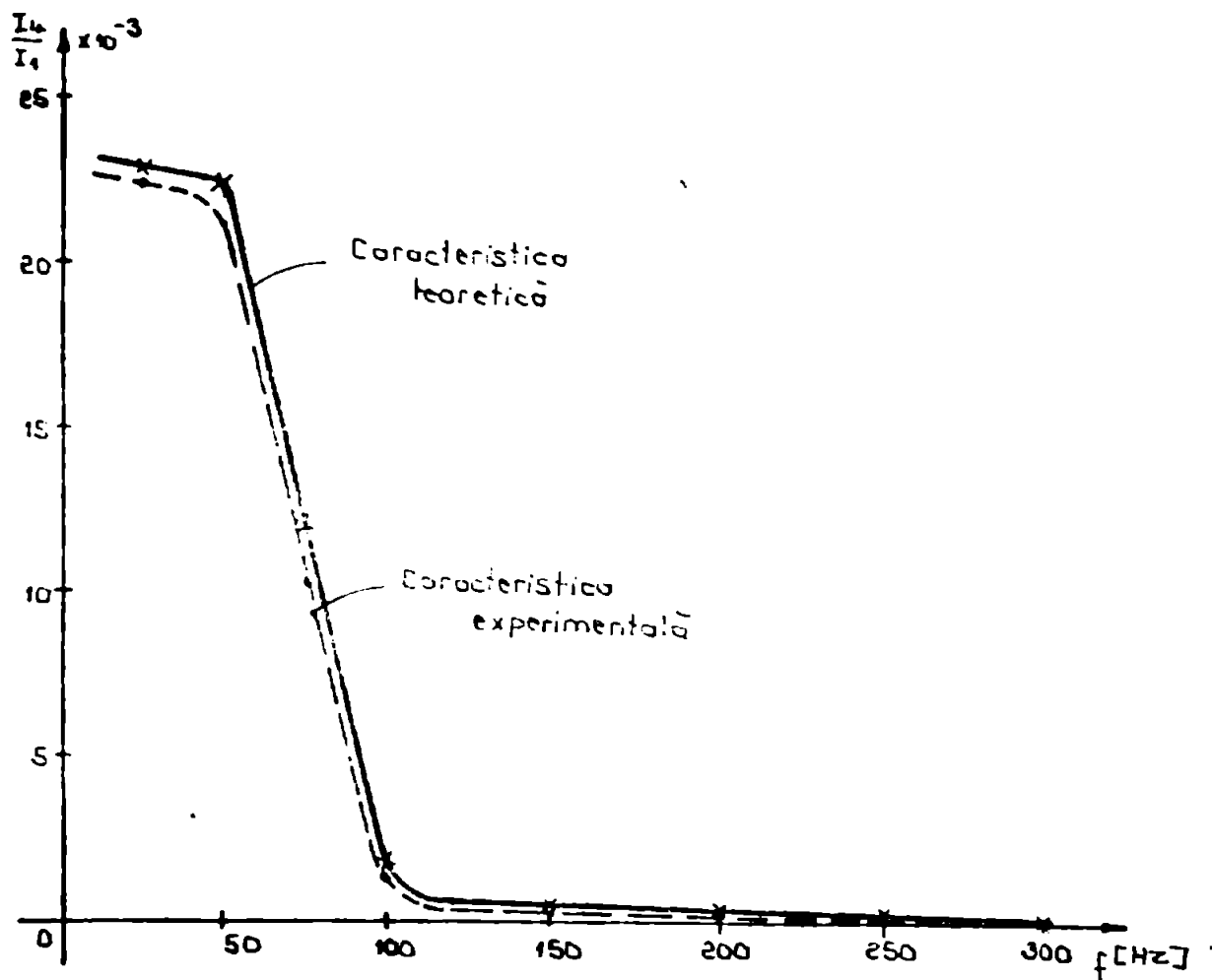


Fig. 5.9. Caracteristica de frecvență a releei RAP-1

Având în vedere diferența relativ mică între cele două caracteristici (fig. 5.9) se poate aprecia că schema considerată poate fi analizată cu o precizie satisfăcătoare în cadrul circuitelor electrice liniare. Se constată de asemenea că pentru frecvențe mai mari de 150 Hz curentul I_4 tinde la 0, deci filtrul satisface cerințele impuse.

Pentru a micșora impedanța din secundarul transformatorului de curent dispozitivul pentru sesizarea defectelor prin rezistenți de trecere mare este prevăzut cu un transformator de adaptare. Raportul nominal al transformatorului de adaptare s-a ales egal cu 4, astfel încât pentru un curent de 50 mA (50 Hz) în primarul transformatorului de adaptare dispozitivul va acționa. Ținând seama că raportul nominal al transformatorului de curent este 10 rezultă că acest dispozitiv va sesiza un defect care determină un curent prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune a cărui fundamentală este cel puțin 0,5 A [5], [59].

La un defect net curentul prin rezistorul de tratare a nulului poate atinge valoarea de 1000 A, deci curentul în primarul transformatorului de curent crește de 2000 ori față de 0,5 A [7], [62], [63], [69]. Chiar dacă în secundarul transformatorului de curent creșterea

curentului nu este atât de pronunțată (datorită saturării acestuia) totuși acest curent ar duce la distrugerea dispozitivului RAP-1. Acest neajuns se înlătură dacă miezul transformatorului de adaptare se realizează din ferită.

Pentru ca transformatorul de adaptare să nu deformeze curentul din secundarul transformatorului de curent, acesta se dimensionează la rîndul ei un transformator de curent [111]. Prin aceasta se asigură ca punctul de funcționare pe caracteristica magnetică a miezului să nu ajungă în porțiunea saturată, deci curentul în primar și secundar are practic aceeași formă de variație [89].

o) Miezul transformatorului de intrare (Tr) din fig. 5.1 la o excitație sinusoidală

Caracteristica magnetică a transformatorului de intrare Tr este de forma [15], [98], [134]:

$$i = i(\psi, \dot{\psi}, d\psi/dt) \quad (5.15)$$

Deci valoarea momentană a curentului depinde de valoarea momentană, de valoarea inițială și de viteza de variație a înălțurii magnetice. Ținînd seama de faptul că, caracteristica de magnetizare a miezului feromagnetic este o funcție impară aceasta se poate exprima printr-un polinom de forma [47], [98], [134]:

$$i_0 = \sum_{k=0}^n a_{2k+1} \cdot \psi^{2k+1} \quad (5.16)$$

În literatură [98], [134], se arată că această caracteristică poate fi aproximată printr-un polinom conținînd numai doi termeni:

$$i_0 = a_1 \psi + a_2 \psi^{2n+1} \quad (5.17)$$

Valorile optime ale coeficienților a_1 și a_2 se determină astfel încît eroarea relativă pătrunzînd să fie minimă. Cunoscîndu-se coordonatele a m puncte ale caracteristicii se determină minimul expresiei:

$$\sum_{k=1}^m \left(\frac{a_1 \psi_k + a_2 \psi_k^{2n+1}}{i_{0k}} - 1 \right)^2 \quad (5.18)$$

obținîndu-se sistemul:

$$a_1 \sum_{k=1}^m \frac{\psi_k^2}{i_{0k}^2} + a_2 \sum_{k=1}^m \frac{\psi_k^{2n+2}}{i_{0k}^2} - \sum_{k=1}^m \frac{\psi_k}{i_{0k}} = 0 \quad (5.19)$$

$$a_1 \sum_{k=1}^m \frac{\psi_k^{2n+2}}{i_{0k}^2} + a_2 \sum_{k=1}^m \frac{\psi_k^{4n+1}}{i_{0k}^2} - \sum_{k=1}^m \frac{\psi_k^{2n+1}}{i_{0k}} = 0$$

În relația (5.17) nu s-a ținut seama de pierderile existente în miezul feromagnetic al transformatorului. Dacă se acceptă variație sinusoidală pentru înălțuirea magnetică, componenta i_0 a curentului care ține seama de aceste pierderi se poate exprima prin relația [24], [98]:

$$i_{0a} = \frac{1}{\omega} \frac{d\psi}{dt} \sum_{k=0}^n a_k \cdot \psi^{2k} \quad (5.20)$$

De regulă pentru curentul i_0 se ia în considerare o expresie simplificată [24], [70], [98], [107]:

$$i_{0a} = \frac{a_0}{\omega} \frac{d\psi}{dt} \quad (5.21)$$

Coefficientul a_0 se obține ținând seama de faptul că la trecerea prin zero a înălțuirii magnetice ($\psi = 0$) curentul obține valoarea corespunzătoare intensității câmpului magnetic coercitiv (i_0), deci:

$$a_0 = \frac{i_0}{\psi_m} \quad (5.22)$$

Ținând seama și de pierderile din miezul feromagnetic relația (5.17) devine:

$$i_0 = \frac{a_0}{\omega} \cdot \frac{d\psi}{dt} + a_1 \psi + a_2 \psi^{2n+1} \quad (5.23)$$

Dacă impedanța echivalentă a circuitului din secundarul transformatorului Tr (fig. 5.1) o notăm cu $Z_2 = R_2 + jX_2$, se pot scrie ecuațiile:

$$\begin{aligned} N_1 \cdot I_{1m} \sin \omega t + N_2 \cdot i_2 &= N_1 \cdot i_0 \\ \frac{d\psi}{dt} + (L_2^1 + L_{20}) \cdot \frac{di_2}{dt} + (R_2 + jX_2) i_2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$i_0 = \frac{a_0}{\omega} \cdot \frac{d\psi}{dt} + a_1 \psi + a_2 \psi^{2n+1}$$

Din ecuațiile (5.24) făcând unele transformări se obține ecuația diferențială:

$$\begin{aligned} \frac{N_1}{N_2} (L_2^1 + L_{20}) \cdot \frac{a_0}{\omega} \cdot \frac{d^2\psi}{dt^2} + \left[1 + \frac{N_1}{N_2} a_1 (L_2^1 + L_{20}) + (R_2 + jX_2) \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{a_0}{\omega} \right] \frac{d\psi}{dt} + \\ + (2n+1) a_2 \frac{N_1}{N_2} (L_2^1 + L_{20}) \cdot \psi^{2n} \cdot \frac{d\psi}{dt} + (R_2 + jX_2) \frac{N_1}{N_2} a_2 \cdot \psi^{2n+1} + \\ + \frac{N_1}{N_2} (R_2 + jX_2) a_1 \psi = (L_2^1 + L_{20}) \frac{N_1}{N_2} I_{1m} \cdot \cos \omega t + (R_2 + jX_2) \frac{N_1}{N_2} I_{1m} \cdot \sin \omega t \end{aligned} \quad (5.25)$$

Dacă se face schimbarea de variabilă $\omega t = \theta$ și se fac notațiile:

$$\alpha = \omega (L_1^2 + L_2^2) \cdot \frac{N_1}{N_2} ; \quad \beta = (R_2 + R_1^2) \frac{N_1}{N_2} ;$$

$$\gamma = \omega + a_1 \alpha + a_0 \beta ; \quad \psi = \varphi$$

ecuația (5.25) devine:

$$\alpha \cdot a_0 \cdot \frac{d^2 y}{d\zeta^2} + \gamma \frac{dy}{d\zeta} + (2n+1) \alpha \cdot a_2 \cdot y^{2n} \cdot \frac{dy}{d\zeta} + a_1 \beta y + a_2 \beta y^{2n+1} = \quad (5.26)$$

$$= \alpha I_{1m} \cdot \cos \zeta + \beta I_{1m} \sin \zeta ;$$

Adăugînd simetria pentru caracteristica magnetică a miezului feromagnetic față de originea axelor de coordonate, curentul va conține numai armonici impare, deci soluția ecuației (5.26) este de forma:

$$y = \sum_{k=0}^q y_{(2k+1)m} \cdot \sin [(2k+1)\zeta - \varphi_{2k+1}] ; \quad q \leq n ; \quad (5.27)$$

Soluția (5.27) se poate determina folosind metoda balanței armonice.

