

Șef lucrări ing. MARIA VINȚAN

**DETERMINAREA DISTRIBUȚIEI CURENTULUI DE
SCURTCIRCUIT MONOFAZAT ÎN REȚELELE
ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE**

- TEZĂ DE DOCTORAT -

Const. Șora

Conducător științific:

Prof. univ. dr. doc. ing. CONSTANTIN ȘORA

**BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA**

TIMIȘOARA

2003

CUPRINS

INTRODUCERE. OPORTUNITATEA TEZEI	6
CAP.1 REGIMURI NESIMETRICE STAȚIONARE ÎN REȚELELE ELECTRICE. FOLOSIREA METODEI COMPONENTELOR DE SECVENȚĂ.....	9
1.1 Considerații generale.....	9
1.2 Metoda componentelor de secvență	11
1.2.1 Forma parametrilor de secvență ai elementelor de rețea.....	11
1.2.2 Determinarea parametrilor de secvență ai elementelor de rețea.....	16
1.3 Scurtcircuite	17
1.3.1 Generalități.....	17
1.3.2 Scurtcircuite cu impedanță de defect.....	19
1.4 Întreruperi.....	22
1.5 Concluzii	25
CAP.2 SCHEME ECHIVALENTE ȘI PARAMETRII DE SECVENȚĂ HOMOPOLARĂ AI TRANSFORMATOARELOR ȘI AUTOTRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE	26
2.1 Transformatoare cu două înfășurări	26
2.2 Transformatoare cu trei înfășurări.....	29
2.3 Autotransformatoare.....	30
2.4 Concluzii	32
CAP.3 IMPEDANȚA PROPRIE A UNEI BUCLE MONOFAZATE CONDUCTOR-PĂMÂNT ȘI IMPEDANȚA MUTUALĂ DINTRE DOUĂ BUCLE MONOFAZATE CONDUCTOR-PĂMÂNT	33

3.1 Considerații generale.....	33
3.2 Formulele lui Carson.....	35
3.3 Relațiile lui Rudenberg.....	36
3.4 Relațiile lui Sunde	38
3.5 Relațiile lui Dubanton	40
3.6 Influența diverșilor factori asupra parametrilor buclelor monofazate conductor-pământ.....	41
3.7 Concluzii	51
CAP.4 SCHEME ECHIVALENTE ȘI PARAMETRII DE SECVENȚĂ HOMOPOLARĂ AI LINIILOR ELECTRICE AERIENE TRIFAZATE.....	
4.1 Linii electrice aeriene trifazate cu simplu circuit.....	52
4.2 Linii electrice aeriene trifazate simplu circuit, cu conductoare de protecție.....	55
4.2.1 Un conductor de protecție	55
4.2.2 Două conductoare de protecție.....	58
4.3 Linii electrice aeriene trifazate cu dublu circuit.....	60
4.4 Analiza influenței diverșilor factori asupra impedanței de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene trifazate	64
4.5 Concluzii	75
CAP.5 ESTIMAREA REPARTIȚIEI CURENTULUI DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT ÎN REȚELELE ELECTRICE TRIFAZATE DE ÎNALTĂ TENSIUNE	
5.1 Considerații generale.....	78
5.2 Defect alimentat de la un capăt	80
5.3 Defect alimentat de la ambele capete.....	98
5.4 Rezultate numerice.....	108
5.5 Concluzii	125

CAP. 6 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII.....	129
<i>Anexa A1. Parametrii buclelor monofazate conductor-pământ.....</i>	<i>137</i>
<i>Anexa A2. Parametrii de secvență homopolară ai unei LEA de 220kV, dublu circuit .</i>	<i>149</i>
<i>Anexa A3. Repartiția curentului de scurtcircuit monofazat</i>	<i>157</i>
BIBLIOGRAFIE	161

INTRODUCERE. OPORTUNITATEA TEZEI

Una din problemele cele mai importante în domeniul sistemelor și rețelelor electrice, este asigurarea calității energiei electrice procesate și, în primul rând, asigurarea continuității serviciului de alimentare cu energie electrică a consumatorilor. Consecință a cerinței justificate de continuitate și siguranță în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor, apare necesitatea tot mai mare de îmbunătățire a fiabilității și siguranței în funcționare a rețelelor electrice de transport și distribuție, prin intermediul cărora se alimentează rețeaua de distribuție a consumatorilor. Cauza discontinuității serviciului de alimentare cu energie electrică o constituie incidentele, sau perturbațiile. Cele mai grave și de multe ori și cele mai frecvente, sunt scurtcircuiturile, întreruperile și șocurile de sarcină. În aceste condiții, cunoașterea acestor incidente, sesizarea, selectarea și izolarea (deconectarea) lor în timp util cu ajutorul unor sisteme de automatizare și protecție, este esențială. Pentru aceasta, este necesară setarea corespunzătoare a protecțiilor, corelarea lor pe categorii de elemente de rețea și pe funcțiuni.

Statistic, se constată că peste 70% din numărul total de defecte în rețelele electrice de înaltă tensiune, sunt scurtcircuiturile monofazate. Lucrarea de față își propune să aprofundeze problemele legate de distribuția curentului de scurtcircuit monofazat în rețelele electrice cu linii aeriene de înaltă tensiune. Această distribuție este condiționată de structura rețelei, de particularitățile funcționale și constructive ale elementelor componente și de parametrii schemelor echivalente. De fapt, toate aceste aspecte sunt strâns legate între ele și vin să definească evoluția și manifestarea perturbației. Dintre parametrii schemei echivalente, se remarcă impedanța de secvență homopolară. Sistemul de curenți de secvență homopolară diferă radical de sistemul de curenți de secvență directă și inversă și de aceea impedanțele homopolare diferă substanțial, în cazul general, de impedanțele corespunzătoare celorlalte secvențe. Ținând cont de acest lucru, în această lucrare se acordă o atenție deosebită impedanței de secvență homopolară a elementelor de rețea.

Determinarea distribuției curentului de defect este o problemă care, deși a stat în atenția specialiștilor încă din anii '60 ([80], [104]), rămâne de actualitate, dovadă stând numărul mare de lucrări care abordează acest subiect ([25], [67], [68], [70], [71] etc). Acest demers este necesar din cel puțin două motive importante: la alegerea corespunzătoare a materialului și dimensiunilor conductoarelor de protecție și la determinarea tensiunilor de

atingere și de pas în apropierea stâlpilor LEA. Se mai pot enumera însă și alte motive: la determinarea tensiunilor de atingere și de pas în stațiile electrice și la evaluarea performanțelor și fiabilitatea instalațiilor de legare la pământ, la studii legate de influența electromagnetică a liniilor electrice asupra liniilor de telecomunicații aflate în apropiere.

Este binecunoscut modul de calcul al curenților de scurtcircuit monofazat ce apar în rețelele electrice de înaltă tensiune și de aceea în lucrarea de față nu se insistă pe acest demers, ci se consideră cunoscute valorile curenților de defect. În aceste condiții, considerând că apare o punere la pământ prin arc pe o fază a LEA, se urmărește determinarea distribuției curentului de defect în circuitele de întoarcere a acestuia spre sursă. Circuitele de întoarcere considerate sunt conductoarele de protecție legate la pământ prin intermediul stâlpilor L.E.A.

Lucrarea este structurată astfel:

În capitolul 1 este prezentat modul în care se folosește metoda componentelor de secvență la calculul și analiza rețelelor electrice liniare în regimuri nesimetrice. Se prezintă forma parametrilor de secvență ai elementelor de rețea și modul de determinare a acestora. Tot în acest capitol sunt analizate două tipuri de defecte nesimetrice și anume: scurtcircuitele și întreruperea conductoarelor.

În capitolul 2 este prezentată o sinteză referitoare la parametrii de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor trifazate.

În capitolul 3 se prezintă modul de calcul al impedanțelor proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ, care intervin în expresia impedanței de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene. Dificultatea principală în determinarea corectă a impedanței de succesiune homopolară a liniilor electrice aeriene provine din considerarea distribuției curentului în pământ. Determinarea exactă a acestei distribuții reprezintă, în cazul general, o problemă foarte complexă. Pentru rezolvarea acesteia s-au efectuat nenumărate cercetări teoretice și experimentale ([9], [35], [77], [80], [82]). Aceste cercetări au arătat că pentru calculul parametrilor căii de întoarcere prin sol este necesară evaluarea unor ecuații ce conțin integrale improprii. Pentru evaluarea lor este însă nevoie de programe soft speciale. Din această cauză, diverși autori au încercat găsirea unor formule care să aproximeze cât mai bine aceste expresii ce conțin integrale improprii și, în același timp, să poată fi evaluate mai simplu și într-un timp rezonabil, cu ajutorul calculatorului. În acest capitol, sunt furnizate, într-un mod sintetizat, formulele aproximative de calcul al impedanțelor buclelor monofazate conductor-pământ, prezentate în literatura de specialitate. Sunt apoi prezentate comparațiile efectuate între rezultatele obținute cu formulele prezentate. Se prezintă apoi un studiu calitativ

și cantitativ al influenței diverșilor factori asupra impedanțelor proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ.

În capitolul 4 se prezintă modul de calcul al impedanței de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene. Impedanța de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene depinde de mai mulți factori, printre care: rezistivitatea electrică a solului, prezența conductoarelor de protecție, înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, diametrul conductorului și frecvența curentului. În acest sens, se prezintă o analiză a influenței diverșilor factori asupra parametrilor de secvență homopolară ai LEA trifazate, pentru cazul în care linia este simplu circuit sau dublu circuit, prevăzută cu unul, sau mai multe, conductoare de protecție.

În capitolul 5 sunt dezvoltate modele analitice pentru estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat în rețelele electrice cu linii aeriene de înaltă tensiune. Rețelele electrice de înaltă tensiune au realizată o legătură rigidă la pământ a punctului neutru al unuia, sau mai multor transformatoare. La aceste rețele, orice punere la pământ a unei faze, devine un scurtcircuit monofazat. Curentul de scurtcircuit monofazat se închide prin pământ, legăturile punctelor neutre ale transformatoarelor și autotransformatoarelor și faza cu defect. Pentru protecția liniilor electrice aeriene (LEA) ale acestor rețele împotriva supratensiunilor atmosferice, se folosesc conductoare de protecție legate la pământ. În aceste condiții, orice curent de descărcare pe un stâlp al unei linii electrice aeriene, datorat unei puneri la pământ prin arc, se închide la pământ prin baza stâlpului defect, dar și prin conductoarele de protecție și prin ceilalți stâlpi. În acest fel, rezistența de punere la pământ obținută prin punerea în paralel a prizelor stâlpilor ce participă la derivarea curentului de defect se micșorează și determină astfel micșorarea tensiunilor de atingere și se pas în apropierea stâlpului cu defect. În acest capitol, considerându-se cunoscute valorile curenților la locul de defect, se determină distribuția acestora în rețeaua electrică. Se pot determina astfel, valorile curenților în stâlpii liniei electrice, în porțiunile de conductor de protecție adiacente și valorile curenților care circulă prin legăturile la pământ ale neutrelor transformatoarelor și autotransformatoarelor din stațiile de la capetele liniei analizate.

Atunci când defectul apare pe o linie electrică aeriană, un număr de stâlpi din apropierea defectului vor fi supuși unor potențiale ridicate față de pământ. Deoarece, în timpul unui defect cu pământ, stâlpul ce va avea potențialul cel mai ridicat este cel care se află cel mai aproape de defect, în această lucrare s-a acordat atenție acestui stâlp, numit *stâlpul cu defect*. Tensiunea stâlpului cu defect depinde de mai mulți factori, printre care: valoarea curentului de defect, distanța de la locul de defect până la capetele liniei, rezistențele instalațiilor de legare la pământ ale stațiilor de la capetele liniei, poziția conductoarelor pe

stâlp și poziția fazei cu defect, valoarea rezistenței de legare la pământ a stâlpului cu defect și a celorlalți stâlpi, numărul, materialul și dimensiunile conductoarelor de protecție, rezistivitatea electrică a solului. Se prezintă și o analiză a influenței acestor factori asupra tensiunii stâlpului cu defect.

Toate rezultatele numerice prezentate sunt obținute cu ajutorul calculatorului, mai precis, programele au fost scrise în mediul de programare MATLAB, versiunea 5.1.0.421.

Această lucrare nu s-ar fi înfăptuit fără ajutorul generos al unor oameni pe care autoarea a avut șansa să-i întâlnească pe parcursul stagiului de doctorat.

În acest sens, țin să mulțumesc d-lui prof. univ. dr. doc. ing. Constantin Șora, personalitate marcantă a electrotehnicii pe plan național și internațional, care a contribuit decisiv în cadrul scolii timișorene de electrotehnică la formarea mea ca “cercetător în devenire”. Cultura sa profesională de tip enciclopedic, precum și căldura umană și încrederea pe care mi le-a arătat, m-au marcat definitiv. Sper ca măcar o mică parte din sugestiile profesionale pe care Dl. Profesor mi le-a dat, să se regăsească și în această teză.

Mulțumiri speciale se cuvin domnului prof. univ. dr. ing. Adrian Buta, care m-a sprijinit, nu numai cu o desăvârșită competență științifică, dar și cu generozitatea sufletească a fostului meu dascăl. Analizele detaliate, sfaturile, criticile constructive ale domniei sale, precum și o valoroasă bibliografie pusă la dispoziția mea, au fost esențiale pentru elaborarea întregii lucrări la un nivel științific corespunzător.