Introducînd relația (5.27) în ecuația (5.26) și identificînd termenii pentru fundamentală se obțin relațiile:

$$\begin{aligned} & \left[\gamma + \alpha (2n+1) a_2 \cdot c_{2n}^n \left(\frac{y_{1m}}{2} \right)^{2n} \right] y_{1m} \cdot \cos \varphi_1 - (a_1 \beta - \alpha a_0) y_{1m} \cdot \sin \varphi_1 - \\ & - a_1 \beta c_{2n+1}^n \left(\frac{y_{1m}}{2} \right)^{2n} \cdot y_{1m} \cdot \sin \varphi_1 - A_1 - \alpha I_{1m} = \quad (5.28) \end{aligned}$$

$$= F_1 [y_{1m} \cdot \varphi_1 \dots y_{(2k+1)m} \cdot \varphi_{2k+1} \dots y_{(2q+1)m} \cdot \varphi_{2q+1}] = 0$$

$$\begin{aligned} & \left[\gamma + \alpha (2n+1) a_2 \cdot c_{2n}^n \left(\frac{y_{1m}}{2} \right)^{2n} \right] y_{1m} \cdot \sin \varphi_1 + (a_1 \beta - \alpha a_0) y_{1m} \cdot \cos \varphi_1 + \\ & + a_1 \beta c_{2n+1}^n (y_{1m})^{2n} y_{1m} \cdot \cos \varphi_1 \cdot \frac{1}{2^{2n}} - B_1 - \beta I_{1m} = \quad (5.29) \end{aligned}$$

$$= G_1 [y_{1m} \cdot \varphi_1 \dots y_{(2k+1)m} \cdot \varphi_{2k+1} \dots y_{(2q+1)m} \cdot \varphi_{2q+1}] = 0$$

în care:

$$\begin{aligned} A_1 = & -\alpha a_2 (2n+1) \left(\frac{y_{1m}}{2} \right)^{2n} \left\{ \sum_{k=0}^q \sum_{p=1}^n (-1)^p (2k+1) c_{2n}^{n-p} \cdot y_{(2k+1)m} \cdot \right. \\ & \cdot \cos (2p\varphi_1 - \varphi_{2k+1}) + 2n \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{p=1}^q (-1)^k \cdot y_{(2p+1)m} \cdot \left. \left\{ \cos [(2k+2)\varphi_1 - \right. \right. \\ & \left. \left. - \varphi_{2p+1}] + \cos (2k\varphi_1 - \varphi_{2p+1}) \right\} \right\} - \beta a_2 (2n+1) \left(\frac{y_{1m}}{2} \right)^{2n} \cdot \\ & \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{p=1}^q (-1)^k c_{2n}^{n-k} y_{(2p+1)m} \cdot \sin (2k\varphi_1 - \varphi_{2p+1}) ; \quad (5.30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_1 = & -\alpha a_2(2n+1) \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n} \left\{ - \sum_{k=0}^q \sum_{p=1}^q (-1)^k (2n+1) C_{2n}^{n-p} \cdot y_{(2k+1)m} \cdot \right. \\
 & \cdot \sin(2p\varphi_1 - \varphi_{2k+1}) + 2n \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{p=1}^q (-1)^k C_{2n-1}^{n-k-1} \cdot y_{(2p+1)m} \cdot \\
 & \cdot \left. \left[\sin[(2k+2)\varphi_1 - \varphi_{2p+1}] - \sin(2k\varphi_1 - \varphi_{2p+1}) \right] \right\} - \quad (5.31) \\
 & - \beta(2n+1)a_2 \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n} \sum_{k=1}^n \sum_{p=1}^q (-1)^k C_{2n}^{n-k} \cdot y_{(2p+1)m} \cdot \cos(2k\varphi_1 - \varphi_{2p+1}) ;
 \end{aligned}$$

Pentru termenii corespunzători armonicii de ordinul $2k+1$ se obțin ecuații de forma:

$$F_{2k+1}(y_{1m}, \varphi_1, \dots, y_{2q+1}, \varphi_{2q+1}) = 0 \quad (5.32)$$

$$G_{2k+1}(y_{1m}, \varphi_1, \dots, y_{2q+1}, \varphi_{2q+1}) = 0$$

analoage cu ecuațiile (5.28) și (5.29).

Din ecuațiile (5.28), (5.29) respectiv (5.32) se obține un sistem de $2q$ ecuații cu $2q$ necunoscute, care permite determinarea acestor necunoscute.

Din ecuațiile (5.28) și (5.29) eliminând variabila φ_1 se obține ecuația în y_{1m} :

$$\begin{aligned}
 & [\alpha^2(2n+1)^2 a_2^2 + \alpha_2^2 \beta^2] (C_{2n+1}^n)^2 \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{4n+2} + 2[\alpha a_2 n(n+1) - \\
 & - (\alpha a_0 - \beta a_1) \cdot C_{2n+1}^n \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n+2} + [(\alpha a_0 - \beta a_1)^2 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^2 = \\
 & = (\alpha^2 + \beta^2) \cdot \left(\frac{I_{1m}}{2}\right)^2 ; \quad (5.33)
 \end{aligned}$$

care permite calculul acestei necunoscute. Înlocuind y_{1m} în ecuația (5.29) se obține pentru unghiul φ_1 relația:

$$\varphi_1 = \arccos \frac{[\alpha^2 a_1^2 (n+1)^2 + \beta^2 a_2^2] C_{2n+1}^n \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n} + \alpha \gamma - a_2 \beta (\alpha a_0 - a_1 \beta)}{\alpha^2 + \beta^2} \cdot \frac{y_{1m}}{I_{1m}} \quad (5.34)$$

Dacă se înlocuiește valoarea lui y_{1m} în ecuația (5.28) se obține o expresie pentru φ_1 analoagă cu relația (5.34) dar nu identică. Se consideră soluția a ecuației media celor două valori obținute pentru unghiul φ_1 .

Pentru obținerea necunoscutei $y_{(2k+1)m}$ și $2k+1$ se rezolvă ecuațiile (5.32), care ne conduc la expresiile:

$$y_{(2k+1)m} = \frac{a_1 \gamma \beta}{\sqrt{2k+1}} \cdot C_{2n+1}^{n-k} \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n} \cdot y_{1m} ; \quad (5.35)$$

s-a făcut notația:

$$N_{2k+1}^2 = [a_1^2 \alpha^2 (2k+1)^2 + a_2^2 \beta^2] (n+1)^2 (\sigma_{2n+1}^n)^2 \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{4n} + 2[a_1 \alpha (\gamma - a_0 \beta) \cdot (2k+1)^2 + \beta^2 \cdot a_1^2 (n+1) \cdot \sigma_{2n+1}^n \cdot \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n} + \gamma^2 (2n+1)^2 + [\alpha a_0 (2n+1)^2 - a_1 \beta]^2]$$

Introducând soluția (5.35) în ecuațiile (5.32) se obține pentru φ_{2k+1} expresia:

$$\varphi_{2k+1} = \arcsin \left\{ \frac{(-1)^{k+1}}{N_{2k+1}} \left\{ [a_1 \alpha (2k+1) \cdot \cos(2k+1)\varphi_1 + \sin(2k+1)\varphi_1] (n+1) \cdot \sigma_{2n+1}^n \left(\frac{y_{1m}}{2}\right)^{2n} + (2n+1) \cos(2k+1)\varphi_1 - [\alpha a_0 (2k+1)^2 - a_1 \beta] \sin(2k+1)\varphi_1 \right\} \right\} \quad (5.36)$$

Pentru a determina curentul i_2 se înlocuiește relația (5.27) în (5.24), rezolvându-se această ecuație pentru i_2 se obține soluția:

$$i_2 = \sum_{k=0}^q I_{2(2k+1)m} \cdot \sin[(2k+1)\omega - \varphi_{2(2k+1)}] \quad (5.37)$$

Făcându-se identificările corespunzătoare pentru amplitudinea amonicii de ordinul $2k+1$ se obține expresia:

$$I_{2(2k+1)m} = \frac{(2k+1) \cdot y_{(2k+1)m}}{\sqrt{\alpha^2 (2k+1)^2 + \beta^2}} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (5.38)$$

respectivul pentru defazajul amonicii de ordinul $2k+1$ se obține expresia:

$$\varphi_{2(2k+1)} = \arcsin \frac{\beta \cdot \cos \varphi_{2k+1} - \alpha (2k+1) \cdot \sin \varphi_{2k+1}}{\sqrt{\alpha^2 (2k+1)^2 + \beta^2}} \quad (5.39)$$

Având determinată amplitudinea amonicilor (5.38) și defazajul acestora (5.39) sînt cunoscuți curenții din secundarul transformatorului Tr.

Determinându-se ciclul de histeresis și curba de magnetizare a miezului feromagnetic utilizat la realizarea transformatorului Tr pentru coeficienții a_0 , a_1 și a_2 din relațiile (5.19) și (5.22) s-au obținut valorile: $a_0 = 1,126$; $a_1 = 2,37$; $a_2 = 5,96 \cdot 10^{12}$. Pentru determinarea acestor coeficienți s-a considerat $n = 5$.

Pentru calculul efectiv al curentului i_2 s-a întocmit un program de calcul în limbaj BASIC și cu ajutorul unui minicalculator de tip ATARI 600 XL s-a obținut următoarele valori pentru acest curent.

$$i_2(t) = 1,72 \sin(100\pi t - 176^\circ) + 0,017 \sin(300\pi t + 6^\circ) +$$

$$+ 0,0082 \sin(500\pi t + 123^\circ) + 0,0035 \sin(700\pi t + 30^\circ) +$$

$$+ 0,003 \sin(900\pi t - 152^\circ) \text{ mA}$$

pentru $i_1(t) = 18 \sin 100\pi t \text{ mA}$;

$$i_2(t) = 3,45 \sin(100\pi t - 174^\circ) + 0,034 \sin(300\pi t + 8^\circ) +$$

$$+ 0,015 \sin(500\pi t + 121^\circ) + 0,007 \sin(700\pi t + 41^\circ) +$$

$$+ 0,004 \sin(900\pi t - 153^\circ) + 0,003 \sin(1100\pi t + 12^\circ) \text{ mA}$$

pentru $i_1(t) = 36 \sin 100\pi t \text{ mA}$;

$$i_2(t) = 5,1 \sin(100\pi t - 173^\circ) + 0,05 \sin(300\pi t + 8^\circ) +$$

$$+ 0,025 \sin(500\pi t + 124^\circ) + 0,02 \sin(700\pi t + 43^\circ) +$$

$$+ 0,015 \sin(900\pi t - 154^\circ) + 0,01 \sin(1100\pi t + 15^\circ) \text{ mA}$$

pentru $i_1(t) = 54 \sin 100\pi t \text{ mA}$;

$$i_2(t) = 12,4 \sin(100\pi t - 170^\circ) + 2 \sin(300\pi t + 9^\circ) +$$

$$+ 1,1 \sin(500\pi t + 138^\circ) + 0,8 \sin(700\pi t + 41^\circ) +$$

$$+ 0,6 \sin(900\pi t - 151^\circ) + 0,3 \sin(1100\pi t + 14^\circ) \text{ mA}$$

pentru $i_1(t) = 180 \sin 100\pi t \text{ mA}$.

Din expresiile curentului $i_2(t)$ se constată că pentru primele trei valori considerate ale curentului $i_1(t)$ transformatorul de adaptare poate fi considerat ca fiind liniar. Pentru valori mari ale curentului i_1 conținutul în armonici al curentului i_2 crește foarte mult. Pentru dispozitiv s-a impus condiția de a putea fi reglat să acționeze la un curent de 0,5 A, 1 A sau 1,5 A prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune. Calculând răspunsul transformatorului de intrare Tr și având în vedere faptul că transformatorul de curent are raportul de transformare 10 iar transformatorul de adaptare are raportul de transformare 4 se constată conținutul necamificativ în armonici al curentului din secundarul transformatorului Tr la valorile de 0,5 A, 1 A, 1,5 A ale curentului prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune. Deci rețeaua satisface condiția impusă. Dacă crește valoarea curentului prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune curentul din secundarul transformatorului de intrare Tr (fig.5.1) va avea un conținut important de armonici. Prin schema de filtru aleasă se elimină și aceste armonici deci curentul i_4 care parcurge rețeaua de execuție (fig.5.1) este proporțional practic numai cu fundamentală curentului din rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune.