Domnului prof. dr. ing. Dumitru Toader, îi rămân îndatorată pentru deosebita competență și deplina bunăvoință arătate pe parcursul tuturor examenelor și referatelor de doctorat.

Mulțumiri se cuvin și profesorului Gordon Steven de la Universitatea din Hertfordshire – Anglia care m-a ajutat cu generozitate, punându-mi la dispoziție articole științifice de specialitate.

Mulțumesc colegului meu - șef lucrări ing. Ioan Borlea, pentru modul altruist în care m-a ajutat întotdeauna.

În final, un gând bun și pentru familia mea, care a trebuit să suporte “aspre privațiuni” de-a lungul anilor necesari elaborării acestei lucrări. Mulțumesc soțului meu – Lucian, pentru încurajările constante și pentru tot sprijinul oferit. Îmi cer iertare micului meu fiu - Radu, care de nenumărate ori s-a arătat frustrat de lucrul îndelung pe calculator al mamei sale, care-i promite prioritate absolută de-acum încolo, pentru totdeauna.

CAP.1 REGIMURI NESIMETRICE STAȚIONARE ÎN REȚELELE ELECTRICE. FOLOSIREA METODEI COMPONENTELOR DE SECVENȚĂ

1.1 Considerații generale

Studiul regimurilor nesimetrice și în special calculul curenților de scurtcircuit, face parte integrantă din analiza funcționării rețelelor electrice în general și a celor aeriene, de înaltă tensiune, în particular.

Calculul regimurilor nesimetrice se efectuează în scopuri multiple, în faza de studiu, proiectare sau exploatare [30]. Un rol important în calculul acestor regimuri îl are calculul curenților de scurtcircuit, activitate fundamentală în dimensionarea echipamentelor sistemului, conducerea și reglarea acestuia.

În general, nesimetriile pot fi longitudinale și transversale, mici sau pronunțate, normale sau incidentale, o clasificare mai completă prezentându-se în figura 1.1.

Dependent de tipul nesimetriilor, se pot identifica următoarele scopuri ale calculului acestora:

- Calculul regimurilor cu nesimetrii transversale (în primul rând scurtcircuitele), se efectuează pentru:

- stabilirea protecției prin relee a unor automatizări de sistem și reglajul acestora;
- dimensionarea instalațiilor la solicitările dinamice și termice;
- stabilirea măsurilor de protecție a instalațiilor de curenți slabi din apropiere;
- caracterizarea sistemului energetic în raport cu o anumită bară a sistemului, atunci când se fac studii privind posibilitățile de racordare a unui consumator cu anumite caracteristici (șocuri de putere activă, șocuri de putere reactivă etc.);
- întocmirea de scheme echivalente necesare în studii de stabilitate statică sau dinamică, sau optimizări de regim;
- analiza funcționării unor consumuri nesimetrice (de exemplu cuptoare cu arc, cale ferată cu alimentare monofazată etc.);
- determinarea supratensiunilor de comutație.

- Calculul regimurilor cu nesimetrii longitudinale (întreruperi), se efectuează pentru:

- determinarea solicitărilor dinamice și termice la ruperea unuia, sau a mai multor conductoare, ale unei linii de transport;
- analiza posibilităților de funcționare în regim permanent, cu un număr incomplet de faze (de exemplu funcționarea accidentală în două faze);
- analiza regimului de funcționare în cazul liniilor de tip *două conductoare pământ* etc.

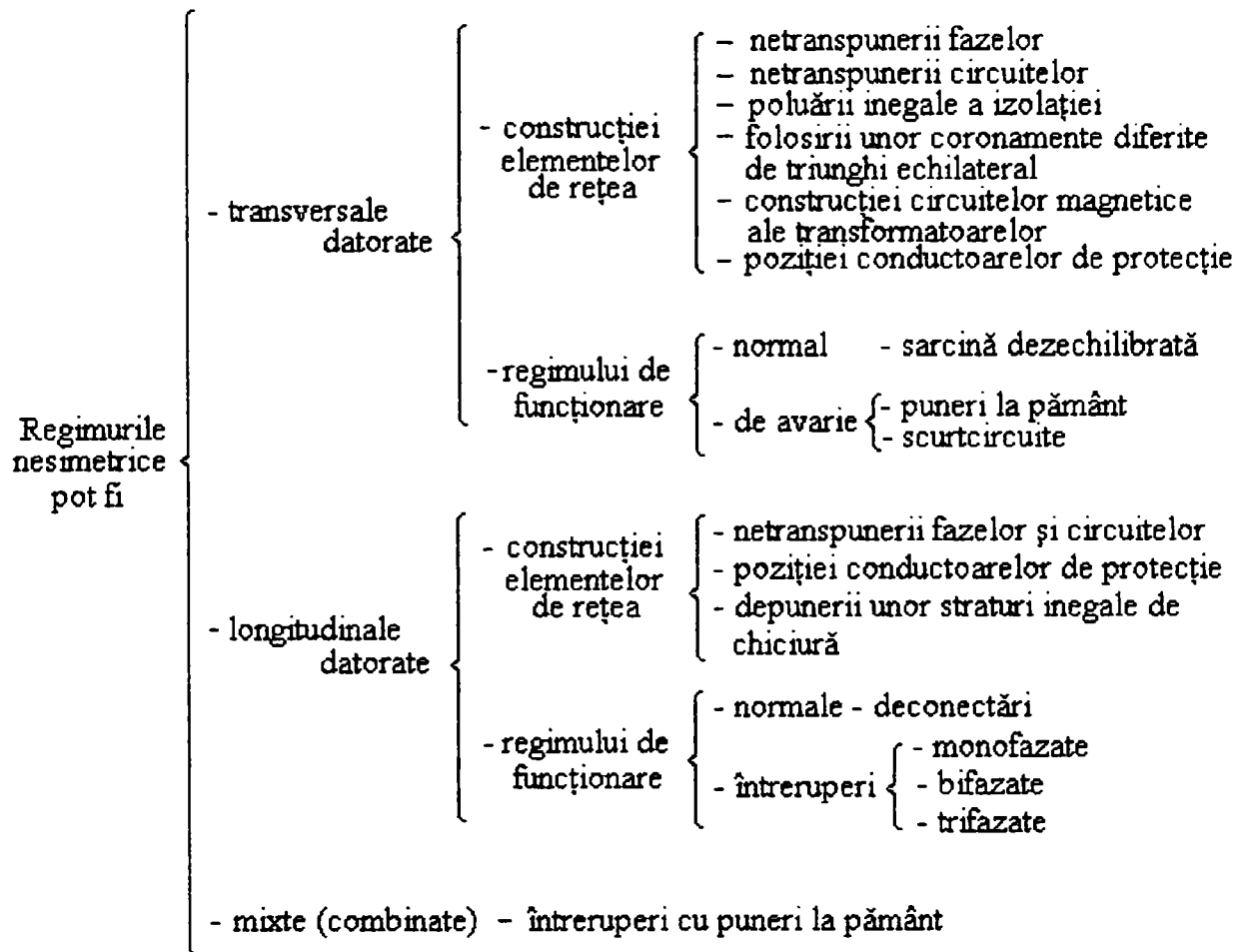


Figura 1.1 Clasificarea regimurilor nesimetrice ale rețelelor electrice

Prezentând regimurile nesimetrice în general, nu se poate omite problematica actuală a acestora, problematică rezultată din analiza literaturii de specialitate [1] – [110]. Această problematică este sintetizată în figura 1.2.

După cum se știe, una dintre cele mai utilizate metode pentru studiul regimurilor nesimetrice, este metoda componentelor de secvență. La baza metodei stă ideea descompunerii unui sistem trifazat, ordonat, nesimetric, de mărimi sinusoidale, în trei sisteme de mărimi sinusoidale trifazate, simetrice: sistemul de succesiune directă, inversă și homopolară. În continuare este prezentată forma parametrilor de secvență ai elementelor de sistem.

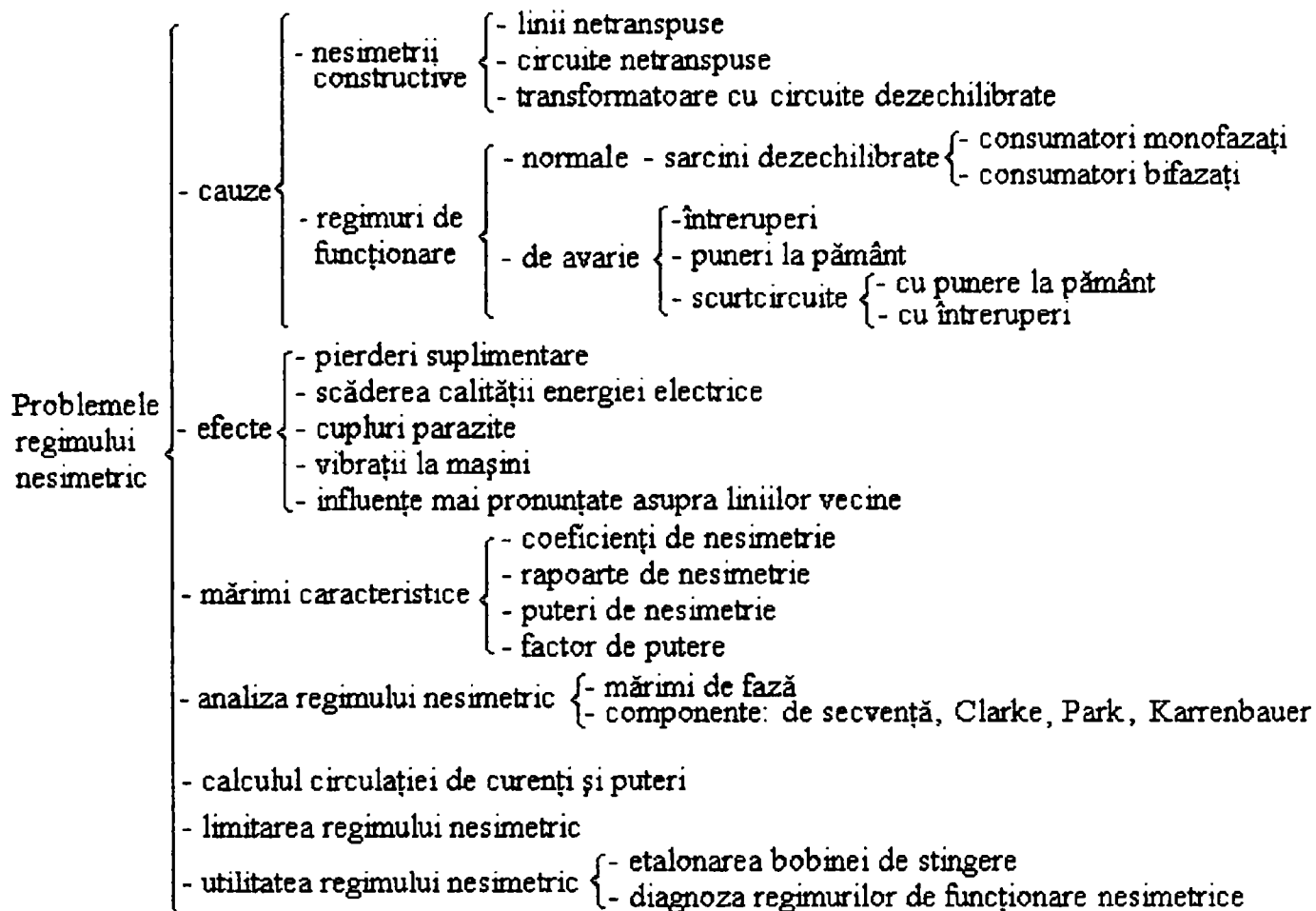


Figura 1.2 Problemele regimului nesimetric în rețelele electrice

1.2 Metoda componentelor de secvență

1.2.1 Forma parametrilor de secvență ai elementelor de rețea

Pentru a se determina forma parametrilor unui element trifazat de rețea în componente simetrice, cunoscându-se parametrii în componente de fază, se consideră un element liniar trifazat de sistem de formă generală (figura 1.3). Pentru acesta se scriu, între tensiunile și curenții în componente de fază, următoarele relații cunoscute ([4], [5], [66]):

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{af} &= \underline{Z}_{aa}\underline{I}_a + \underline{Z}_{ab}\underline{I}_b + \underline{Z}_{ac}\underline{I}_c \\
 \underline{U}_{bf} &= \underline{Z}_{ba}\underline{I}_a + \underline{Z}_{bb}\underline{I}_b + \underline{Z}_{bc}\underline{I}_c \\
 \underline{U}_{cf} &= \underline{Z}_{ca}\underline{I}_a + \underline{Z}_{cb}\underline{I}_b + \underline{Z}_{cc}\underline{I}_c
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

sau matricial:

$$[\underline{U}]_f = [\underline{Z}]_f [\underline{I}]_f
 \tag{1.2}$$

unde:

$$[\underline{U}]_f = \begin{bmatrix} \underline{U}_{af} \\ \underline{U}_{bf} \\ \underline{U}_{cf} \end{bmatrix}, \quad [\underline{I}]_f = \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}, \quad [\underline{Z}]_f = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} \\ \underline{Z}_{ba} & \underline{Z}_{bb} & \underline{Z}_{bc} \\ \underline{Z}_{ca} & \underline{Z}_{cb} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

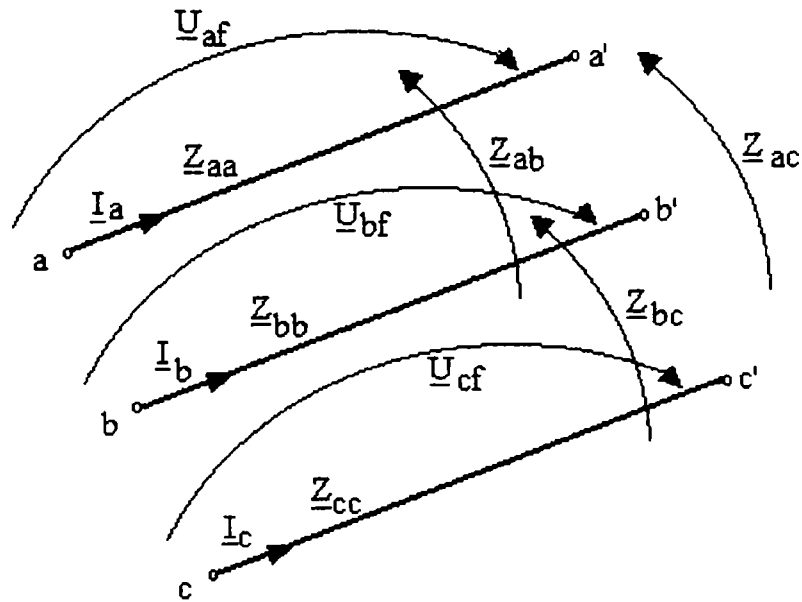


Figura 1.3 Element de sistem trifazat în reprezentare generalizată

Transformarea mărimilor, tensiuni și curenți, din sistemul mărimilor de fază în sistemul componentelor de secvență, se realizează aplicând relațiile de transformare cunoscute:

$$\begin{aligned} [\underline{U}]_s &= [\underline{T}]_v [\underline{U}]_f \\ [\underline{I}]_s &= [\underline{T}]_I [\underline{I}]_f \end{aligned} \quad (1.4)$$

unde $[\underline{T}]_v$ și $[\underline{T}]_I$ sunt matricile de transformare din mărimi de fază, în componente simetrice, pentru tensiuni, respectiv curenți:

$$[\underline{T}]_v = [\underline{T}]_I = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

a fiind operatorul complex $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Relația dintre tensiunile și curenții de secvență, este de forma:

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

$$[\underline{U}]_s = \begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}, \quad [\underline{I}]_s = \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix}, \quad [\underline{Z}]_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{hd} & \underline{Z}_{hi} \\ \underline{Z}_{dh} & \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{di} \\ \underline{Z}_{ih} & \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_{ii} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$[\underline{Z}]_s$ în relația (1.7) este matricea impedanțelor de secvență.

Ținând cont de relațiile (1.4), relația (1.6) devine:

$$[\underline{T}]_V [\underline{U}]_f = [\underline{Z}]_s [\underline{T}]_I [\underline{I}]_f \quad (1.8)$$

Având în vedere relația (1.2), se obține:

$$[\underline{T}]_V [\underline{Z}]_f [\underline{I}]_f = [\underline{Z}]_s [\underline{T}]_I [\underline{I}]_f \quad (1.9)$$

de unde rezultă matricea impedanțelor în componente simetrice:

$$[\underline{Z}]_s = [\underline{T}]_V [\underline{Z}]_f [\underline{T}]_I^{-1} \quad (1.10)$$

adică:

$$[\underline{Z}]_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} \\ \underline{Z}_{ba} & \underline{Z}_{bb} & \underline{Z}_{bc} \\ \underline{Z}_{ca} & \underline{Z}_{cb} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{hh} & \underline{Z}_{hd} & \underline{Z}_{hi} \\ \underline{Z}_{dh} & \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{di} \\ \underline{Z}_{ih} & \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_{ii} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Matricea $[\underline{Z}]_s$ primește forme particulare dacă elementele de rețea, respectiv de sistem, dispun de o anumită simetrie. În cazul instalațiilor de transport și distribuție, elementele componente prezintă o simetrie totală, ce se caracterizează prin egalitatea tuturor impedanțelor proprii ($[\underline{Z}]$) și egalitatea tuturor impedanțelor mutuale ($[\underline{Z}']$), indiferent de sensul de parcurgere a fazelor. În aceste condiții:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{aa} &= \underline{Z}_{bb} = \underline{Z}_{cc} = \underline{Z} \\ \underline{Z}_{ab} &= \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_{ba} = \underline{Z}_{cb} = \underline{Z}_{ac} = \underline{Z}' \end{aligned} \quad (1.12)$$

Impedanțele de secvență vor avea următoarele expresii:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{hd} &= \underline{Z}_{hi} = \underline{Z}_{dh} = \underline{Z}_{di} = \underline{Z}_{ih} = \underline{Z}_{id} = 0 \\
\underline{Z}_{hh} &= \underline{Z}_h = \underline{Z} + 2\underline{Z}' \\
\underline{Z}_{dd} &= \underline{Z}_d = \underline{Z} - \underline{Z}' \\
\underline{Z}_{ii} &= \underline{Z}_i = \underline{Z} - \underline{Z}'
\end{aligned}
\tag{1.13}$$

Matricea impedanțelor în componente simetrice, este deci o matrice diagonală:

$$[\underline{Z}]_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_h & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_d & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_i \end{bmatrix}
\tag{1.14}$$

Acest lucru corespunde faptului că tensiunile de secvență depind numai de curentul de secvență respectivă, prin intermediul impedanței de secvență respectivă.

Dacă analiza se extinde la nivelul sistemului, adică se iau în considerare atât rețeaua cât și generatoarele sincrone și consumatorii, nu se mai dispune de o simetrie totală, ci de una ciclică, caracterizată prin egalitatea impedanțelor proprii $\underline{Z}_{aa} = \underline{Z}_{bb} = \underline{Z}_{cc} = \underline{Z}$, a impedanțelor mutuale luate în sens direct, $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}'$ și a impedanțelor mutuale luate în sens contrar, $\underline{Z}_{ba} = \underline{Z}_{cb} = \underline{Z}_{ac} = \underline{Z}''$, iar matricea impedanțelor de fază are forma:

$$[\underline{Z}]_f = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix}
\tag{1.15}$$

iar matricea impedanțelor de secvență are forma:

$$[\underline{Z}]_s = \begin{bmatrix} \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}'' & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}'' \end{bmatrix}
\tag{1.16}$$

Pentru elementul trifazat din figura 1.4, prevăzut cu conductor de protecție legat la pământ, între tensiuni și curenți se scriu următoarele relații ([5]):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_f \\ \underline{U}_{cp} \end{bmatrix} = \underline{[Z]}_f \begin{bmatrix} \underline{I}_f \\ \underline{I}_{cp} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

unde:

$$\underline{[Z]}_f = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{acp} \\ \underline{Z}_{ba} & \underline{Z}_{bb} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{bcp} \\ \underline{Z}_{ca} & \underline{Z}_{cb} & \underline{Z}_{cc} & \underline{Z}_{ccp} \\ \underline{Z}_{cpa} & \underline{Z}_{cpa} & \underline{Z}_{cpa} & \underline{Z}_{cpcp} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

unde:

\underline{Z}_{ii} ($i = a, b, c$) - impedanțele proprii ale fazei “ i ”;

\underline{Z}_{cpcp} - impedanța proprie a conductorului de protecție;

$\underline{Z}_{ij}, i \neq j$ - impedanța mutuală dintre conductoarele fazelor “ i ” și “ j ”;

\underline{Z}_{icp} - impedanța mutuală dintre conductorul de fază “ i ” și conductorul de protecție “ cp ”.

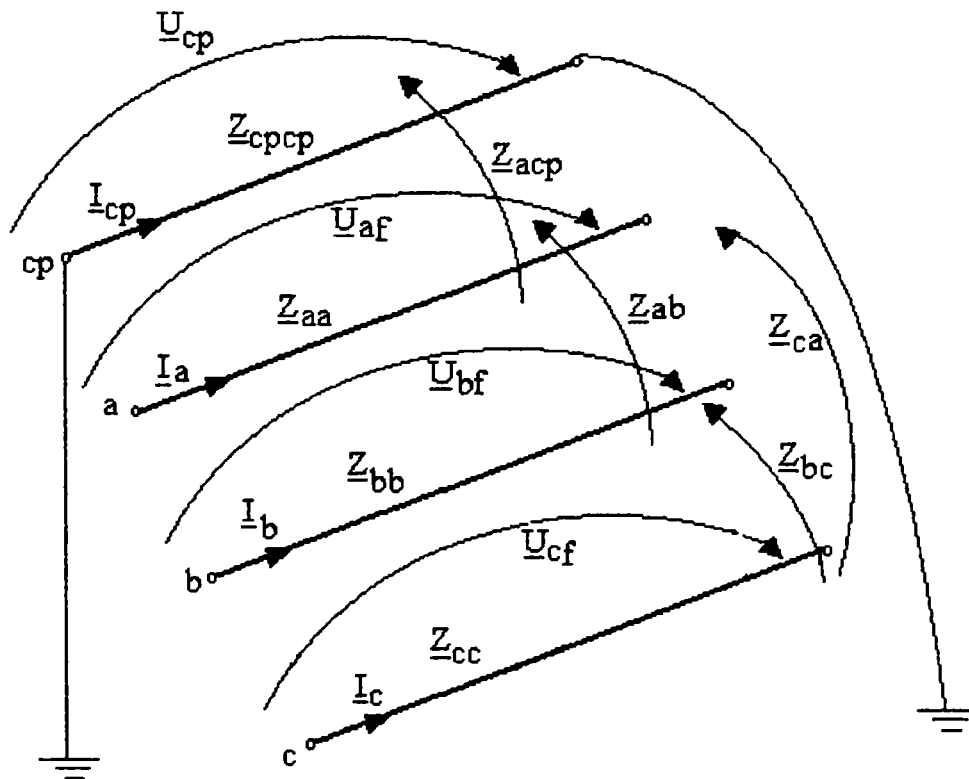


Figura 1.4 Element de sistem trifazat, cu conductor de protecție legat la pământ

Dacă se admite o simetrie ciclică pentru conductoarele de fază și o simetrie totală în raport cu conductorul de protecție, matricea (1.18) primește forma:

$$[Z]_f = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z}'_{cp} \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'_{cp} \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}'_{cp} \\ \underline{Z}'_{cp} & \underline{Z}'_{cp} & \underline{Z}'_{cp} & \underline{Z}'_{cp} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Dacă se are în vedere că tensiunea conductorului de protecție este nulă, din ultima ecuație a sistemului (1.17) se deduce expresia curentului prin conductorul de protecție:

$$\underline{I}_{cp} = -\frac{\underline{Z}'_{cp}}{\underline{Z}_{cp}}(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) \quad (1.20)$$

Renunțând la ultima linie și coloană, matricea $[Z]_f$ devine:

$$[Z]_f = \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix} - \frac{\underline{Z}'^2_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

iar în componente de secvență:

$$[Z]_s = \begin{bmatrix} \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' - 3\frac{\underline{Z}'^2_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} + a^2\underline{Z}' + a\underline{Z}'' & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} + a\underline{Z}' + a^2\underline{Z}'' \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Se observă că prezența conductorului de protecție legat la pământ, nu modifică forma impedanțelor de secvență directă și inversă, ci doar pe aceea de secvență homopolară.

1.2.2 Determinarea parametrilor de secvență ai elementelor de rețea

Pentru a determina parametrii de secvență ai elementelor instalațiilor de transport și distribuție, se parcurg următoarele etape ([4]):

- se reprezintă elementul în cauză sub forma generală prezentată în figura 1.3 și descrisă de relațiile (1.1);
- avându-se în vedere comportarea elementului de rețea față de curenții și tensiunile de fază, ianginând probe de mers în gol pe câte două faze și utilizând relațiile (1.1), se determină impedanțele proprii și mutuale în coordonate de fază ($\underline{Z}, \underline{Z}'$):

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{aa} = \underline{Z} &= \frac{U_{af}}{I_a} (I_b = I_c = 0) \\ \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}' &= \frac{U_{af}}{I_b} (I_a = I_c = 0)\end{aligned}\quad (1.23)$$

- cu ajutorul relațiilor (1.13), se determină impedanțele de secvență ale elementului.

Cunoscându-se valorile impedanțelor de secvență se pot întocmi schemele de secvență ale elementelor de rețea. În general, aceste scheme conțin atât elemente longitudinale, cât și elemente transversale. Relațiile (1.23) se utilizează în mod distinct, în funcție de componentele schemei echivalente.

1.3 Scurtcircuite

1.3.1 Generalități

Scurtcircuitul este o legătură neprevăzută de condițiile normale de lucru, ce se stabilește între fazele liniei electrice, sau între faze și pământ. În figura 1.5 sunt prezentate problemele analizei scurtcircuitelor în rețelele electrice. Din analiza celor prezentate în figura 1.5, se constată că una din cele mai importante probleme este calculul curenților de scurtcircuit.