Cu dispozitivul realizat (R.A.P.) pot fi sesizate defecțe care determină fundamentala curentului prin rezistorul de tratare al nulului de cel puțin 0,5A. Deci pot fi sesizate defecțe de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator dacă $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 1000 \Omega$, sau $S_0 > 100$ kVA și $R_f < 2000 \Omega$ (fig.2.14); defecțe de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă dacă $R_f < 8000 \Omega$, indiferent de puterea consumatorilor (S_0) alimentați prin linia cu defect (fig.2.21); respectiv simple puneri la pământ (scurtcircuitate monofazate) dacă $R_f < 10.000 \Omega$, indiferent de S_0 (fig.2.28).

5.1.2. Sesizarea neselectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat

Aceste protecții controlează valoarea tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune (U_{hb}) din stația de transformare, cu ajutorul unui releu maximal de tensiune. În [5] se arată că releul maximal de tensiune se reglează între (30-60)V dacă la p punere la pământ a unei faze în secundarul filtrului homopolar se obține tensiunea de 100 V.

Din fig.2.10 se constată că pentru rețeaua de medie tensiune funcționând la rezonanță tensiunea U_{hb} este mai mare de 30 V dacă: $S_0 > 100$ kVA, $k > 0,7$, $R_f < 1000 \Omega$ la un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator. La același tip de defect dacă rețeaua funcționează în regim de supracompensare la tensiunea U_{hb} obține valori mai mari de 30 V dacă: $S_0 > 100$ kVA, $k > 0,7$, $R_f < 1000 \Omega$ (fig.2.11). Pentru rețeaua ce funcționează în regim de supracompensare 20% la un astfel de defect, din fig.2.12 se constată că tensiunea U_{hb} este mai mică de 30 V dacă $R_f > 1000 \Omega$ indiferent cât este puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect. De asemenea din fig.2.13 se constată că valoarea tensiunii U_{hb} depășește 30 V numai dacă $S_0 > 1000$ kVA, $R_f = 0$, pentru rețeaua de medie tensiune funcționând cu nulul izolat. Din cele prezentate rezultă că reglând releul maximal de tensiune la 30 V, un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator poate fi sesizat practic numai în rețele ce funcționează la rezonanță sau într-un regim de supracompensare maximă la. Dar, datorită altor dezavantaje rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere funcționează într-un regim de supracompensare mai mare de 10% [62], [63], deci un astfel de defect este sesizat în puține cazuri. Pentru a mări numărul cazurilor în care acest defect poate

fi necesară este necesară coborîrea reglajului releului maximal de tensiune. Datorită prezentei consumatorilor deformați în rețeaua de medie tensiune și a nesimetricei acestora în secundarul filtrului monopolar de tensiune poate apărea o tensiune de 4-5 V în regiunea normală de funcționare, care are un conținut pronunțat în armonici superioare. Prin introducerea unui filtru cu ajutorul căruia se elimină armonicile superioare din tensiunea U_{hb} , reglajul releului maximal de tensiune poate fi coborît la 7-8 V. Drept filtru pentru eliminarea armonicilor superioare poate fi utilizat cel prezentat în fig.5.1, adaptat pentru releul de tensiune. Prin coborîrea reglajului releului maximal de tensiune la 7-8 V se asigură eliminarea unui defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator, pentru o rețea funcționând în regim de supracompensare 20% dacă: $S_0 > 50$ kVA, $R_f < 1000 \Omega$, respectiv pentru o rețea cu nulul izolat dacă $S_0 > 700$ kVA și $R_f < 500 \Omega$. Avînd în vedere faptul că rețelele de medie tensiune cu nulul izolat alimentează consumatori cu puteri mici rezultă că la aceste rețele chiar prin coborîrea reglajului releului maximal de tensiune la 6-8 V aceste tipuri de defecte nu pot fi sesizate decât dacă punerea la pământ este netă (fig.2.13).

Un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre care se determină pentru tensiunea U_{hb} valori mai mari de 30 V dacă rețeaua funcționează la rezonanță, cînd $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 5000 \Omega$ (fig.2.17); dacă rețeaua funcționează în regim de supracompensare 10%, cînd $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 3000 \Omega$ (fig.2.18); dacă rețeaua funcționează în regim de supracompensare 20%, cînd $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 1500 \Omega$ (fig.2.19). În situația în care releul maximal de tensiune este reglat la 7-8 V un astfel de defect este sesizat dacă rețeaua funcționează într-un regim de supracompensare de maxim 20%, cînd $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 5000 \Omega$. Dacă rețeaua de medie tensiune este cu nulul izolat tensiunea U_{hb} obține valori de peste 30 V la un astfel de defect dacă $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 3000 \Omega$ (fig.2.21), respectiv de peste 8 V cînd $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 1500 \Omega$. Din cele prezentate rezultă că un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă este sesizat necesitiv în mai multe cazuri decât un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator.

Pentru o simplă punere la pământ se constată că într-o rețea funcționând la rezonanță tensiunea U_{hb} este mai mare de 30 V dacă $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 5000 \Omega$ (fig.2.24). Cînd rețeaua funcționează într-un regim de supracompensare 10% tensiunea U_{hb} este mai mare de 30 V dacă $S_0 > 50$ kVA și $R_f < 3000 \Omega$ (fig.2.25), iar cînd rețeaua funcționează în regim de supracompensare 20% tensiunea U_{hb} este mai

mare de 30 V dacă $S_0 < 50$ kVA și $R_g < 1500 \Omega$ (fig.2.26). Într-o rețea cu nulul izolat tensiunea U_{nb} la o simplă punere la pământ depășește 30 V dacă $S_0 > 50$ kVA și $R_g < 400 \Omega$ (fig.2.27). Dacă releul maximal de tensiune este reglat la 7-8 V într-o rețea cu nulul tratat prin bobini de stingere care funcționează într-un regim de supracompensare maximă 20%, un astfel de defect este sesizat când $S_0 > 50$ kVA și $R_g < 5000 \Omega$. Într-o rețea cu nulul izolat releul maximal de tensiune fiind reglat la 7-8 V un astfel de defect poate fi sesizat dacă $S_0 > 50$ kVA și $R_g < 1500 \Omega$.

Din cele prezentate rezultă că un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator este cel mai greu de sesizat. Cu ajutorul releului pentru puneri la pământ (RAP-1) în rețelele de medie tensiune, cu nulul tratat prin rezistor poate fi sesizat un astfel de defect dacă S_0 depășește 50 kVA și $R_g > 1000 \Omega$. Pentru ca același defect să fie sesizat și într-o rețea de medie tensiune cu nulul tratat prin bobini de stingere care funcționează supracompensat maxim 20%, în aceleași condiții de defect, este necesar să se coboară reglajul releului maximal de tensiune la 7-8 V, deci în aceste rețele este necesar să se introducă relele maxime de tensiune, pentru controlul tensiunii homopolare a barelor de medie tensiune, prevăzute cu filtru care să permită eliminarea armonicilor superioare, deci să se controleze fundamentală tensiunii U_{nb} . La rețelele de medie tensiune cu nulul izolat chiar prin coborârea reglajului releului maximal de tensiune la 7-8 V, astfel de defecte pot fi sesizate în puține cazuri ($S_0 > 700$ kVA, R_g sub 500Ω). Un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre surse sau o simplă punere la pământ este sesizat într-o rețea cu nulul tratat prin rezistor dacă $R_g < 10000 \Omega$, într-o rețea cu nulul tratat prin bobini de stingere funcționând supracompensat maxim 20%, dacă $R_g < 5000 \Omega$, iar într-o rețea cu nulul izolat dacă $R_g < 1500 \Omega$, puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect fiind mai mare de 50 kVA și releul maximal de tensiune reglat la 7-8 V. Deci, într-o rețea cu nulul izolat o punere la pământ nu poate fi sesizată decât atunci când rezistența de trecere la locul de defect a căzut sub 1500Ω . Se constată că în rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor prin introducerea releului (RAP-1) care controlează fundamentală curentului din rezistorul de tratare a nulului, pot fi sesizate defecte de tip conductor întrerupt și căzut la pământ respectiv simple puneri la pământ (scurtcircuite monofazate) care au loc prin rezistență de trecere mai mare decât în rețelele cu nulul tratat prin bobina de stingere.

5.2. Sesiizarea selectivă a punerilor la pământ în rețele de medie tensiune

Protecțiile folosite în rețele electrice de medie tensiune pentru detectarea selectivă a punerilor la pământ sînt de tipuri speciale. În principiile lor de funcționare s-a avut în vedere faptul că valorile curenților de defect în aceste cazuri sînt în general mult mai mici decît curenții de sarcină nominali și din acest motiv nu pot fi sesizați de protecțiile maxime de curent ale liniilor electrice respective. Conform prescripțiilor protecții selective contra punerilor la pământ se prevăd în stații de transformare care au cel puțin trei linii și unde consumatorii alimentați nu permit deconectări succesive în vederea stabilirii liniei cu defect.

5.2.1. Sesiizarea selectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat

În rețelele compensate deoarece la locul de defect trece un curent reprezentînd numai cîteva procente din curentul de punere la pământ al rețelei (practic nu se realizează condiția de rezonanță deoarece și capacitățile liniilor respectiv bobina de tratare a nulului nu sînt elemente ideale, deci prezintă și rezistență), din acest motiv se utilizează relee de tip special. De exemplu releul direcțional de procese tranzitorii (R.D.T.) funcționează numai în timpul procesului tranzitoriu al unei puneri la pământ, putînd sesiza atât punerile la pământ trecătoare cît și cele de durată. Acest relov poate fi folosit contra punerilor la pământ în rețele cu nulul izolat sau compensat cu un curent capacitiv mai mare de 3A, chiar și în stații cu mai puțin de trei plecări. Releul direcțional de proces tranzitoriu controlează faza dintre tensiunea homopolară și curentul de pe linie în prima semiperioadă a procesului tranzitoriu. În timpul procesului tranzitoriu care are loc în momentul unei puneri la pământ prima semiperioadă a curentului homopolar tranzitoriu este în fază cu tensiunea homopolară [5], [86], [95], [96]. Amplitudinea curentului tranzitoriu este maximă pe linia cu defect și este de cîteva ori mai mare decît a curentului stabilizat. Deoarece curentul prin bobină are o creștere mai lentă decît curentul capacitiv în primul moment acesta nu influențează procesul tranzitoriu. În acest interval de timp rețeaua nu este compensată. În lucrarea [96] se arată că R.D.T.-ul nu lucrează corect întotdeauna atunci cînd se conectează manual o linie care are o punere la pământ persistentă astfel din 107 conexiuni manuale ale liniilor pe care există o punere la pământ persis-

tentă numai în 19 cazuri RDT-ul a funcționat corect, ceea ce reprezintă 17,7% din total. De asemenea s-a constatat că în cazurile în care punerea la pământ are loc printr-o rezistență de trecere mare R.D.T.-ul nu funcționează corect, neselectându-se linia cu defect. Din 202 puneri la pământ în 14 cazuri RDT-ul nu a stabilit selectiv linia cu defect deoarece aceste puneri la pământ au avut loc prin rezistență de trecere mare.

Un alt releu special pentru selectarea punerilor la pământ în rețele de medie tensiune este RPP-ul care controlează conținutul în armonici al curentului homopolar de pe fiecare linie. Curentul homopolar al liniei cu defect are cel mai ridicat conținut în armonici, dacă punerea la pământ este netă, deoarece curenții capacitivi ai tuturor liniilor se adună în locul punerii la pământ și circulează încumate pe linia cu defect. Faptul că la o punere la pământ apar curenți de armonici superioare indiferent dacă rețeaua este compensată sau are nulul izolat, permite utilizarea RPP-ului pentru sesizarea acestora în ambele tipuri de rețele. În lucrarea [90] se arată că din totalul de 311 puneri la pământ câte au avut loc într-un an de zile pe liniile a două stații de transformare în 69 de cazuri ceea ce reprezintă 22% din total RPP-ul nu a avut condiții de funcționare, deoarece punerea la pământ a avut loc printr-o rezistență de trecere mare.

O schemă aproximativă de calcul a unei simple puneri la pământ este prezentată în fig.5.10 în care s-au considerat parametrii transversali ai liniei (față de pământ) concentrați la locul de defect [62], [63]. În această schemă Z_1 , Z_2 și Z_0 reprezintă impedanțele de secvență ale întregii rețele, văzute de la locul de defect, U_f este tensiunea de fază de la locul de defect dinaintea apariției defectului care de obicei se consideră egală cu cea a barelor de medie tensiune din stația de transformare, iar Z'_1 , Z'_2 , Z'_0 reprezintă

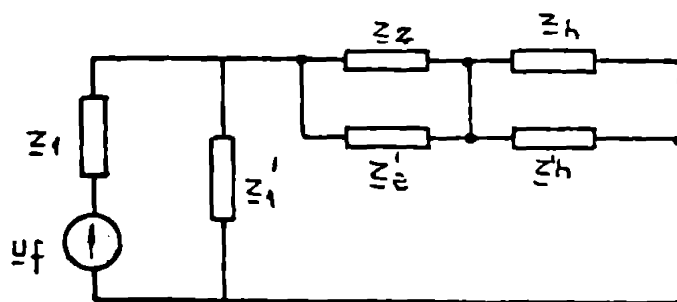


Fig.5.10. Schemă de calcul a unei simple puneri la pământ

impedanțele transversale ale întregii rețele de medie tensiune legate galvanic. Deoarece parametrii de secvență directă și inversă longitudinali sînt obișnuit mult mai mici decît cei transversali, cei transversali se neglijează, de asemenea parametrii de secvență di-

impedanțele transversale ale întregii rețele de medie tensiune legate galvanic. Deoarece parametrii de secvență directă și inversă longitudinali sînt obișnuit mult mai mici decît cei transversali, cei transversali se neglijează, de asemenea parametrii de secvență di-

rectă și inversă sînt mult mai mici decît cei de secvență homopolară, deci în ochena din fig.5.1a o pondere mare o au parametrii de secvență homopolară. În cazul în care nulul artificial se realizează prin transformatorul de servicii interne (T.S.I.) schema de secvență homopolară a rețelei este cea prezentată în fig.5.1b. În această schemă parametri

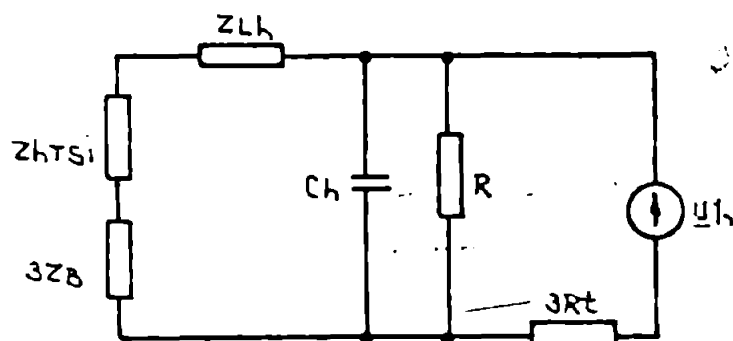


Fig.5.11. Schema de secvență homopolară a rețelei

au următoarea semnificație:
 Z_{HTSI} - impedanța de secvență homopolară a transformatorului de creere a nulului;
 Z_B - impedanța bobinei de tratare a nulului;
 Z_{Lh} - impedanța de secvență homopolară a liniei pînă la locul de defect; C_h și R - capacitatea respectiv rezistența conductor de fază pămînt; R_f - rezistența de trecere la locul de defect. Impedanța echivalentă schemei din fig.5.11 văzută de la bornele sursei este impedanța homopolară (Z_{ho} în paralel cu Z_{Lh} din fig.5.1a) și se determină cu relația:

$$Z_{ho} = \frac{Z_{Lh} \cdot Z_{eq}}{Z_{Lh} + Z_{eq}} = 3 R_f + \frac{(Z_{Lh} + Z_{HTSI} + 3Z_B) \cdot \frac{R}{1 + j\omega C_h R}}{Z_{Lh} + Z_{HTSI} + 3Z_B + \frac{R}{1 + j\omega C_h R}} \quad (5.4a)$$

Considerînd pentru parametrii din relația (5.4a) la frecvența de 50 Hz următoarele valori [120]: $Z_{HTSI} = (8 + j27.4)\Omega$; $Z_{Lh} = (1.62 + j2.28)\Omega$; $\frac{1}{\omega C_h} = 338\Omega$; $Z_B = (0.5 + j103.5)\Omega$; $R = 20.000\Omega$; s-au calculat valorile impedanței echivalente Z_{ho} funcție de frecvență și de rezistența de trecere la locul de defect. Valorile obținute sînt prezentate în tabelul nr.5.1. Valoarea aleasă pentru impedanța bobinei corespunde regimului de rezonanță.

Tabelul 5.1. Impedanța Z_{ho} pentru rețea la rezonanță

R_f [Ω]	0	10	50	100	500	1000	2000	5000
50	4737+ +138	4317+ +138	4937+ +138	5087+ +138	6237+ +138	7737+ +138	10787+ +138	19787+ +138
100	7-j225	5.7- -1225	257- -1225	307- -1225	1507- -1225	3007- -1225	6007- -1225	15007- -1225
150	-j127	30- -1127	150- -1127	300- -1127	1500- -1127	3000- -1127	6000- -1127	15000- -1127
200	-j91	20- -191	150- -191	300- -191	1500- -191	3000- -191	6000- -191	15000- -191
250	-j68	30- -j68	150- -j68	300- -j68	1500- -j68	3000- -j68	6000- -j68	15000- -j68

Acest tabel se observă că pentru frecvența de 50 Hz impedanța monopolară echivalentă are aproximativ caracter rezistiv chiar pentru rezistență de trecere la locul de defect nulă pe când la celelalte frecvențe la $R_g=0$ are caracter capacitiv.

Deci rețeaua funcționează în regim de supracompensare la dependența impedanței monopolare echivalente este prezentată în tabelul nr.5.2.

Tabelul 5.2. Impedanța Z_{00} pentru rețea supracompensată la

f (Hz) \ R_g	0	10	50	100	500	1000	2000	5000
50	881+ +j12795	911+ +j12795	1031+ +j12795	1131+ +j12795	2331+ +j12795	3881+ +j12795	6381+ +j12795	15881+ +j12795
100	6,64- -j1218	36,6- -j1218	156- -j1218	306- -j1218	1506- -j1218	3006- -j1218	6006- -j1218	15006- -j1218
150	-j126-	30- -j126	150- -j126	300- -j126	1500- -j126	3000- -j126	6000- -j126	15000- -j126
200	-j90	30- -j90	150- -j90	300- -j90	1500- -j90	3000- -j90	6000- -j90	15000- -j90
250	-j71	30- -j71	150- -j71	300- -j71	1500- -j71	3000- -j71	6000- -j71	15000- -j71

În cazul în care rețeaua funcționează în regim de supracompensare 200 valorile obținute pentru impedanța monopolară echivalentă sînt prezentate în tabelul nr.5.3

Tabelul nr.5.3. Impedanța Z_{00} pentru rețea supracompensată 200

f (Hz) \ R_g	0	10	50	100	500	1000	2000	5000
50	233+ +j1318	263+ +j1318	383+ +j1318	563+ +j1318	1733+ +j1318	3233+ +j1318	6233+ +j1318	15233+ +j1318
100	2-j246	32- -j246	152- -j246	302- -j246	1502- -j246	3002- -j246	6002- -j246	15002- -j246
150	0,2- -j131	30,2- -j131	150,2- -j131	300,2- -j131	1500- -j131	3000- -j131	6000- -j131	15000- -j131
200	-j92	30- -j92	150- -j92	300- -j92	1500- -j92	3000- -j92	6000- -j92	5000- -j92
250	-j72	30- -j72	150- -j72	300- -j72	1500- -j72	3000- -j72	6000- -j72	15000- -j72

Din tabelele 5.1, 5.2 și 5.3 rezultă că pentru frecvențele superioare impedanța monopolară echivalentă practic nu depinde de regimul în care funcționează rețeaua, dar pentru fundamentală această impedanță are valoarea cea mai scăzută la rețeaua supracompensată 200. Deci dependența acestei impedanțe funcție de rezistența de trecere la

locul de defect este mai pronunțată ca oit regiul în care funcționează rețeaua este mai îndepărtat de rezonanță.

În tabelul nr.5.4 se dă creșterea modulului impedanței homopolare echivalente funcție de rezistența de trecere și frecvență, față de impedanța homopolară echivalentă la $R_g=0$, pentru rețeaua supracondensată 20.

Tabelul 5.4. Modulul impedanței Z_{ho} raportat la Z_{ho} pentru $R_g=0$

$R_g [\Omega]$ \ $f [Hz]$	10	50	100	500	1000	2000	5000
50	1,004	1,025	1,071	1,627	2,61	4,76	11,42
100	1,008	1,17	1,58	6,18	12,24	24,41	60,98
150	1,026	1,52	2,5	11,5	22,9	45,8	114,5
200	1,052	1,91	3,41	16,3	32,6	65,2	163
250	1,083	2,31	4,28	20,9	41,68	83,3	208,3

Din tabelul 5.4 se observă că la o rezistență de trecere la locul de defect de 50 Ω pentru armonica a 5-a impedanța homopolară echivalentă a crescut de 2,31 ori, deci armonica respectivă a scăzut corespunzător în curent. Aceeași creștere a impedanței homopolare aferente fundamentalei se obține pentru o rezistență de trecere la locul de defect de 1000 Ω . Pentru armonica a 3-a creșterea impedanței homopolare la o rezistență de trecere de 500 Ω este identică cu creșterea impedanței homopolare echivalente corespunzătoare fundamentalei la o rezistență de trecere la locul de defect de 5000 Ω . Avînd în vedere creșterea impedanței homopolare echivalente funcție de rezistența de trecere la locul de defect diferit pentru fundamentale și armonici rezultă că pentru rezistență de trecere mai mare de 50 Ω (care pentru rețele de medie tensiune pot fi chiar prizele de pământ ale stîlpilor) la locul de defect nivelul armonicilor în curent scade mult, deci există posibilitatea ca un rolu care funcționează comparînd armonicile din curenții homopolari ai liniilor să nu realizeze un astfel de defect. Aceasta depinde și de conținutul în armonici al tensiunii. Pentru rezistență de trecere la locul de defect mai mari de 500 Ω armonicile din curentul homopolar sînt practic nule, deoarece impedanța homopolară corespunzătoare armonicilor a 3-a crește de 11,5 ori, iar pentru armonica a 5-a de 20,9 ori față de cea corespunzătoare unei rezistențe de trecere nule. La o punere la pământ printr-o rezistență de trecere mare datorită conținutului

scăzut în amonici a curentului homopolar al liniei cu defect releul de sesizare a punerilor la pământ (RPP) poate declanșa o linie fără defect deoarece curentul homopolar al acestuia poate avea un conținut mai ridicat în amonici. Astfel de situații s-au înregistrat în exploatare [9e]. Din acest motiv este foarte important ca prin instalația de semnalizare generală a punerilor la pământ să fie sesizat un astfel de defect. Pentru aceasta este necesară micșorarea tensiunii de reglaj a releului maximal de tensiune homopolară, conform celor precizate în paragraful 5.1.2.