Scurtcircuitele nesimetrice fac parte din categoria nesimetriilor transversale din rețelele electrice, care se caracterizează prin faptul că fenomenele din fiecare fază se produc în mod diferit, ca urmare a faptului că impedanțele pe faze nu mai sunt egale ca în cazul funcționării normale sau în regim de scurtcircuit trifazat. Impedanțele fazelor inegale conduc la apariția unui sistem trifazat de curenți nesimetrice, care se determină cu ajutorul metodei componentelor simetrice. Utilizarea metodei componentelor simetrice simplifică în mare măsură analiza proceselor nesimetrice deoarece, în acest caz, componentele simetrice ale curenților sunt legate, cu ajutorul legii lui Ohm, numai de componentele de tensiune de aceeași succesiune.

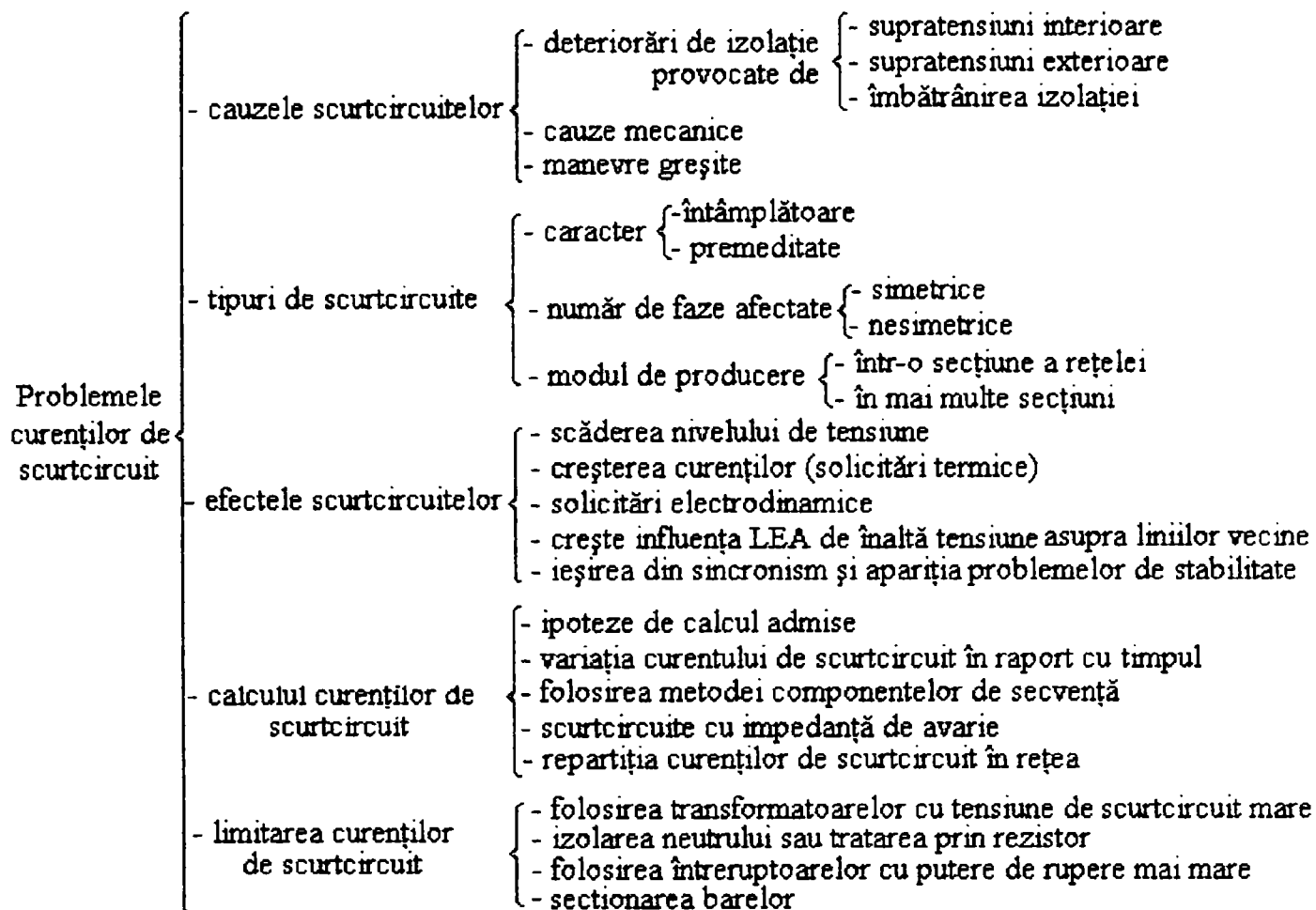


Figura 1.5 Problemele analizei scurtcircuitelor în rețelele electrice

Dacă un element oarecare al unui circuit este simetric și prezintă în raport cu curenții de secvență directă \underline{I}_d , inversă \underline{I}_i și homopolară \underline{I}_h impedanțele proprii $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i, \underline{Z}_h$, atunci componentele simetrice ale căderilor de tensiune pe aceste elemente sunt [41]:

$$\underline{U}_d = \underline{I}_d \underline{Z}_d, \quad \underline{U}_i = \underline{I}_i \underline{Z}_i, \quad \underline{U}_h = \underline{I}_h \underline{Z}_h \quad (1.24)$$

S-au notat cu $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i, \underline{Z}_h$ impedanțele echivalente ale schemelor de succesiune directă, inversă și homopolară, în raport cu locul de scurtcircuit.

În schemele echivalente se introduc numai tensiunile electromotoare de succesiune directă, care sunt cunoscute și nu depind de variația condițiilor exterioare surselor generatoare. Pentru orice scurtcircuit nesimetric, ecuațiile de bază, obținute cu ajutorul teoremei a doua a lui Kirchoff, scrise pentru fiecare succesiune, au următoarea formă generală [41]:

$$\underline{U}_d = \underline{E}_d - \underline{I}_d \underline{Z}_d, \quad \underline{U}_i = 0 - \underline{I}_i \underline{Z}_i, \quad \underline{U}_h = 0 - \underline{I}_h \underline{Z}_h \quad (1.25)$$

unde \underline{E}_d reprezintă tensiunea electromotoare rezultantă a surselor generatoare în raport cu locul de scurtcircuit.

Ecuțiile (1.25) se utilizează pentru fiecare tip de scurtcircuit nesimetric și corespund schemelor echivalente din figura 1.6.

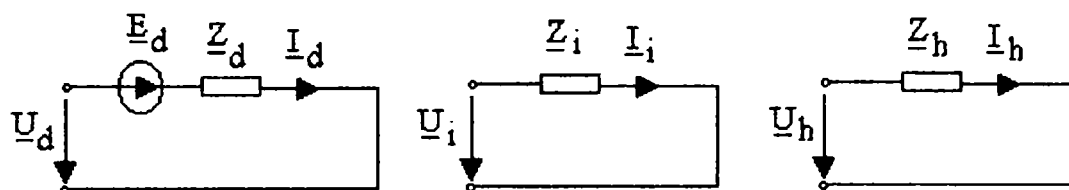


Figura 1.6 Schemele echivalente ale sistemelor direct, invers și homopolar

Pentru determinarea celor șase necunoscute, componentele simetrice de curent $\underline{I}_d, \underline{I}_i, \underline{I}_h$ și de tensiune $\underline{U}_d, \underline{U}_i, \underline{U}_h$, sunt necesare șase ecuații. Pentru determinarea acestora, pe lângă ecuațiile (1.25), mai sunt necesare încă trei ecuații, care se obțin din condițiile de la locul de defect.

1.3.2 Scurtcircuite cu impedanță de defect

Cel mai frecvent tip de defect al liniilor electrice aeriene, este provocat de trăsnetele care amorsează arc electric între unul, sau două conductoare și stâlp. În astfel de cazuri, impedanța arcului electric, impedanța stâlpului și a prizei de pământ, influențează curenții și tensiunile obținute. Scurtcircuitele tipice cu impedanță de defect \underline{Z} , sunt reprezentate în figura 1.7 ([13]).

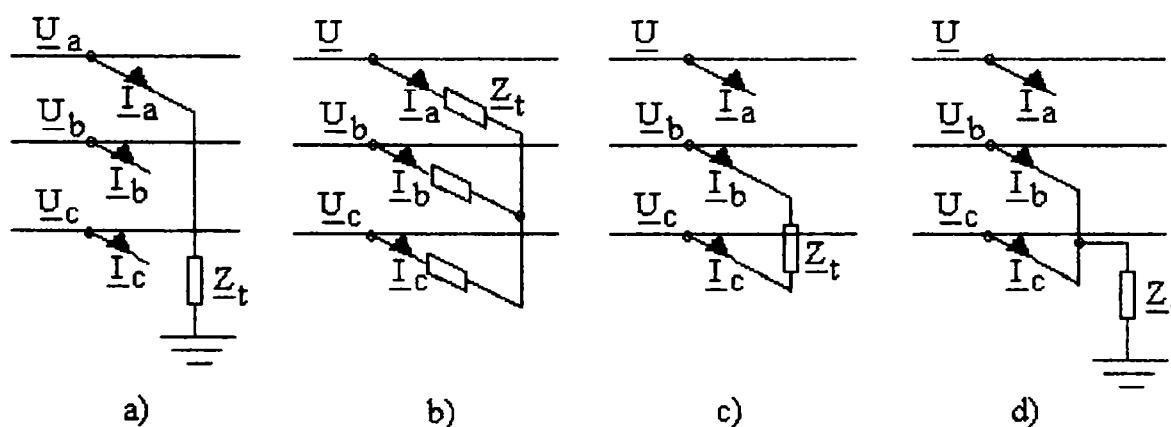


Figura 1.7

a- scurtcircuit monofazat; b –scurtcircuit trifazat; c – scurtcircuit bifazat; d – scurtcircuit bifazat la pământ.

Scurtcircuit monofazat prin impedanță de defect \underline{Z}_t

Fiind un defect nesimetric, pentru determinarea curentului de scurtcircuit monofazat se folosește metoda componentelor simetrice, ceea ce necesită stabilirea celor trei scheme echivalente de succesiune directă, inversă și homopolară, în raport cu locul de scurtcircuit.

Considerând faza a pusă la pământ prin impedanța de defect \underline{Z}_t , condițiile la locul de defect, conform fig. 1.7a), sunt:

$$\underline{I}_b = 0; \quad \underline{I}_c = 0; \quad \underline{U}_a = \underline{I}_a \underline{Z}_t \quad (1.26)$$

Conform metodei componentelor simetrice aplicată acestui tip de defect, componentele simetrice de curent $\underline{I}_d, \underline{I}_i, \underline{I}_h$ sunt egale între ele și sunt date de expresia:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_h = \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t} \quad (1.27)$$

Componentele simetrice de tensiune sunt date de expresiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_d = \underline{I}_d (\underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t) \\ \underline{U}_i = -\underline{I}_i \underline{Z}_i = -\underline{I}_d \underline{Z}_i \\ \underline{U}_h = -\underline{I}_h \underline{Z}_h = -\underline{I}_d \underline{Z}_h \end{cases} \quad (1.28)$$

Schema echivalentă corespunzătoare scurtcircuitului monofazat, este prezentată în figura 1.8.

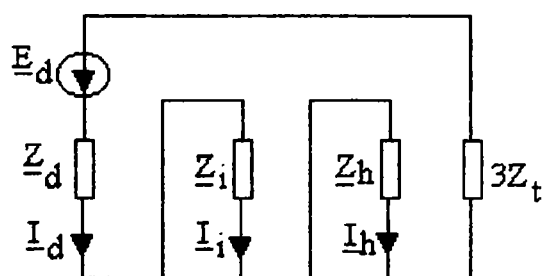


Figura 1.8 Schema echivalentă finală pentru calculul curentului de scurtcircuit monofazat

Curentul de scurtcircuit monofazat al fazei cu defect, este dat de expresia ([91], [97]):

$$\underline{I}_{sc} = \frac{3\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t} \quad (1.29)$$

Valorile impedanțelor echivalente rezultante $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i, \underline{Z}_h$ care intervin la calculul curentului de scurtcircuit monofazat, se determină plecând de la parametrii pentru schemele de secvență directă, inversă și homopolară ai fiecărui element component al rețelei electrice: generatoare, transformatoare, linii electrice etc.

Scurtcircuit trifazat prin impedanța trifazată de defect \underline{Z}_i

Impedanțele de defect fiind considerate egale pentru toate cele trei faze ca în fig.1.7a), sistemul rămâne echilibrat, curenții și tensiunile având doar componente de succesiune directă ([13]):

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad (1.30)$$

$$\underline{U}_d = \underline{I}_d \underline{Z}_i \quad (1.31)$$

Curenții de defect sunt dați de relațiile:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{I}_b = \frac{a^2 \underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{I}_c = \frac{a \underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad (1.32)$$

Tensiunile la locul de defect se obțin din relațiile:

$$\underline{U}_a = \underline{E}_d \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{U}_b = \underline{E}_d \frac{a^2 \underline{Z}_i}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \quad \underline{U}_c = \underline{E}_d \frac{a \underline{Z}_i}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad (1.33)$$

Scurtcircuit bifazat prin impedanță \underline{Z}_i

Condițiile la locul de defect sunt:

$$\underline{I}_b = -\underline{I}_c; \quad \underline{I}_h = 0; \quad \underline{U}_b - \underline{U}_c = \underline{I}_b \underline{Z}_i \quad (1.34)$$

Ținând cont de condițiile de la locul de defect și de relațiile cunoscute dintre mărimile de fază și componentele lor simetrice, pentru componentele simetrice de curent și de tensiune se obțin relațiile ([13]):

$$\underline{I}_d = -\underline{I}_i = \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h}, \quad \underline{I}_h = 0 \quad (1.35)$$

$$\underline{U}_d = \underline{I}_d(\underline{Z}_i + \underline{Z}_t), \quad \underline{U}_i = -\underline{I}_i \underline{Z}_i, \quad \underline{U}_h = 0 \quad (1.36)$$

Curenții de defect și tensiunile la locul de defect vor fi:

$$\underline{I}_a = 0, \quad \underline{I}_b = -j\sqrt{3} \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_t}, \quad \underline{I}_c = j\sqrt{3} \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_t} \quad (1.37)$$

$$\underline{U}_a = \frac{\underline{E}_d(2\underline{Z}_i + \underline{Z}_t)}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_t}, \quad \underline{U}_b = \frac{\underline{E}_d(a^2 \underline{Z}_i - \underline{Z}_t)}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_t}, \quad \underline{U}_c = \frac{\underline{E}_d(a \underline{Z}_i - \underline{Z}_t)}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_t} \quad (1.38)$$

Dublă punere la pământ prin impedanța \underline{Z}_t

Corespunzător figurii 1.7d), condițiile de defect sunt:

$$\underline{I}_h = 0; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_c = (\underline{I}_b + \underline{I}_c)\underline{Z}_t \quad (1.39)$$

Componentele simetrice de curent și tensiune, sunt date de expresiile cunoscute ([13]):

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d + \frac{\underline{Z}_i(\underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t)}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t}}, \quad \underline{I}_i = -\underline{I}_d \frac{\underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t}, \quad \underline{I}_h = -\underline{I}_d \frac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t} \quad (1.40)$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{I}_h \frac{\underline{Z}_i(\underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t)}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t}, \quad \underline{U}_h = \underline{I}_d \frac{\underline{Z}_i \underline{Z}_h}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_t} \quad (1.41)$$

1.4 Întreruperi

În figura 1.9 sunt prezentate problemele pe care le ridică analiza nesimetriilor longitudinale, în particular întreruperile.

Întreruperea unor faze – una, sau două – ale liniilor electrice poate apărea în cazurile de rupere a conductoarelor, sau când există aparate de comutație care nu acționează trifazat. Se vor considera doar cazurile de întrerupere a unui singur conductor, sau a două conductoare, dintr-un sistem electroenergetic, la care impedanțele pot fi considerate constante și deci se

poate folosi metoda componentelor simetrice pentru determinarea curenților și tensiunilor de frecvență fundamentală.

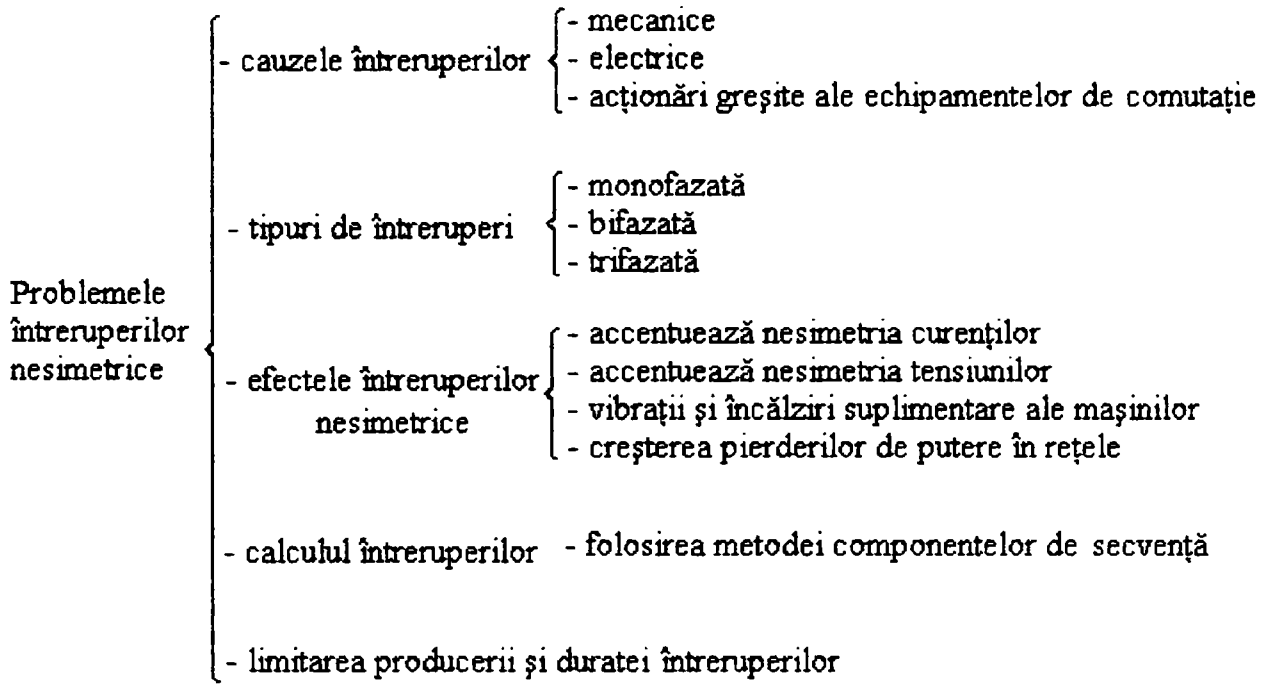


Figura 1.9 Problemele întreruperilor

Un conductor întrerupt

În figura 1.10a) este reprezentat cazul întreruperii fazei a între punctele M și N ale unei linii electrice aeriene, cu precizarea notațiilor pentru curenții și tensiunile de fază ([13]).

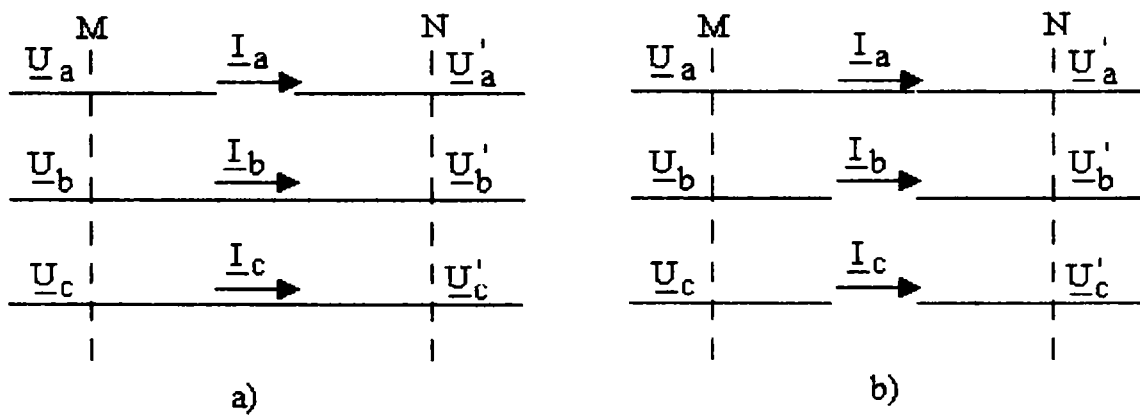


Figura 1.10 Întreruperea sistemului trifazat între punctele M și N ;

a – faza a întreruptă; b – fazele b și c întrerupte.

Condițiile la locul de defect, conform figurii 1.10a), sunt următoarele:

- căderea de tensiune între punctele M și N pe faza a ;

$\underline{U}_b - \underline{U}'_b = \Delta\underline{U}_b = 0$ - căderea de tensiune între punctele M și N pe faza b ;

$\underline{U}_c - \underline{U}'_c = \Delta\underline{U}_c = 0$ - căderea de tensiune între punctele M și N pe faza c ;

În componente simetrice, aceste ecuații au forma:

$$\begin{aligned}\Delta\underline{U}_{ah} = \Delta\underline{U}_{ad} = \Delta\underline{U}_{ai} &= \frac{1}{3}\Delta\underline{U}_a \\ \underline{I}_{ad} &= -(\underline{I}_{ai} + \underline{I}_{ah})\end{aligned}\quad (1.42)$$

Din aceste ecuații se observă că întreruperea unui conductor corespunde unor căderi de tensiune de valori egale în fiecare din rețelele de diferite succesiuni, înseriate la locul de întrerupere, în sensul de circulație al curenților.

Dacă se notează cu \underline{Z}_i și \underline{Z}_h impedanțele rețelelor de secvență inversă și homopolară, observate de la locul întreruperii, se obține:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ah} + \underline{I}_{ah}\underline{Z}_h &= 0 \\ \underline{U}_{ai} + \underline{I}_{ai}\underline{Z}_i &= 0\end{aligned}\quad (1.43)$$

Cu aceste relații se obțin ecuațiile de determinare a componentelor simetrice ale căderilor de tensiune, ca funcții de curentul \underline{I}_d :

$$\Delta\underline{U}_{ad} = \Delta\underline{U}_{ai} = \Delta\underline{U}_{ah} = -\underline{I}_{ah}\underline{Z}_h = -\underline{I}_{ai}\underline{Z}_i = \underline{I}_{ad} \frac{\underline{Z}_i \underline{Z}_h}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h}\quad (1.44)$$

Două conductoare întrerupte

Condițiile impuse curenților și tensiunilor în cazul defectului din figura 1.10b), sunt:

$$\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0\quad (1.45)$$

$$\underline{U}_a - \underline{U}'_a = \Delta\underline{U}_a = 0\quad (1.46)$$

În funcție de componentele lor simetrice, aceste condiții se exprimă astfel:

$$\begin{aligned}\Delta\underline{U}_{ad} &= -(\Delta\underline{U}_{ai} + \Delta\underline{U}_{ah}) \\ \underline{I}_{ad} &= \underline{I}_{ai} + \underline{I}_{ah} = \frac{\underline{I}_a}{3}\end{aligned}\quad (1.47)$$

Substituind $\Delta \underline{U}_{ai}$ și $\Delta \underline{U}_{ah}$ din relația (1.47), prin expresiile lor din (1.43) și înlocuind pe \underline{I}_{ai} și \underline{I}_{ah} în funcție de \underline{I}_{ad} , rezultă:

$$\Delta \underline{U}_{ad} = \underline{I}_{ah} \underline{Z}_h + \underline{I}_{ai} \underline{Z}_i = \underline{I}_{ad} (\underline{Z}_h + \underline{Z}_i) \quad (1.48)$$

1.5 Concluzii

Prezentul capitol și-a propus să treacă în revistă problemele principale pe care le comportă analiza și calculul regimurilor nesimetrice staționare din rețelele electrice. În acest sens, s-a făcut o clasificare a regimurilor nesimetrice, pentru a putea încadra scurtcircuitele-nesimetrice longitudinale și pentru a evidenția locul și rolul metodei componentelor de secvență în calculul regimurilor nesimetrice. S-a trecut la prezentarea formei parametrilor de secvență ai elementelor de sistem într-o formulare mai generală, considerând elemente de sistem fără conductor de protecție și cu conductor de protecție legat la pământ.

În continuare, au fost analizate scurtcircuitele și întreruperile, nesimetrice semnificative pentru rețelele electrice. S-au prezentat sintetic problemele pe care le ridică fiecare dintre aceste nesimetrice și s-a aplicat concret, pentru fiecare nesimetrie, metoda componentelor de secvență.

Contribuția autoarei în acest capitol, este prezentarea într-o manieră sintetică a problemelor pe care le comportă analiza nesimetriilor, scurtcircuitelor și întreruperilor.

CAP. 2 SCHEME ECHIVALENTE ȘI PARAMETRII DE SECVENȚĂ HOMOPOLARĂ AI TRANSFORMATOARELOR ȘI AUTOTRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE

Așa cum s-a arătat în capitolul precedent, în expresiile curenților de scurtcircuit nesimetriți, intervine impedanța de secvență homopolară a rețelei electrice. Această impedanță poate avea o valoare semnificativă, ce depinde de tipul elementului de rețea (linie, transformator, cablu etc.) și de situația relativă a acestuia față de pământ. Din acest motiv, s-a considerat util ca, în continuare, să se prezinte schemele echivalente și parametrii de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor trifazate.

2.1 Transformatoare cu două înfășurări

Impedanța de secvență homopolară a transformatoarelor depinde în mare măsură de construcția circuitului magnetic și de schema de conexiuni a înfășurărilor.

Întrucât transformatoarele sunt construite trifazat simetrice și deoarece secvența directă (sau inversă) de curenți, sau tensiuni, reprezintă un sistem trifazat simetric, tensiunea electromotoare indusă de fluxul din miez se transmite în întregime în secundar și astfel transformatorul funcționează ca un element intermediar (de transfer) în schemă [4].

În cazul apariției sistemului de curenți homopolari, pământul reprezintă calea de întoarcere a acestor curenți spre sursa de alimentare și pentru ca transformatoarele din sistem să admită circulația acestor curenți homopolari, este necesar ca ele să aibă neutrul corespunzător înfășurării în care apar curenții homopolari legat la pământ. Astfel, impedanța de succesiune homopolară a transformatorului, determinată dinspre înfășurarea conectată în triunghi, sau în stea cu neutrul izolat, este infinită, deoarece în aceste condiții este exclusă posibilitatea circulației curenților homopolari în transformatorul dat, independent de modul de conexiune al celorlalte înfășurări. O valoare finită a impedanței de secvență homopolară a transformatorului, se poate obține numai dinspre partea înfășurării acestuia conectată în zig-zag sau stea cu neutrul legat la pământ ([3], [4], [101]).