Dacă defectul este de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă situația este echivalentă din punct de vedere al amonicilor conținute de curentul homopolar al liniei cu defect, cu cazul unei simple puneri la pământ. Dar dacă defectul este conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator conținutul în amonici al curentului homopolar prin linia cu defect este mai scăzut decât la o simplă punere la pământ, chiar în cazul în care conductorul întrerupt este pus net la pământ. Deci un astfel de defect nu poate fi sesizat selectiv decât în cazuri foarte rare.

5.2.2. Sesizarea selectivă a punerilor la pământ în rețele cu nulul tratat prin rezistor

În rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor s-a introdus protecția homopolară direcțională pentru sesizarea selectivă a punerilor la pământ prin rezistență de trecere mare. La această protecție este folosit releul de curent homopolar și direcțional [61]. Acest releu controlează defazajul dintre fundamentala curentului homopolar al liniilor racordate pe același sistem de bare și fundamentala curentului ce se închide prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune. Pentru extragerea fundamentalei curentului ce se închide prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de medie tensiune se folosește un filtru ce are schema prezentată în fig.5.1.

În fig.5.12 este prezentată schema releului direcțional homopolar. În această schemă notațiile au următoarea semnificație: PR_1 , PR_2 - punți redresoare; R_0 - releu magnetoelectric; Tr_1 , Tr_2 - transformatoare sumatoare; L_3 , L_4 , L_{34} , C - inductivitățile respectiv capacitățile filtrului trece-jos; I_H - curentul homopolar al liniei cu defect; U_R - tensiunea rezistorului de tratare a nulului rețelei.

Din fig.5.12 se constată că tensiunea U_1 este proporțională cu suma în serie a înfățișărilor magnetice create de curentul I_H respectiv I , iar tensiunea U_2 este proporțională cu diferența

fazorială a înălțărilor magnetice create de cei doi curenți.

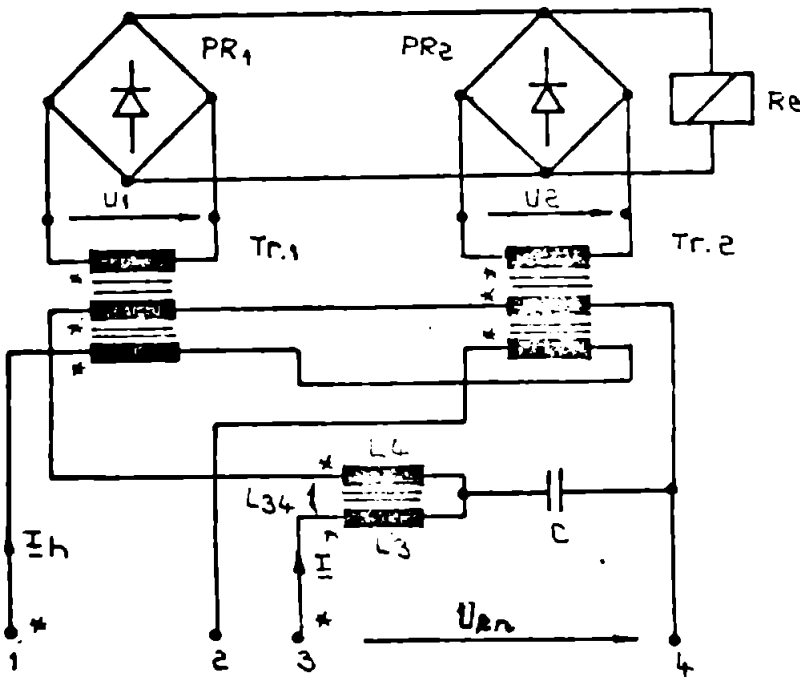


Fig.5.12. Schema releului de curent homopolar direcțional

$a_1 + a_2 = \text{ct.}$, produsul $a_1 a_2$ este maxim dacă $a_1 = a_2$ [106].

Pentru ca valoarea curentului ce se închide prin releul R_0 (fig.5.12) să depindă cât mai mult de defasajul α dintre curentul I_h și tensiunea U_{R_n} este necesar ca înălțărilor magnetice create de acestea în cele două transformatoare Tr_1 și Tr_2 să fie egale și de aceeași să fie egale între ele. Deci cele două transformatoare Tr_1 și Tr_2 este necesar să fie identice. Releul este astfel dimensionat însoț la un curent de 1 A prin rezistorul de tratare a nulului rețelei, respectiv valoarea de 1 A a curentului homopolar al liniei și defasajul dintre cei doi curenți sub 90° , releul să acționeze. Detalii privind dimensionarea și realizarea acestei protecții sînt prezentate în lucrările [61], [117]. Cu această protecție în rețelele cu nulul tratat prin rezistor sînt sesizate defecte de tip conductor intrerupt și cîșut la pîmînt spre consumatori dacă rezistența de trecere la locul de defect este sub 2000Ω și puterea consumatorilor alimentată prin linia cu defect este peste 50 kVA (fig.2.14). Defecte de tip conductor intrerupt și cîșut la pîmînt spre cursă, respectiv simple puneri la pîmînt pot fi sesizate dacă rezistența de trecere la locul de defect nu depășește 7000Ω .

Din cele prezentate rezultă că astfel de defecte în rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor sînt în majoritatea cazurilor sesizabile, pe cînd în rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin bobîni de stingere sau izolă, în special defectele de

Considerînd doi factori a_1, a_2 defazați între ei cu unghiul diferența modurilor sunăi, respectiv diferenței celor doi factori este:

$$\begin{aligned} a &= |a_1 + a_2| - |a_1 - a_2| = \\ &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cdot \cos \alpha} - \\ &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cdot \cos \alpha} ; \end{aligned}$$

Din această relație se observă că dependența lui a de α este maximă dacă produsul $a_1 a_2$ este maxim. Acceptînd suma

tipul conductor intrerupt și căzut la pământ spre consumator sînt greu de sesizat selectiv. Chiar și defectele de tipul conductor intrerupt și căzut la pământ spre sursă respectiv simplele puneri la pământ în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat în majoritatea cazurilor nu pot fi sesizate selectiv. Aceste defecte rămînînd nesesizate în timp mai îndelungat se transformă în alte tipuri de defecte cu consecința mai gravă asupra funcționării rețelei de medie tensiune. Deci din acest punct de vedere rețeaua cu nulul tratat prin rezistor prezintă o siguranță în funcționare mai mare motiv pentru care este recomandată extinderea ei. La ora actuală în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor dispozitivul pentru sesizarea defectelor prin rezistență de trecere mare (RAP-1) este utilizat ca protecție de rezervă [150].

CONCLUZII

I. Problemele abordate în cadrul tezei se referă în principal la: relevarea unor aspecte caracteristice ale diferitelor soluții de tratare a nulului rețelelor de medie tensiune în legătură cu defectele luate în considerare și implicațiile acestora asupra siguranței în funcționare; dezvoltarea calculului unor nesimetrii de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ din rețele trifazate considerându-se cazul mai general când sistemul de tensiuni de alimentare este nesimetric, și se ține seama de parametri transversali ai rețelei la locul de defect; dezvoltarea unor metode de modelizare pentru studiul acestor nesimetrii; realizarea unor dispozitive care să permită sesizarea unor defecte ce produc un dezechilibru scăzut al tensiunilor și curenților; efectuarea de măsurători în rețeaua reală de medie tensiune pentru verificarea rezultatelor obținute.

Se arată că funcția de nodul de tratare al nulului rețelei de medie tensiune, defectele de tip conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator, spre surse respectiv simplele puneri la pământ prin rezistență de trecere mare produc tensiuni homopolare de valori diferite la barele de medie tensiune ale stației de transformare ce alimentează linia cu defect. De asemenea curenții ce se închid prin impedanța de tratare a nulului are valori diferite. Se scoate în evidență faptul că rețeaua cu nulul tratat prin rezistor permite sesizarea acestor tipuri de defecte în condiții mai bune.

Faptul că rezultatele obținute în studiul defectelor de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ (caz particular simple puneri la pământ), pentru cazul considerat, prin cele trei metode (analitic, modelizare, măsurători în rețeaua reală) nu diferă cu mai mult de 15% confirmă valabilitatea rezultatelor obținute. Comparând rezultatele obținute prin metoda modelizării cu cele din măsurători efectuate în rețeaua reală se constată diferențe în general sub 5%. Desigur aceste diferențe depind în mare măsură de precizia realizării modelului de rețea. Este posibil ca uneori eroarea introdusă prin realizarea modelului de rețea să conducă la rezultate mai apropiate de cele reale decât calculul analitic. În calculul analitic ca și în realizarea modelului intervin parametri rețelei care nu pot fi apreciați în general cu o precizie mai mare de 10%. Parametri transversali ai rețelei ce modifică funcția de umiditate, poluare, etc., de asemenea impedanța homopolară a rețelei electrice este funcție de parametrii electricei

ai solului care pentru aceleași sol au valori diferite dacă solul este umed sau uscat.

Prin studiul efectuat s-a evidențiat faptul că pentru un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator un rol important în stabilirea valorii tensiunii monopolare a barelor de medie tensiune (U_{hb}) în care este racordată linia cu defect o au: rezistența de trecere la locul de defect R_g ; reactanța capacitivă a rețelei în spatele defectului X_g^i ; puterea și caracterul consumatorilor alimentați prin linia cu defect S_g, k ; în momentul apariției defectului. În cazul tratării neutrului cu bobina de stingere, considerînd consumatorul alimentat prin linia cu defect ca fiind static ($Z_{oi} = Z_{od}$) erorile cresc pe măsură ce supracompensarea rețelei crește. În cazul considerat acceptînd $Z_{oi} = Z_{od}$ erorile care se fac sînt: dacă rețeaua funcționează la rezonanță sub 15% (fig.2.4), supracompensat la 5% sub 20% (fig.2.5), iar supracompensat 20% sub 25% (fig.2.6). Aceste erori nu sînt influențate prea mult de reactanța X_g^i și nici de puterea consumatorilor S_g . Pentru ca prin modelizare să se obțină rezultate cât mai apropiate de cele reale este necesar să se păstreze și natura consumatorului în realizarea modelului de rețea. Dacă reactanța X_g^i este sub 10000 e eroare în aprecierea acestuia de 50% poate introduce erori în determinarea tensiunii U_{hb} de pînă la 40%, iar cînd X_g^i este mai mare de 30.000 aceeași eroare în aprecierea acestuia determină erori mai mici de 15% în determinarea tensiunii U_{hb} , pentru cazul luat în considerare. Din acest motiv este foarte important să se cunoască natura liniei (aeriană sau în cablu) din spatele defectului. Rezistența de trecere la locul de defect influențează cel mai puțin tensiunea U_{hb} dacă rețeaua de medie tensiune funcționează la rezonanță. Importanța acestui parametru crește pe măsură ce supracompensarea rețelei crește.

La același tip de defect dacă rețeaua funcționează cu nulul izolat, la determinarea valorii tensiunii U_{hb} un rol important îl are rezistența de trecere la locul de defect și puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect. Pentru cazul analizat dacă rezistența de trecere la locul de defect este mai mare de 500 și puterea consumatorilor este peste 600 kVA tensiunea U_{hb} rămîne practic constantă. La aceste tipuri de rețele la calculul tensiunii U_{hb} se poate neglija caracterul consumatorilor alimentați prin linia cu defect (k) și reactanța capacitivă X_g^i a liniei în spatele defectului fîră a face erori mai mari de 15% (fig.2.13).

Când rețeaua este cu nulul tratat prin rezistor curentul I_n ce se închide prin acesta la un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator este influențat în principal de rezistența de trecere la locul de defect și de puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect. Și în acest caz dacă R_f este mai mare de 500Ω curentul I_n rămâne practic constant funcție de puterea S_c pentru valori peste 600 kVA (fig.2.14). La puteri relativ mici ale consumatorului S_c (sub 100 kVA) curentul I_n este influențat și de reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului X_C dacă aceasta este sub 10000Ω , în cazul analizat.