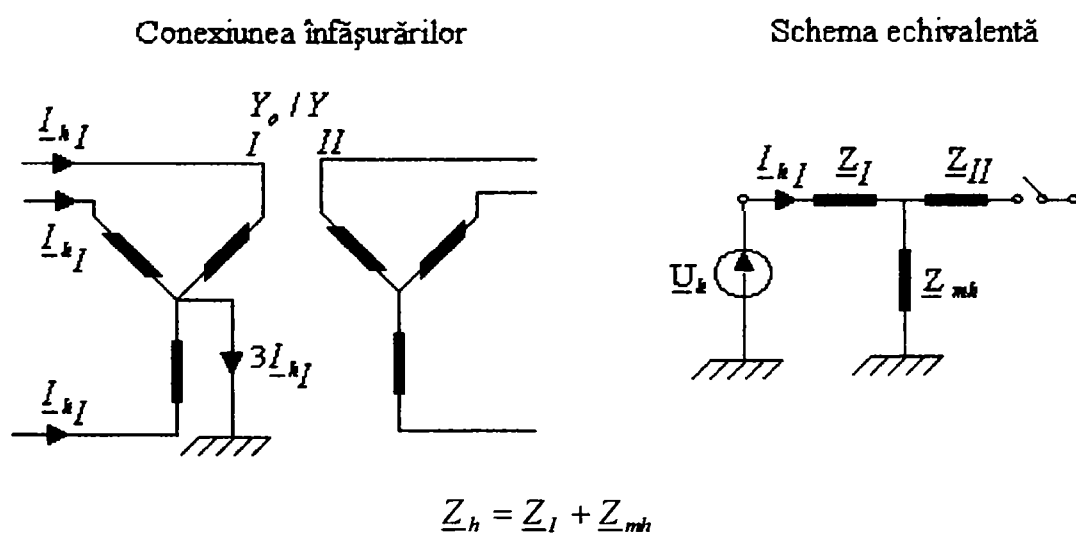
În figurile 2.1 *a*, *b* și *c* sunt date principalele scheme de conexiune a înfășurărilor transformatorului cu două înfășurări, la care tensiunea de succesiune homopolară aplicată la înfășurarea *I* provoacă curenți de aceeași succesiune într-una, sau în ambele înfășurări. În partea dreaptă a fiecărei scheme de conexiune a înfășurărilor, sunt indicate schemele

echivalente ale transformatorului pentru curentul de succesiune homopolară [101]. Sunt, de asemenea, prezentate expresiile impedanțelor homopolare văzute la borne. S-au folosit următoarele notații: \underline{Z}_{mh} , reprezintă impedanța de magnetizare de secvență homopolară a transformatorului; \underline{Z}_I , reprezintă impedanța de dispersie a înfășurării primare; \underline{Z}_{II} , reprezintă impedanța de dispersie a înfășurării secundare, raportată la primar.

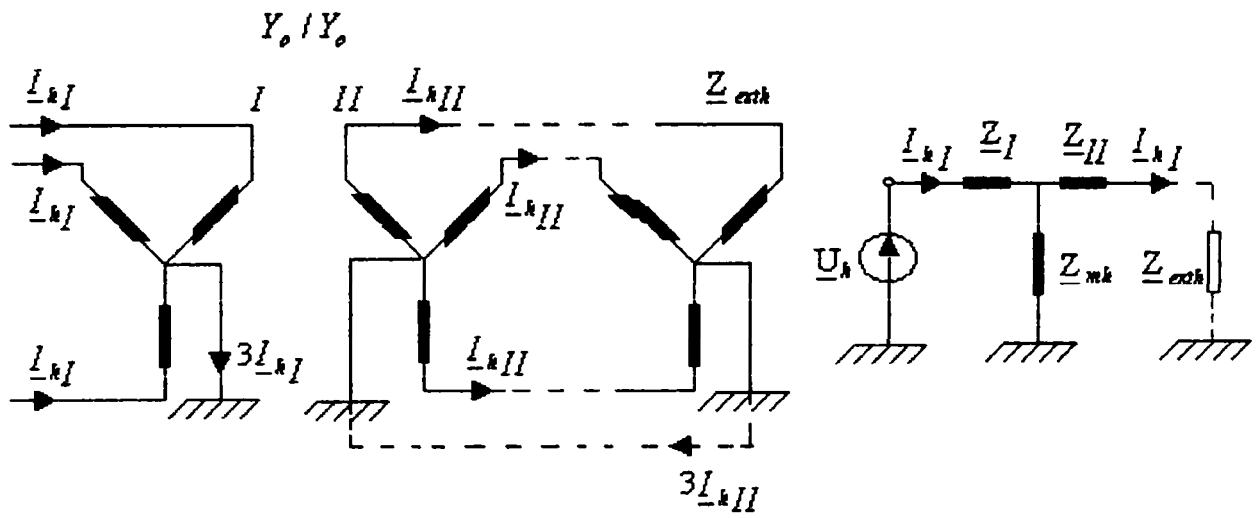
Dacă transformatorul prezintă neutrul legat la pământ (conexiunea zig-zag sau stea cu neutrul legat la pământ), curenții homopolari vor pătrunde în transformator, străbat primarul acestuia, dar nu întotdeauna se pot forma curenți în secundar. La conexiunea secundară în stea a transformatorului, curenții homopolari nu pot lua naștere și deci secundarul este în gol (fig. 2.1a).

În conexiunea secundară în stea cu neutrul legat la pământ, curenții homopolari se pot închide în secundarul transformatorului, cu condiția ca în rețeaua legată galvanic cu acest secundar să mai existe încă un transformator (sau un alt element de rețea) ce are neutrul legat la pământ și care asigură o cale de închidere a curenților homopolari (fig. 2.1b). Atunci când această condiție este respectată, în schema de succesiune homopolară participă atât transformatorul, cât și toate elementele prin care circulă curenții de succesiune homopolară, pe ambele părți ale transformatorului. Dacă această condiție nu este respectată, schema echivalentă va fi identică cu aceea corespunzătoare conexiunii înfășurărilor Y_o / Y (fig. 2.1a), ceea ce corespunde regimului de mers în gol al transformatorului.

În conexiunea secundară în triunghi, curenții homopolari se pot închide, dar nu pot părăsi transformatorul (fig. 2.1c). Întreaga rețea conectată pe partea triunghiului nu intră în schema de succesiune homopolară, în cazul în care tensiunea homopolară este aplicată pe partea înfășurărilor legate în stea cu neutrul la pământ.

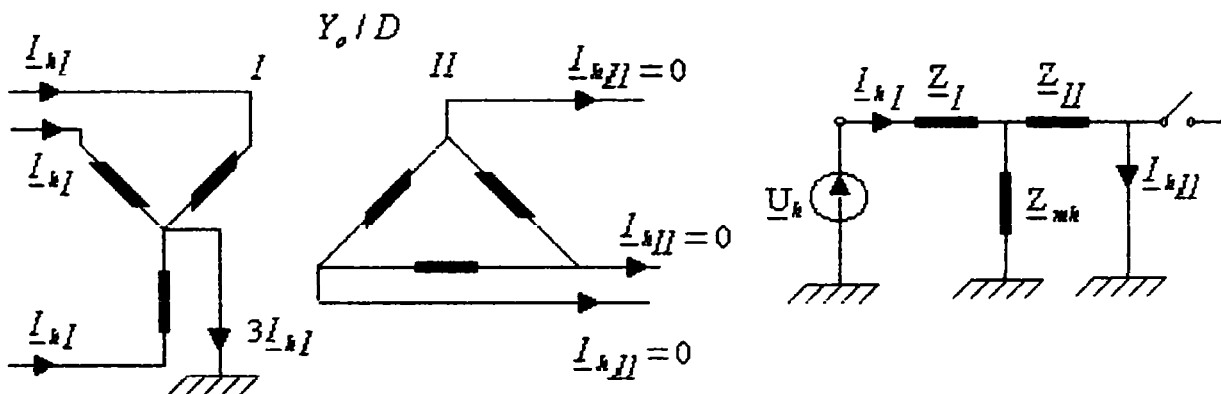


a)



$$\underline{Z}_h = \underline{Z}_I + \frac{(\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{exth})\underline{Z}_{mh}}{\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{exth} + \underline{Z}_{mh}}$$

b)



$$\underline{Z}_h = \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{II}\underline{Z}_{mh}}{\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{mh}}$$

c)

Fig. 2.1 Conexiuni ale transformatoarelor cu două înfășurări și schemele lor echivalente pentru curenții de succesiune homopolară

În ceea ce privește impedanța de magnetizare de secvență homopolară Z_{mh} , aceasta depinde de modul în care fluxul inductor al unei faze înlănțuie celelalte faze. Din acest motiv, valoarea impedanței transversale la secvența homopolară este mult influențată de construcția miezului transformatorului. Din acest punct de vedere, se pot deosebi două cazuri: transformatoare cu coloane suplimentare și transformatoare ce nu au coloane suplimentare (transformatorul cu 3 coloane).

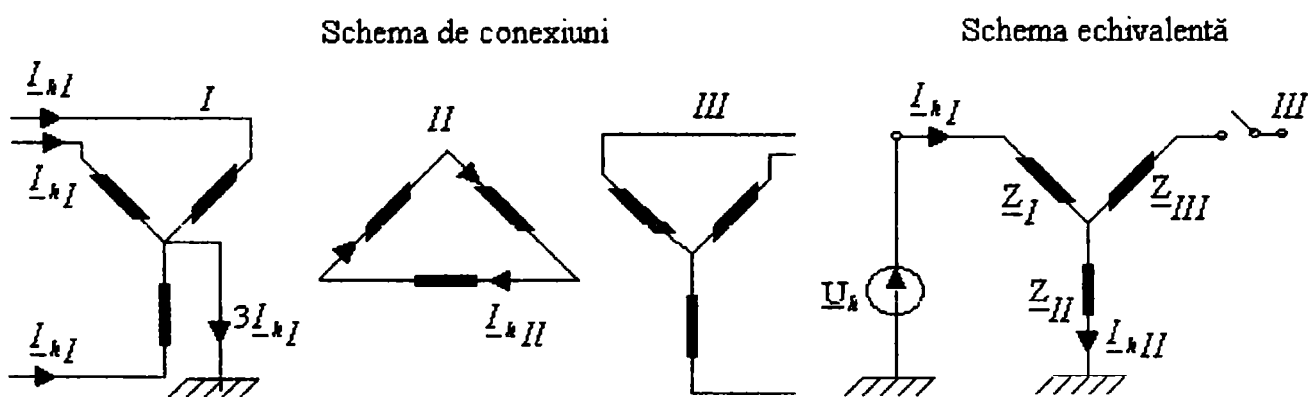
În cazul unui transformator cu 4 sau 5 coloane, sau în cazul unui grup de 3 transformatoare monofazate, la apariția regimului de funcționare homopolar fluxul magnetic al transformatorului se închide prin fier – regim de flux liber- și, în consecință, impedanța de magnetizare este mare.

În cazul transformatoarelor trifazate cu 3 coloane, fluxurile magnetice de succesiune homopolară sunt obligate să se închidă prin miezul izolant și cuva transformatorului. Pentru ca fluxul magnetic să poată străbate un circuit cu o reluctanță atât de mare, este necesar un curent de magnetizare mare; impedanța de magnetizare de secvență homopolară a acestui transformator, are o valoare mică. Pentru conexiunea Y_o/D , se admite ca impedanța homopolară a transformatorului să fie egală cu impedanța de secvență directă: $\underline{Z}_h \approx \underline{Z}_d = \underline{Z}_r$. În cazul conexiunii Y_o/Y : $\underline{Z}_h \approx \underline{Z}_l + \underline{Z}_{mh}$. Pentru conexiunea Y_o/Y_0 , în cazul în care circuitul secundar, în totalitatea lui, admite o circulație de curenți homopolari și dacă se neglijează influența impedanței de magnetizare \underline{Z}_{mh} , se poate considera că: $\underline{Z}_h \approx \underline{Z}_l + \underline{Z}_{ll}$. Pentru un calcul exact, trebuie însă să se țină cont de valoarea impedanței de magnetizare \underline{Z}_{mh} și atunci impedanța de secvență homopolară se calculează conform fig. 2.1b).

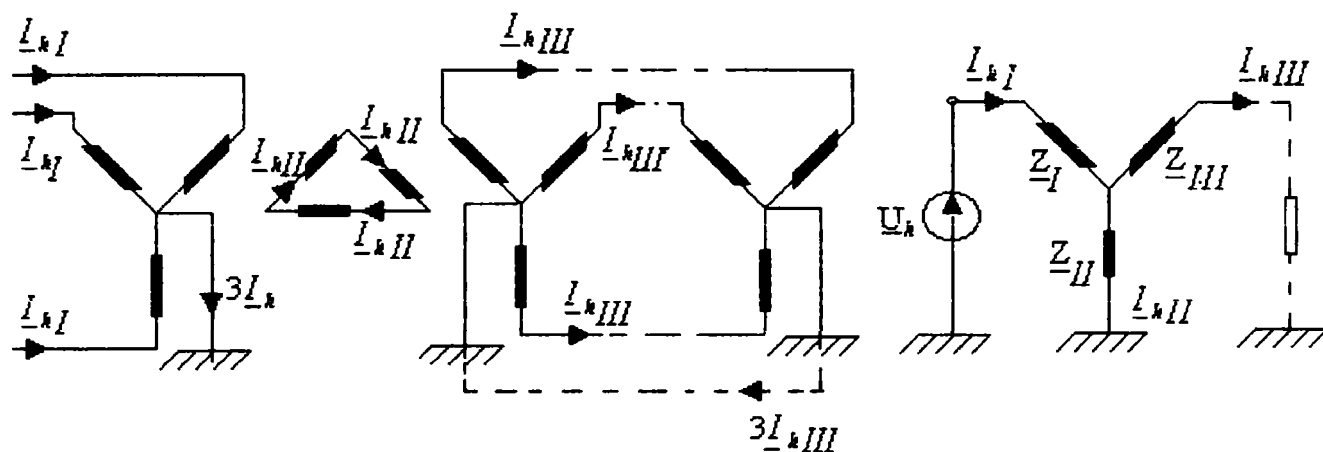
2.2 Transformatoare cu trei înfășurări

În figura 2.2 sunt date schemele echivalente pentru cele mai frecvente scheme de conexiuni ale transformatoarelor cu 3 înfășurări ([101]).

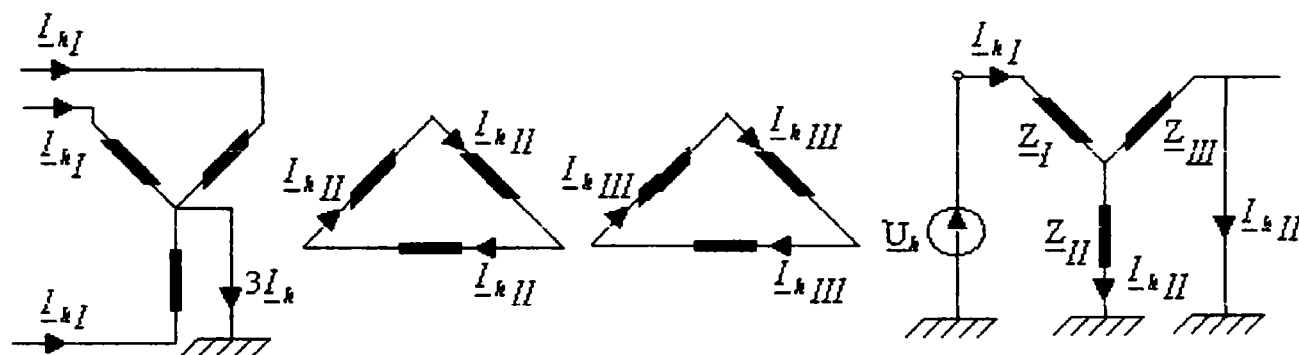
În cazul transformatoarelor cu 3 înfășurări, deoarece acestea au întotdeauna o înfășurare în triunghi, influența impedanței de magnetizare \underline{Z}_{mh} poate fi neglijată.



a)



b)



c)

Fig. 2.2 Conexiuni ale transformatoarelor cu două înfășurări și schemele lor echivalente pentru curenții de succesiune homopolară

În varianta 2.2a), curentul de succesiune homopolară în înfășurarea III nu există și în acest caz $\underline{Z}_h = \underline{Z}_I + \underline{Z}_{II}$.

În varianta 2.2b), se presupune că se asigură o cale pentru închiderea curenților de succesiune homopolară pe partea înfășurării III. În acest caz, în schema de succesiune homopolară, transformatorul trebuie introdus prin schema sa echivalentă.

În varianta 2.2c), compensarea curentului de succesiune homopolară în înfășurarea I, se efectuează cu ajutorul curenților induși în înfășurările II și III. În acest caz,

$$\underline{Z}_h = \underline{Z}_I + \frac{\underline{Z}_{II} \underline{Z}_{III}}{\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{III}}$$

2.3 Autotransformatoare

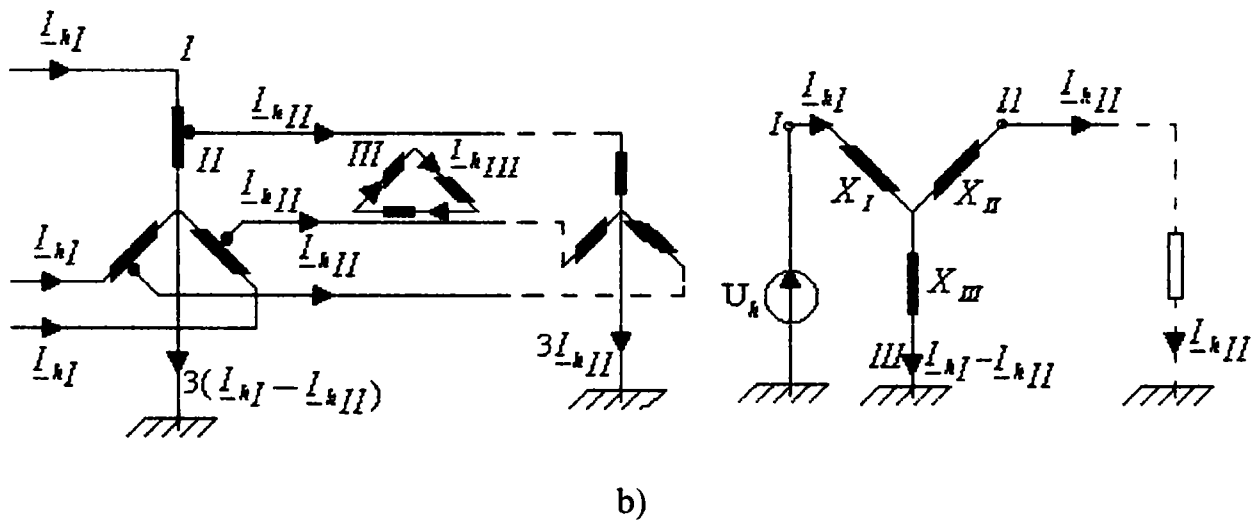
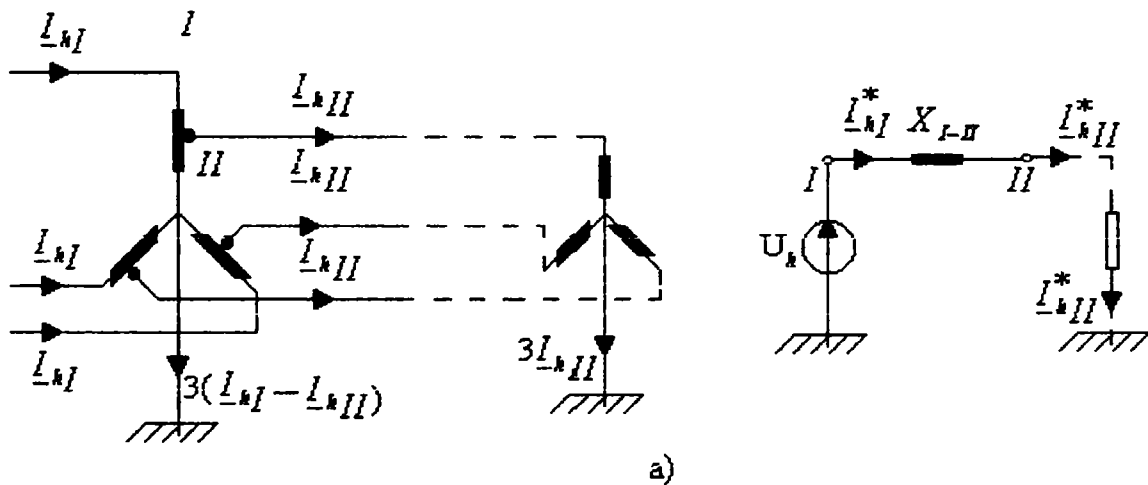
Înfășurările autotransformatorului sunt cuplate între ele nu numai magnetic, ci și galvanic și de aceea circulația curenților de succesiune homopolară prin aceste înfășurări

prezintă unele particularități care trebuie introduse în schema echivalentă de succesiune homopolară a autotransformatorului. În anumite condiții, chiar în cazul în care neutrul autotransformatorului este izolat, este posibilă o circulație de curenți homopolari [101].

În cazul legării la pământ directe a neutrului autotransformatorului, schema sa echivalentă de succesiune homopolară este asemănătoare cu schema unui transformator de același tip. Dacă autotransformatorul nu are înfășurare terțiară, iar pe partea secundară se asigură o cale pentru întoarcerea curenților de succesiune homopolară, schema sa echivalentă (fig. 2.3a), în care se neglijează curentul de magnetizare și rezistența, este reprezentată prin reactanța de dispersie totală X_{I-II} , care este aceeași cu a unui transformator cu două înfășurări, cu conexiunea Y_0/Y_0 , pentru care se consideră $X_{msh} \rightarrow \infty$.

În cazul în care există înfășurare terțiară conectată în triunghi (fig. 2.3b), schema echivalentă are aceeași formă ca și cea a transformatorului cu trei înfășurări, de aceeași conexiune.

Dacă neutrul autotransformatorului este izolat (fig. 2.3c), schema de succesiune homopolară corespunde funcționării acestuia la mers în gol, fiind analoagă cu cea a unui transformator cu conexiunea Y_0/Y .



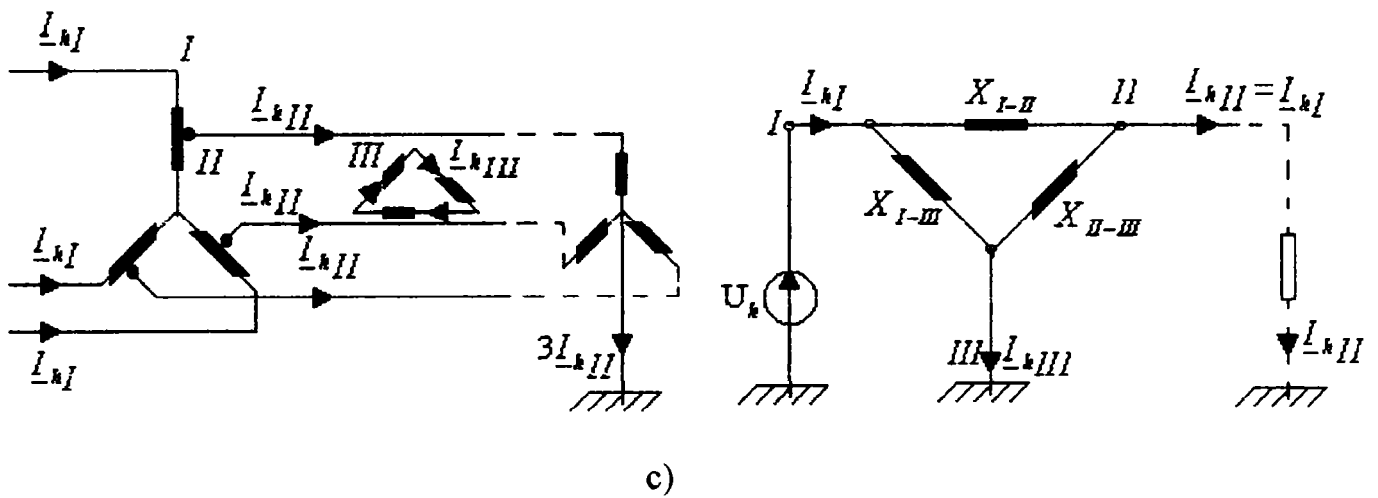


Figura 2.3 Conexiuni ale autotransformatoarelor cu două și cu trei înfășurări și schemele lor echivalente, corespunzătoare curenților de succesiune homopolară

Valoarea curentului care se închide prin pământ nu poate fi obținută direct din schema echivalentă de succesiune homopolară a autotransformatorului. Ținând cont de sensurile curenților din figura 2.3, curentul spre pământ este egal cu de 3 ori valoarea diferenței curenților homopolari din înfășurarea primară și cea secundară ($I_N = 3(I_{hI} - I_{hII})$); fiecare dintre acești curenți trebuie raportat la treapta de tensiune respectivă și nu la acea treaptă unică pentru care s-a întocmit schema echivalentă.

2.4 Concluzii

Scopul acestui capitol a fost acela de a prezenta schemele echivalente și parametrii de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor trifazate și de a evidenția rolul conexiunii înfășurărilor și al construcției circuitului magnetic.

CAP. 3 IMPEDANȚA PROPRIE A UNEI BUCLE MONOFAZATE CONDUCTOR-PĂMÂNT ȘI IMPEDANȚA MUTUALĂ DINTRE DOUĂ BUCLE MONOFAZATE CONDUCTOR-PĂMÂNT

În expresiile impedanțelor de diferite succesiuni ale liniilor electrice aeriene, intervin impedanța proprie a unei bucle monofazate conductor-pământ și impedanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ. Din acest motiv, în acest capitol se prezintă o sinteză a relațiilor de calcul pentru impedanțele proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ, prezentate în literatura de specialitate ([9], [13], [29], [63], [77], [80]). Se face apoi un studiu al influenței diversilor factori asupra impedanțelor proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ.

3.1 Considerații generale

În figura 3.1 se prezintă modul în care se determină prin încercări experimentale impedanța unei bucle monofazate conductor-pământ. Se aplică o tensiune U față de pământ la o extremitate a conductorului a , care are cealaltă extremitate legată la pământ și se măsoară curentul. Utilizând indicele adițional p pentru a indica întoarcerea prin pământ, se scrie:

$$\underline{Z}_{aa-p} = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

\underline{Z}_{aa-p} reprezintă impedanța proprie a buclei monofazate conductor – pământ.