Din punct de vedere al sesizării unui defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator se evidențiază faptul că în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor introducându-se releul direcțional homopolar prevăzut cu filtru trece-jos, deci care controlează fundamentală curenților homopolari ai liniilor de medie tensiune și fundamentală curentului I_n precum și defazajul dintre aceștia, se arată că pot fi sesizate defecte pentru care $R_f < 2000 \Omega$ și $S_c > 50 \text{ kVA}$. În rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat un astfel de defect practic nu poate fi sesizat selectiv controlându-se conținutul în armonici al curentului homopolar al liniei cu defect (tabelul 4.3 și 4.6). În aceste rețele sesizarea acestui defect neselectiv impune introducerea unor relee de tensiune cu reglaj scizut (de $7-8 \text{ V}$) prevăzute cu filtru trece-jos astfel încât să se controleze numai fundamentală tensiunii U_{nb} . Prin introducerea acestor relee de tensiune în cazul în care rețeaua funcționează cu nulul izolat un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator poate fi sesizat dacă $R_f < 400 \Omega$ și $S_c > 50 \text{ kVA}$. Dacă rețeaua funcționează supracompensat maxim 20% acest tip de defect este sesizat neselectiv cu releul special de tensiune dacă $R_f < 5000 \Omega$ și $S_c > 50 \text{ kVA}$.

Se constată faptul că în majoritatea cazurilor un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă poate fi tratat ca o simplă punere la pământ. Excepție fac rețelele de medie tensiune ce funcționează în rezonanță. Cu acest regim de funcționare al rețelei de medie tensiune este întâlnit destul de rar, poate fi studiat un defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă ca o simplă punere la pământ. Pentru rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere tensiunea U_{nb} la un astfel de defect depinde de rezistența de trecere la locul de defect R_f , reactanța capacitivă a liniei în spatele defectului X_C și de puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect S_c . Dintre acești

parametrii ponderea cea mai mare o are rezistența de trecere la locul de defect (fig.2.17 - 2.19 și fig.2.24 - 2.26). Dacă reactanța X_C este sub 1000Ω neglijarea acestora poate conduce la erori de peste 50% în determinarea tensiunii U_{hb} , la valori mari ale rezistenței de trecere la locul de defect ($R_f < 3000 \Omega$). Această eroare depinde desigur și de regimul de funcționare al rețelei de medie tensiune. Eroarea este mai mare dacă rețeaua este supracompensată mai puternic (fig.2.19 și 2.26).

În cazul rețelei cu nulul izolat sau tratat prin rezistor reactanța X_C influențează foarte puțin tensiunea U_{hb} respectiv curentul I_n . Neglijarea acestora în determinarea tensiunii U_{hb} și a curentului I_n conduce la erori în general sub 10% (fig.2.20, 2.21, 2.27, 2.28).

La calculul curentului I_n pentru valori mari ale rezistenței de trecere la locul de defect este necesar să se țină seama și de tensiunea homopolară a barelor de medie tensiune existentă înaintea apariției defectului. Astfel, erorile ce se fac pot deveni mari (tabelul 4.7) chiar dacă tensiunea homopolară a barelor de medie tensiune înaintea apariției defectului este sub 5% din tensiunea de fază. Pentru R_f mai mare de 1000Ω la calculul curentului I_n se va ține seama de această tensiune homopolară.

Din punct de vedere al sesizării acestui tip de defect se evidențiază faptul că în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor el poate fi sesizat selectiv cu ajutorul releului direcțional homopolar [61].

În rețelele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau cu nulul izolat un astfel de defect nu poate fi sesizat selectiv dacă R_f este mai mare de 300Ω (tabelul 4.2, 4.5 și 5.4). Aceste defecțe pot fi sesizate neselectiv într-o rețea de medie tensiune cu nulul tratat prin bobină de stingere dacă supracompensarea acestora este de maxim 20%, când $R_f < 5000 \Omega$, numai în cazul în care releul maximal de tensiune controlează fundamentală tensiunii U_{hb} și are reglajul (7-8)V. Același defect în rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor, cu ajutorul dispozitivului RAP-1 poate fi sesizat când $R_f < 10000 \Omega$. Într-o rețea cu nulul izolat chiar în cazul utilizării releului maximal de tensiune prevăzut cu filtru trece-jos (reglaj 7-8V) acest defect nu poate fi sesizat decât pentru $R_f < 1500 \Omega$.

Din cele prezentate teoretic și ținând seama de valorile determinate pentru cazurile concrete considerate rezultă că rețeaua de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor prezintă o siguranță

mai mare în exploatare decât rețelele de medie tensiune cu nădul tratat prin bobină de stingere sau izolat, din punct de vedere al sesizării defectelor analizate. Funcționarea rețelei de medie tensiune timp îndelungat cu un defect de acest tip poate conduce la accidente prin electrocutare [73] precum și la transformarea acestora în defecte nete sau la extinderea lor.

Modelul de rețea realizat permite analiza diverselor situații în care pot apărea astfel de defecte, obținându-se rezultate mult mai rapid decât prin metoda analitică. De asemenea cu ajutorul modelului se pot verifica și protecțiile ce sesizează astfel de defecte.

Pentru modelul electrodinamic de rețea și pentru dispozitivul de sesizare a punerilor la pământ prin rezistență de trecere mare (RAP-1) s-au obținut brevete de invenție [123], [124].

II. Principalele contribuții originale aduse în legătură cu problemele abordate sînt prezentate în continuare.

1. Stabilirea expresiilor de calcul ai curenților și ai tensiunilor dintr-o rețea trifazată la apariția unui scurtcircuit luîndu-se în considerare nesimetria sistemului de tensiuni înaintea apariției scurtcircuitului, precum și nesimetria parametrilor transversali ai rețelei de medie tensiune, considerați concentrați la locul de defect.

2. Stabilirea expresiilor de calcul ai curenților și tensiunilor în cazul unui scurtcircuit monofazat utilizîndu-se factorii și operatorii complecși de nesimetrie. Utilizarea acestor operatori permite realizarea schemelor de secvență independente în cazul în care sistemul de tensiuni este nesimetric și impedanțele sînt dezechilibrate.

3. Evidențierea faptului că utilizarea vectorilor ortogonali în studiul defectelor multiple dacă nesimetria parametrilor transversali ai rețelelor de medie tensiune este de același ordin de mărime cu rezistența de trecere la locul de defect conduce la erori importante.

4. În cazul defectului de tip conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator se menționează contribuții referitoare la:

4.1. Conceperea și realizarea unui program de calcul în limbaj FORTRAN, utilizînd metoda componentelor simetrice.

4.2. Stabilirea influenței pe care o are caracterul și puterea consumatorilor alimentați prin linia cu defect în determinarea valorii tensiunii U_{hb} și a curențului I_n .

4.3. Stabilirea influenței reactanței transversale a liniei în opoziție defectului X_g și a rezistenței de trecere la locul de defect R_g în determinarea valorii tensiunii U_{hb} și a curențului I_n .

4.4. Influența tratării nulului rețelei de medie tensiune asupra tensiunii U_{hb} și a curentului I_n .

5. La defecte de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă, respectiv la simple puneri la pământ se menționează contribuții referitoare la:

5.1. Conceperea și realizarea unui program de calcul în limbaj FORTRAN utilizând metoda componentelor simetrice.

5.2. Stabilirea faptului că la aceste defecte valoarea tensiunii U_{hb} și a curentului I_n este influențată în primul rând de rezistența de trecere la locul de defect R_f și că la valori mari ale acesteia reactanța transversală a liniei în spatele defectului X_f influențează mult valoarea tensiunii U_{hb} și a curentului I_n .

5.3. Posibilitatea tratării defectului conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă ca o simplă punere la pământ cu excepția cazului în care rețeaua de medie tensiune funcționează în regiune de rezonanță.

6. La utilizarea metodei modelizării pentru studiul acestor defecte s-au adus următoarele contribuții:

6.1. Stabilirea schemei modelului de rețea astfel încît cu acesta să se poată reproduce defectele studiate și să se poată verifica funcționarea protecțiilor.

6.2. Conceperea și stabilirea parametrilor elementelor constitutive ale modelului de rețea.

6.3. Conceperea și realizarea comutatorului static cu momentul conectării reglabil între 0° - 360° .

6.4. Conceperea și realizarea unui program de calcul în limbaj FORTRAN pentru determinarea reactanței proprii și de cuplaj a bobinelor utilizate la realizarea modelului rețelei de medie tensiune.

7. Conceperea schemelor și a metodicii în care aceste tipuri de defecte au fost provocate în rețeaua reală de medie tensiune, pentru verificarea rezultatelor obținute prin metoda analitică și metoda modelizării.

8. În ceea ce privește dezvoltarea unor dispozitive de sesizare a tipurilor de defecte analizate în lucrare se menționează următoarele contribuții:

8.1. Conceperea și dimensionarea optimă a unei scheme de filtrare utilizată în realizarea releului pentru sesizarea punerilor la pământ prin rezistență de trecere mare RAP-1.

8.2. Evidențierea faptului că defectele de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre sursă prin rezistență de trecere mare la locul de defect, simplele pueri la pământ prin rezistență de trecere mare precum și defectele de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator nu pot fi sesizate controlându-se conținutul în armonici al curentului homopolar aferent liniei cu defect.

8.3. Evidențierea faptului că prin introducerea dispozitivului RAP-1 în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor precum și a releului maximal de tensiune prevăzut cu filtru pentru eliminarea armonicilor, în rețelele cu nulul tratat prin bobină de stingere sau izolat se asigură sesizarea acestor defecte în majoritatea cazurilor.

BIBLIOGRAFIE

1. Alabujev, P.M., Gheronimus, V.B., Minkovici, L.M., Sebobtov, B.A.: Teorii podobia i razmernosti modelirovanie. Izdatelstvo Vissiaia Skola, Moscva, 1968.
2. Antoniu, I.S.: Chestiuni speciale de electrotahnică. Ed.Acad. R.P.R., București, 1956.
3. Arafah, S.M., Schinzinger, R.: Estimation algorithms for large - scale power systems. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.6, 1979, p.1968-1980.
4. Arie, A., Dumitriu, C.: Folosirea componentelor simetrice ale liniilor electrice compensate, pentru calculul căderilor de tensiune în liniile electrice necompensate. Conf.naț.de electrotah. și energetică Timișoara, sept.1982, vol.10, p.27-37.
5. Bădea, I., Broșteanu, Gh., Chenzbram, I., Columbeanu, P.: Protecția prin rele și automatizarea sistemelor electrice. Ed.Tehnică, București, 1973.
6. Balzer, G.: Măsurători de impedanță în rețele de joasă tensiune pentru stabilirea curenților de scurtcircuit. Lucrare de dizertație. Universitatea tehnică din Darmstadt, 1977.
7. Bălan, Gh.: Influența tratării neutrului asupra siguranței în funcționare a rețelelor de medie tensiune. Teză de doctorat. I.P.-București, 1978.
8. Bercovici, M., Arie, A., Tudose, M.: Aspecte privind aplicarea teoriei componentelor simetrice în analiza regiunilor nesimetrice a rețelelor electrice. Bul.st.și tehn. al I.P.-București, XLIX, nr.4, 1967, p.101-131.
9. Bercovici, M., Arie, A.: Aplicarea unor operatori de ortogonalitate pentru determinarea defectelor nesimetrice, multiple în rețele electrice. Studii și cercetări de energetică și electrotah., nr.2, 1968, p.403-425.
10. Bercovici, M., Arie, A., Poată, Al.: Rețele electrice. Calculul electric. Ed.Tehnică, București, 1974.
11. Bogoievici, N.: Definierea operatorilor de nesimetrie pentru rețele electrice trifazate nesimetrice și dezechilibrate. Sas. de con.științifice, mai 1983, Reșița, p.49-56.
12. Bogoievici, N., Toader, D.: Unele considerații privind similitudinea, analogia și dualitatea sistemelor fizice. Primul simp., naț. de teoria sistemelor, Craiova, 1980, p.159-167.
13. Bogoievici, N., Toader, D., Hărăguș, St.: Scheme electrice duale la circuite cuplate magnetic. Conf.naț.de electrotah. și energ., sept.1982, Timișoara, vol.1., p.41-48.

14. Bogoevici, M., Toader, D.: Nesimetrija tensiunilor la o rețea electrică trifazată în regim de scurtcircuit monofazat. Simpozionul național al rețelelor electrice, oct.1984, Timișoara, vol.III, p.92-104.
15. Buta, A.: Expresie pentru aproximarea curbei de magnetizare utilizată la calculul regimurilor de funcționare a generatorului sincron. Bul.st.și tehn. al.I.I.Tr.Vuia Timișoara, Tom 24(38) Fasc.2, 1979, p.96-101.
16. Capasso, A., Iliceto, F.: Représentation des charges lors des études de stabilité transitoire. L'energia elettrica, nr.7, 1973, p.441-456.
17. Cernin, A.B.: Scurtcircuite în cazul rețimurilor cu număr incomplet de faze ale sistemelor electrice. Ed.Tehnică, București 1956.
18. Chakrabarti, S.K.: On constitutive equations and dimensional analysis. Journal of the Franklin Institute, CCLXXXVI, nr.5, 1973, p.339-346.
19. Chen, W.K.: Algebraic theory of dimensional analysis. Journal of the Franklin Institute, CCLXXXII, nr.6, 1971, p.400-422.
20. Chițu, V.: Unele aspecte de protecția muncii reieșite din analiza accidentelor de muncă prin electrocutare. Prima conf. a energicienilor din România, oct.1975, București.
21. Clarke, Ed.: Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice. Traducere selectivă din lb.engleză (U.S.A.). Ed.Tehnică București, 1973.
22. Codiasse, Anne-Marie, Guillevic, Madeleine, Giraud, Denise: Connaissance des charges moyenne tension, en vue de leur prise en compte dans les études de planification. Rev.Gen.electr., nr.7-8, 1982, p.518-527.
23. Costenko, M.P.: Elektrodinamiceskoe modelirovanie energeticeskih sistem. Izdatelstvo Akademii Nauk, SSSR, Moskva, 1959.
24. Crepas, S., Ubladini, H.: Simulation, sur ordinateur, de cycles d'hystérésis en regime quelconque. L'energia elettrica nr.1, 1973, p.43-50.
25. Crișan, O.: Sisteme electroenergetice, Ed.did.și ped., București, 1979.
26. Cufelaru, I.: Probleme de stații și rețele electrice. Ed.Scrișul Românesc, Craiova, 1979.
27. Dabkowski, J.: The calculation of magnetic coupling from overhead transmission lines. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.8, 1981, p.3050-3061.
28. Denilievici, L.A., Donhrovski, V.V., Kazovski, K.B.: Parametrii mașinilor de curent alternativ. Traducere din lb.rusă, Ed.Tehnică, București, 1968.

29. Darveniza, M., Sargent, M.A., Limboun, G.J.: Modeling for lightning performance calculation. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.6, 1979, p.1900-1914.
30. Davalibi, F., Mukhedkar, D.: Parametric Analysis of grounding grids. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.5, 1979, p.1855-1866.
31. Davalibi, F., Mukhedkar, D.: Soil effects on ground fault currents. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.7, 1981, p.3442-3451.
32. Dordea, F.: Magini electrice. Ed.did.şi ped. Bucureşti, 1970.
33. Deri, A., Teven, G., Semlyen, 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.
34. Dima, P.: Modele RMI şi indicatori de stare. Sisteme energetice interconectate. Ed.Acad.R.S.R. Bucureşti, 1979.
35. Duboton, C., Gervais, G.: Validation des methodes analogique ou numériques de prédetermination des surtensions d'enclenchement par des essais en reseau H.T., Rev. Gen. Electr. nr.1, 1972, p.23-30.
36. Dufournet, D.: Modélisation de l'arc. Application à la coupure des disjoncteurs H.T. Rev. Gen. Electr. nr.1, 1982, p.26-31.
37. Drăgan, G.: Supratensiuni interne în sistemele electroenergetice. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1975.
38. Edelmann, H.: Calculul electric al reţelelor interconectate. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1966.
39. Falatti, R.: La mise à la terre du neutre des reseaux de distribution à moyenne tension. L'Energia Electrica nr.5, 1957, p.421-430.
40. Farraud, J.: Fonctionnement et protection des reseaux de distribution. S.D.F., Paris, 1967.
41. Farraud, J.: Calcul des courants de court-circuit. S.D.F., Paris, 1967.
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. Fetiş, I.: Contribuţii la analiza câmpului electromagnetic al sistemelor cu conductoare masive prin modelare. Teză de doctorat. I.P. "Tr. Vulpă" Timişoara, 1978.
44. Gavrilas, N., Guşă, M.: Consideraţii privind tratarea neutralului reţelelor electrice în cabluri. Prima conf. a Energ. din România, oct. 1975, Bucureşti.

45. Gavrilă, G.: Contribuții privind studiul fenomenelor electromagnetice tranzitorii în bobine și transformatoare. Teză de doctorat. I.P. București, 1985.
46. Gheju, P.: Contribuții la studiul influenței consumatorilor formați din motoare asincrone asupra curenților de scurt-circuit din rețeaua lor de alimentare, a comportării lor în timpul scurtcircuitelor și a determinării parametrilor motoarelor. Teză de doctorat. I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1984.
47. Gheorghiu, I.S., Fransua, A.S.: Tratat de mașini electrice vol. III. Mașini asincrone. Ed. Acad. R.S.R., București, 1971.
48. Gheorghiu, I.S., Fransua, A.S.: Tratat de mașini electrice, vol. IV. Mașini sincrone. Ed. Acad. R.S.R., București, 1972.
49. Ghigi, P., Rossi, R.: Modello matematico di macchine asincrone in regime stazionario. L'Energia elettrica, nr. 4, 1973, p. 227-441.
50. Goia, L., Bălan, Gh., Tănăsescu, Al., Igvan, Tl.: Tratatul neutritului rețelelor de medie tensiune. Ed. Tehnică, București, 1985.
51. Goly, G., Schultz, W., Webb, A.: Netzversuche zum Ermitteln der Ausgleichvorgänge in Industrietzten mit einer Vielzahl von Asynchronmotoren. Siemens Zeitschrift, vol. 44 nr. 6, 1970, p. 358-363.
52. Hainzel, J.: On local generalizations of the \bar{W} - theorem of dimensional analysis. Journal of the Franklin Institute, CCLXXXII, nr. 6, 1971, p. 463-470.
53. Happ, H.: Diakoptica - metodă de analiză a sistemelor complexe. Traducere din limba engleză. Ed. Tehnică, București, 1975.
54. Hobson, J.S., Whitehead, D.L.: Symmetrical components. Electrical Transmission and distribution Reference Book. Westinghouse, Pittsburg, 1964.
55. Hochrainer, A.: Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen. Springer-Verlag, Berlin, 1957.
56. Hortopan, Gh.: Modelul geometric și electromagnetic al transformatorului. Electrotehnica nr. 9, 1961, p. 381-386.
57. Hristea, Vl., Toder, D.: Probleme privind eliminarea defectelor de simplă punere la pământ prin rezistență de trecere mare în rețele de medie tensiune. Simpozion PRAM, Arad, mai, 1978.
58. Hristea, Vl., Morar, Al., Toder, D.: Prezentare model electrodinamic de rețea pentru verificarea protecțiilor prin relee. Simpozion P.R.A.M., Constanța, iunie, 1979.
59. Hristea, Vl., Toder, D.: Protecția de pământ rezistiv pentru rețele de medie tensiune aeriene și mixte cu neutrul tratat prin rezistor. Simpozion PRAM, Buzău, mai, 1980.

60. Hristea, Vl., Wirst, I., Toader, D.: Experimentarea pe model electrodinamic de rețea a comportării releului de distanță RD-110, la defecte în spate. Simpozion P.R.A.M. Buzău, mai 1980.
61. Hristea, Vl.: Releu de curent direcțional homopolar. Simpozion Național de Rețele Electrice, oct.1984, Timișoara, vol.2, p.98-105.
62. Iacobescu, Gh., Iordănescu, I.s.a.: Rețele electrice, Ed.did.și Ped., București, 1981.
63. Ionescu, G., Maciu, A.: Rețele electrice de distribuție. Ed.Tehnică, București, 1981.
64. Ionescu, Tr.: Tendințe și concepții noi în structura și analiza rețelelor de distribuție din marile orașe. Prima Conf.a Energ. din România. Oct.1975, București.
65. Jaffa, R.C.: Magnetic field induction from overhead transmission and distribution power lines on parallel fences. I.E.E.E. Transaction on P.A.S., nr.4, 1981, p.1628-1636.
66. Kalantarov, P.L., Teitlin, L.A.: Calculul inductanțelor. Ed. Tehnică, București, 1958.
67. Kansa, M.E., Klinov, A.K.: Modeli slojnoj elektriceskoi dis isledovaniia elektromagnitnoi prehodnih procesov. Electricestvo nr.1, 1970, p.35-42.
68. Lindeman, L.: Prescriptions de securite pour les lignes electriques aeriennes de distribution a basse et moyenne tension. U.I.P.D. d'Energie Electrique, Paris, 1972.
69. Linder, A.C.: Un autotransformateur à couplage en zig-zag net à la terre la neutre d'un réseau de distribution. Electrical World, nr.16, oct.1961.
70. Lutzieres, Ch., Forquet, M.: Simulation d'une bobine à noyau de fer par représentation mathématique du cycle d'hysteresis, Rev.Gen.de l'Electr.nr.5, 1968, p.476-488.
71. 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.
72. Marconato, R., Marzio, L.: A dynamic model of the italian power system based upon area equivalents. L'Energia Elettrica nr.4, 1973, p.217-227.
73. Manoa, . .: Protecția selectivă a rețelelor electrice de medie tensiune cu neutral izolat împotriva punerilor la pământ. Prima Conf.a Energ.din România, oct.1975, București.
74. Maurin, J. Apport des charges tournantes au courant de court-circuit des réseaux moyenne tension. Rev.Gen.de Electr., nr.9, 1970, p.703-714.

75. Heliopoulos, A.P., Webb, R.P., Jay, S.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. Măndru, Gh., Rădulescu, K.: Analiza numerică a cimpului electromagnetic. I.P.Cluj-Napoca, 1983.
77. Mocanu, C.: Teoria circuitelor electrice, Ed.Did.și Ped., București, 1979.
78. Moran, K.J.: A generalisation of dimensional analysis. Journal of the Franklin Inst., CCLXXXVII, nr.6, 1971, p.423-438.
79. Moretti, M.: Le problème du neutre dans les réseaux à moyenne tension. L'Electrotecnica, nr.8, 1963, p.559-566.
80. Nahman, J., Salmon, D.: Analytical expressions for the resistance of grounding grids in nonuniform soil. I.E.E.E. Transactions on P.A.S. nr.4, 1984, p.880-885.
81. Nedelcu, V.: Regimurile de funcționare ale mașinilor de curent alternativ. Ed.Tehnică, București, 1968.
82. Nedelcu, V.: Teoria conservării electromecanice. Ed.Tehnică, București, 1978.
83. Nemeș, M.: Analiza fenomenelor tranzitorii de comutație în rețele electrice cu elemente terminale de tip reactor transversal și autotransformator. Teză de doctorat I.P."Traian Vuia" Timișoara, 1975.
84. Nondahl, T.: Equivalent circuit model for a shaded-pole induction motor. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.4, 1981, p.1712-1723.
85. Paris, L., Reggiani, F., Comellini, L.: L'evolution du réseau de distribution primaire en relation à la continuité du service et au niveau des courants de court-circuit. I.E.E.E. Conference Publication nr.99. C.I.R.E.D., London, 1973.
86. Pelissier, R.: Les réseaux d'énergie électrique. Dunod technique Paris, 1976.
87. Poată, Al., Arie, A. ș.a.: Transportul și distribuția energiei electrice. Ed.Did.și Ped.București, 1981.
88. Pomer, I. Electronică industrială. Ed.Did. și Ped., București, 1971.
89. Pop, S., Stoica, V.: Măsurări în energetică. Ed.Facla, Timișoara, 1981.
90. Poru, V., Cepleu, S.: Comportarea relelor RDT și RPP în schemele de protecție a rețelilor de medie tensiune. Intr. de Rețele Electrice. Deva, 1979.
91. Potolea, S.: Calculul regimurilor de funcționare ale sistemelor electroenergetice. Ed.Tehnică, București, 1977.
92. Preda, H., Cristea, P.: Bazele electrotehnicii. vol.II. Ed.Did.și Ped. București, 1980.

93. Radu, D.: Contribuții privind calculul electromagnetic al bobinelor criogenice și supraconductoare. Tesă de doctorat. I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1985.
94. Radu, L., Radu, D.: Ghid de utilizare a programelor SCIT și SCIT 64. I.S.P.E. București, 1978.
95. Rădenberg, R.: Fenomene tranzitorii în sistemele electrenergetice. Ed. Tehnică, București, 1959.
96. Bueger, M., Stolte, E.: Realisation optimale du point neutre dans les reseaux à moyenne tension. Elektrizitätswirtschaft, vol.69, nr.21, 1970, p.565-570.
97. Sarriento, H.G., Partin, J., Mukhedkar, D.: Substation 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.
98. Savin, Gh., Roman, H.: Circuite electrice neliniare și parametrice, Ed. Tehnică, București, 1973.
99. Selischi, Al.: Alegerea reactanțelor pentru transformatoarele de alimentare ale serviciilor interne. Energetica nr.5, 1976, p.172-175.
100. Socăneanu, A.: Programarea și utilizarea calculatoarelor. Lit. I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1980.
101. Smolinski, W.J.: An algorithm for digital impedance calculation using a single π section transmission line model. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.5, 1979, p.1826-1841.
102. Sufrin, M., Hristea, Vl., Coțu, M.: Noi prevederi în concepția de realizare a rețelelor de medie tensiune cu neutru legat la pământ prin rezistor. Simpozionul național în probleme de energetică și proiectare oct.1985, Bacău.
103. Stăicu, C.I.: Teorema fundamentală a analizei dimensionale generale. Studii și cercetări științifice. Fizică și Științe tehnice, nr.2, 1962, p.159-172.
104. Stăicu, C.I.: Legea valorilor minime, întregi, pozitive, în analiza dimensională generală. Bul.Șt.și Tehn. I.P. Traian Vuia Timișoara, nr.6, 1967, p.393-401.
105. Stăicu, C.: Analiza dimensională generală. Ed. Tehnică, București, 1976.
106. Stănișilă, O.: Analiză matematică. Ed. Did. și Ped. București, 1981.
107. Stănculescu, Fl.: Analiza și simularea sistemelor neliniare. Ed. Acad. RSR, București, 1974.
108. Sabac, I.: Matematici speciale. Ed. Did. și Ped., București, 1981.

109. Sora, C.: Bazele electrotehnicii. Ed. Did. și Ped. București, 1982.
110. Sora, C., Gheju, P., Toader, D.: Studiarea și stabilirea caracteristicilor elementelor de rețea ale consumatorilor în vederea modelizării acestora. Protocol la contract de cercetare nr.37 din 9.03.1977, IPTVT - CIRE București.
111. Sora, C., Toader, D.: Studiarea și realizarea filtrului trecobandă care să asigure atenuarea amoniciei a 3-a de la ori. Protocol la contract nr.37/9.03.1977. I.P.T.V.T. - C.I.R.S. București.
112. Sora, C., Hărăguș, St., Toader, D.: Contactator static de putere trifazat cu moment de conectare reglabil. Bul. St. și Tehn. IPTVT., Lucrările sesiunii de comunicări științifice, mai 1977.
113. Sora, C., Toader, D.: Determinarea amonicilor curentului ce se închide prin nulul rețelelor de medie tensiune tratate prin rezistor. Protocol la contract nr.26 din 8.02.1978 IPTVT-C.I.R.S. București.
114. Sora, C., Toader, D., Gheju, P.: Modelarea consumatorilor cu motoare asincrone și sincrone din rețele de medie tensiune. Protocol la contract nr.26/8.02.1978 IPTVT-CIRE București.
115. Sora, C., Toader, D., Dobre, S.: Dispozitiv Hall pentru redarea curenților periodici nesinusoidali în scop de măsurare. Protocol la contract nr.222/10.01.1979 IPTVT - CIRE București.
116. Sora, C., Toader, D.: Schemă pentru selectarea liniei de medie tensiune pe care a apărut un scurtcircuit monofazat prin rezistență de trecere mare. Protocol la contract nr.222/10.01.1979. IPTVT - C.I.R.S. București.
117. Sora, C., Toader, D.: Studiul experimental pentru determinarea impedanțelor de secvență la rețea mixtă de 20 kV cu neutrul tratat prin rezistor. Protocol la contract nr. 34/30.01.1980 IPTVT. - CIRE București.
118. Sora, C., Toader, D., Bere, I.: Studiarea și stabilirea relațiilor de calcul al tensiunii pe bara de 20 kV a stației de transformare 110/20 kV, în cazul ruperii conductorului de fază al liniei de medie tensiune, rețea cu nulul izolat sau compensat. Protocol la contract nr.1 din 3.01.1981 IPTVT - CIRE București.
119. Sora, C., Toader, D.: Studiul experimental pentru determinarea conținutului în amonici a curenților prin elementele transversale ale rețelei de 20kV cu neutrul legat la pământ prin rezistor sau bobină. Protocol la contract nr.40 din 11.03.1982. IPTVT-CIRE București.
120. Sora, C., Toader, D., Bere, I.: Studiarea și stabilirea relațiilor de calcul a curentului ce se închide prin rezistorul de tratare a nulului rețelei de 20 kV, în cazul ruperii conductorului de fază al unei linii. Protocol la contract nr.40/11.03.1982. IPTVT-CIRE BUCUREȘTI.

121. Soru, C., Toader, D., Bărbulescu, S.: Studiul comportării transformatoarelor de curent în regim tranzitoriu și stabilizat având în secundar rolele de curent cu impedanță dinamică. Protocol la contract nr.33 din 9.02.1984. IPTVT - CIRE București.
122. Tănăsescu, A.I.: Contribuții privind determinarea parametrilor și repartiției curenților de scurtcircuit monofazat la rețele de medie tensiune cu cabluri. Teză de doctorat. I.P.T.V. Timișoara, 1983.
123. Tănăsescu, A.I., Hristea, Vl., Toader, D.: Simulator electrodinamic de rețea, Brevet de invenție nr.75936, 1986.
124. Tănăsescu, A.I., Hristea, Vl., Toader, D.: Releu anparametric de pământ, Brevet de invenție nr.85152, 1984.
125. Toader, D., Chiținuş, Gh.: Elemente componente model de rețea. Lucrare 3.13.2/1974. CIRE-SCP București.
126. Toader, D., Hristea, Vl.: Studiarea elementelor care se pretează la modelare și stabilirea caracteristicilor elementelor pentru modelul de rețea. Lucrarea 3.13/1974. CIRE - SCP - București.
127. Toader, D.: Analiza și dimensionarea optimă a unui sistem de filtrare în scop de protecție în rețele de medie tensiune. Bul.St. și Tehn. al IPTVT-Timișoara 26(40) - Fasc.1, 1981, p.33-40.
128. Toader, D., Bere, I.: Analiza comparativă a posibilităților de sezizare a unui defect conductor întrerupt și căzut la pământ în rețele de medie tensiune. Conf. Naț. de Electrotehn. și Energ., sept.1984, Uraiova, vol.12. p.233-242.
129. Toader, D., Hristea, Vl.: Calculul curentului de scurtcircuit monofazat prin rezistență de trecere foarte mare în rețele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor. Energetica nr.5, 1986, p.228-233.
130. Toader, D., Hristea, Vl.: Determinarea parametrilor care influențează valoarea tensiunii monopolare la un defect dublu conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator într-o rețea de medie tensiune. Simpozionul național de Rețele Electrice, oct.1984, Timișoara, vol.II, p.138-150.
131. Toader, D.: Program de calcul al unui defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ spre consumator într-o rețea de medie tensiune. Lucrările sesiunii științifice 16-17 mai 1986, vol.XIV, pag.301-307, Inst.Pol. Iași.
132. Toader, D., Hristea, Vl.: Considerații privind funcționarea protecției prin role în rețele de medie tensiune în cazul unui defect de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ. Simpozionul Național de Rețele Electrice, sept.1986, Pitești, vol.II, p.159-167.

133. Toma, M., Odăgascu, I.: Metode numerice și subrutine. Ed. Tehnică București, 1980.
134. Trutt, F.C. g.a.: Representation of the Magnetization characteristics of D.C. Machines for Computer use. I.E.E.E. Transaction on P.A.S. nr.3. 1968, p.665-672.
135. Ulianov, S.A.: Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice. Ed. Did. și Ped. Buc., 1967.
136. Vajnov, A.I., Rozovski, J.A., Salita, F.Z.: Electrodinamica modelii energosistem. P.-I. Moskva, 1961.
137. Vadulescu, A.: Analiza dimensională și teoria similitudinii. Ed. Acad. R.S.R. București, 1969.
138. Velasquez, R., Mukhedkar, D.: Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior. I.E.E.E. Transactions on P.A.S. nr.6, 1984, p.1314-1322.
139. Velicescu, C.: Contribuții la calculul regimurilor tranzitorii ale liniilor electrice lungi cu parametri variabili. Teză de doctorat. IPTVT. -impoara, 1985.
140. Venicov, V.A.: Aplicarea teoriei similitudinii și modelării în electroenergetică. Trad. din lb. rusă. Ed. Tehnică, București, 1972.
141. 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.
142. Wright, S.H., Hall, C.F., Shankle, D.F., Tremaine, R.L.: Characteristics of Aerial Lines. Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Westinghouse, Pittsburg, 1964.
143. ■ ■ ■ Guide technique de la distribution. Reglage des protection. S.D.F. Paris, 1972.
144. ■ ■ ■ Harmoniques des les reseaux moyenne et haute tension provoquasse par des appareils a commande par controle de phase. I.E.E.E. Conf. Publication nr.99, C.I.R.E.D. London, 1973.
145. ■ ■ ■ Guide Technique de la Distribution. Installation de comande et de controle. S.D.F. Paris, 1971.
146. ■ ■ ■ PE - 147/83. Instrucțiuni de proiectare privind tratarea neutrilor în rețele de medie tensiune. CIRE-SCP - București, 1983.
147. ■ ■ ■ IS - I - 35/1-82. Indreptar de proiectare pentru rețele de medie tensiune cu neutrul legat la pământ prin rezistor. Stații de transformare. CIRE-SCP. București, 1982.
148. ■ ■ ■ IS - Ip - 35/2 - 82. Instalații de legare la pământ în rețele aeriene de medie tensiune. CIRE-SCP București, 1982.

149. ■ ■ ■ 1E - Ip - 35/3 - 83. Instalații de legare la pământ în rețele subterane de medie tensiune. CIRE - SCP, București, 1983.
150. ■ ■ ■ PE - 501/85. Normativ pentru proiectarea protecțiilor prin relee și automatizărilor instalațiilor electrice ale centralelor și stațiilor. CIRE-SCP București, 1985.
151. ■ ■ ■ Concepția de dezvoltare a rețelelor electrice orășenești. Inbunătățirea structurii rețelelor de distribuție. Directive tehnice nr.239/7, 1977, CIRE și ICELIMBERG București.