Din figura 3.1b, impedanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ se obține aplicând o tensiune U_a față de pământ la o extremitate a conductorului a , cealaltă extremitate a acestui conductor fiind legată la pământ și măsurând curentul în conductorul a și tensiunea U_b între conductorul b și pământ, o extremitate a conductorului b fiind legată la pământ. Rezultă astfel:

$$\underline{Z}_{ab-p} = \frac{U_b}{I_a} \quad (3.2)$$

\underline{Z}_{ab-p} reprezintă impedanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ.

Impedanțele \underline{Z}_{aa-p} și \underline{Z}_{ab-p} pot fi exprimate în funcție de componentele lor rezistive și reactive, prin următoarele relații cunoscute:

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + R_{aa-p}) + j(x_i + X_{aa-p}) \quad (3.3)$$

$$\underline{Z}_{ab-p} = R_{ab-p} + jX_{ab-p} \quad (3.4)$$

în care: r_c este rezistența conductorului, x_i este reactanța internă a conductorului, R_{aa-p} este rezistența căii de întoarcere prin pământ corespunzătoare buclei monofazate conductor-pământ, X_{aa-p} este reactanța - componentă a impedanței proprii a buclei monofazate conductor-pământ - exterioară conductorului, R_{ab-p} este rezistența căii comune de întoarcere prin pământ, dacă se consideră impedanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ și X_{ab-p} este reactanța mutuală dintre cele două bucle monofazate conductor-pământ.

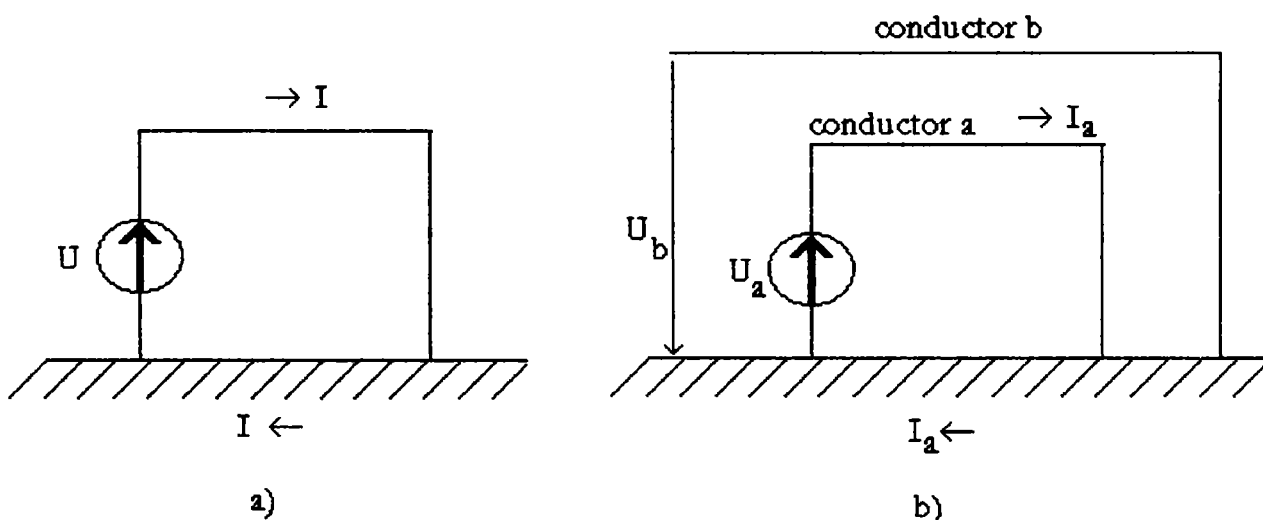


Figura 3.1

Impedanțe cu cale de întoarcere prin pământ determinate prin măsurări:

- a)-impedanța proprie a unui conductor cu întoarcere prin pământ
- b)-impedanța mutuală dintre 2 conductoare cu întoarcere comună prin pământ

Literatura de specialitate menționează pentru calculul impedanțelor proprii și mutuale ale buclor monofazate conductor-pământ, formulele lui Carson, relațiile lui Rudenberg, ale lui Sunde și ale lui Dubanton ([9], [13], [29], [63], [77], [80]). În continuare, se face o prezentare a acestor relații.

3.2 Formulele lui Carson

Formulele lui Carson pentru impedanțe proprii cu cale de întoarcere prin pământ și impedanțele mutuale cu cale comună de întoarcere prin pământ, sunt [9]:

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + R_{aa-p}) + j(x_i + X_{aa-p}) \quad [\Omega/km] \quad (3.5)$$

$$\underline{Z}_{ab-p} = R_{ab-p} + jX_{ab-p} \quad [\Omega/km] \quad (3.6)$$

în care $z = r_c + jx_i$, reprezintă impedanța internă a conductorului, iar R_{aa-p} , R_{ab-p} , X_{aa-p} și X_{ab-p} , sunt date de următoarele expresii:

$$R_{aa-p} = \pi^2 f 10^{-4} + \Delta R_{aa-p} \quad [\Omega/km] \quad (3.7)$$

$$R_{ab-p} = \pi^2 f 10^{-4} + \Delta R_{ab-p} \quad [\Omega/km] \quad (3.8)$$

$$X_{aa-p} = \omega 10^{-3} (0,4602 \lg \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 1,436) + \Delta X_{aa-p} \quad [\Omega/km] \quad (3.9)$$

$$X_{ab-p} = \omega 10^{-3} (0,4602 \lg \frac{1}{d_{ab}} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 1,295) + \Delta X_{ab-p} \quad [\Omega/km] \quad (3.10)$$

unde: $\omega = 2\pi f$, iar f reprezintă frecvența în [Hz]; d reprezintă diametrul conductorului, în [cm]; ρ este rezistivitatea solului, în [Ωm]; d_{ab} reprezintă distanța dintre conductoare, în [m].

Termenii ΔR_{aa-p} , ΔR_{ab-p} , ΔX_{aa-p} și ΔX_{ab-p} sunt dați, în Ω/km , de următoarele relații:

$$\Delta R_{aa-p} = \omega 10^{-4} \left[\frac{-5,3}{10^3} h_a \sqrt{\frac{f}{\rho}} + \frac{18,1}{10^6} h_a^2 \frac{f}{\rho} (2,8 + \lg \frac{1}{h_a} \sqrt{\frac{\rho}{f}}) + \frac{111}{10^{10}} h_a^3 \frac{f}{\rho} \sqrt{\frac{f}{\rho}} - \frac{81,2}{10^{13}} h_a^4 \frac{f^2}{\rho^2} \right] \quad (3.11)$$

$$\Delta R_{ab-p} = \omega 10^{-4} \left[-\frac{2,64}{10^3} \sqrt{\frac{f}{\rho}} D_{ab} \cos \theta + \frac{45,2}{10^7} \frac{f}{\rho} D_{ab}^2 \cos 2\theta (3,15 + \lg \frac{1}{D_{ab}} \sqrt{\frac{\rho}{f}}) + \frac{19,6}{10^7} \frac{f}{\rho} D_{ab}^2 \theta \sin 2\theta + \frac{138,9}{10^{11}} \frac{f}{\rho} \sqrt{\frac{f}{\rho}} D_{ab}^3 \cos 3\theta - \frac{508}{10^{15}} \frac{f^2}{\rho^2} D_{ab}^4 \cos 4\theta \right] \quad (3.12)$$

$$\Delta X_{aa-p} = \omega 10^{-4} \left[\frac{5,3 h_a}{10^3} \sqrt{\frac{f}{\rho}} - \frac{61,7 h_a^2}{10^7} \frac{f}{\rho} + \frac{111 h_a^3}{10^{10}} \frac{f}{\rho} \sqrt{\frac{f}{\rho}} - \frac{238,1 h_a^4}{10^{13}} \frac{f^2}{\rho^2} (3,1 + \lg \frac{1}{h_a} \sqrt{\frac{\rho}{f}}) \right] \quad (3.13)$$

$$\Delta X_{ab-p} = \omega 10^{-4} \left[\frac{2,64}{10^3} \sqrt{\frac{f}{\rho}} D_{ab} \cos \theta - \frac{15,32}{10^7} \frac{f}{\rho} D_{ab}^2 \cos 2\theta + \frac{138,9}{10^{11}} \frac{f}{\rho} \sqrt{\frac{f}{\rho}} D_{ab}^3 \cos 3\theta - \frac{646,6}{10^{15}} \frac{f^2}{\rho^2} D_{ab}^4 \theta \sin 4\theta - \frac{148,9}{10^{15}} \frac{f^2}{\rho^2} D_{ab}^4 \cos 4\theta (3,33 + \lg \frac{1}{D_{ab}} \sqrt{\frac{\rho}{f}}) \right] \quad (3.14)$$

unde:

- D_{ab} reprezintă distanța de la un conductor la imaginea celuilalt, în m (figura 3.2);
- θ pentru impedanțele mutuale, este unghiul format de liniile desenate de la un conductor la imaginea lui proprie și la imaginea celuilalt conductor (fig. 3.2) și este dat de următoarea relație:

$$\theta = \arccos \frac{h_a + h_b}{D_{ab}} = \arcsin \frac{H_{ab}}{D_{ab}} \quad (3.15)$$

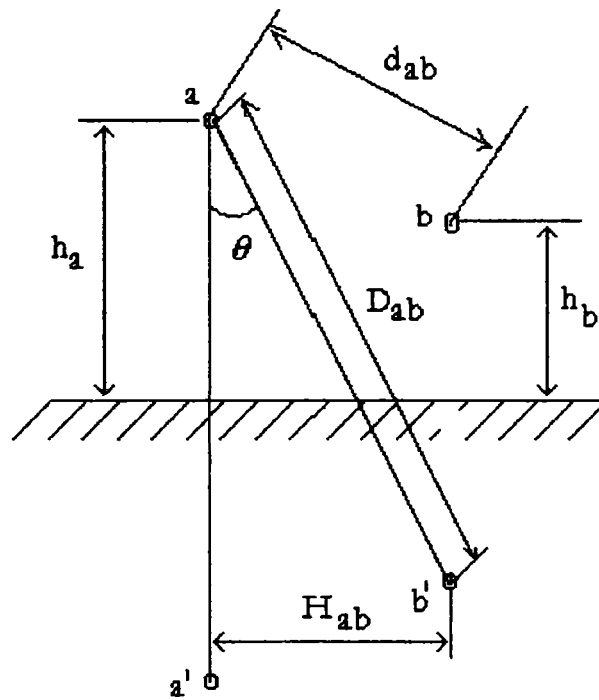


Figura 3.2

Schemă reprezentând conductoarele a și b cu imaginile lor, unghiul θ și distanțele

D_{ab} , d_{ab} , H_{ab} , h_a , h_b .

3.3 Relațiile lui Rudenberg

În calculul impedanței unui conductor cu întoarcere prin pământ, R. Rudenberg presupune că un conductor subteran de diametru d situat la adâncimea h față de suprafața solului și un conductor aerian de diametru d situat la înălțimea h față de suprafața solului, pot

fî înlocuite printr-un conductor cu diametru d , situat la suprafața solului, în centrul unui canal semicircular de rază h ([80]).

Considerând că solul are rezistivitate uniformă, a obținut pentru impedanța căii de întoarcere prin pământ, următoarea expresie:

$$\underline{Z}_p = R_p + jX_p = \pi^2 f 10^{-4} + j2\omega 10^{-4} \left(\ln \frac{1}{h} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 6,33 \right) \quad [\Omega/km] \quad (3.16)$$

Impedanța proprie a oricărui conductor cu întoarcere prin pământ include, în plus față de \underline{Z}_p , impedanța \underline{Z}_{aa-h} corespunzătoare fluxului prin canalul de rază h :

$$\underline{Z}_{aa-h} = (r_c + jx_i) + j2\omega 10^{-4} \ln \frac{2h}{d} \quad [\Omega/km] \quad (3.17)$$

r_c , d , x_i - rezistența, diametrul și reactanța internă ale conductorului.

Adunând (3.16) cu (3.17), se obține pentru impedanța proprie a conductorului a cu întoarcere prin pământ, în Ω/km , expresia:

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + R_p) + j(x_i + X_{aa-p}) = (r_c + \pi^2 f 10^{-4}) + j[x_i + 2\omega 10^{-4} \left(\ln \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 6,33 \right)] \quad (3.18)$$

Impedanța mutuală dintre două conductoare paralele a și b , situate în interiorul canalului de rază h , cu distanța D_{ab} între centrele lor, cu întoarcere comună prin pământ, este dată de relația:

$$\underline{Z}_{ab-p} = \underline{Z}_p + \underline{Z}_{ab-h} = (R_p + jX_p) + j2\omega 10^{-4} \ln \frac{h}{D_{ab}} \quad [\Omega/km] \quad (3.19)$$

adică:

$$\underline{Z}_{ab-p} = R_p + jX_{ab-p} = \pi^2 f 10^{-4} + j2\omega 10^{-4} \left(\ln \frac{1}{D_{ab}} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 6,33 \right) \quad [\Omega/km] \quad (3.20)$$

Ecuțiile lui Rudenberg (3.18) și (3.20) pentru \underline{Z}_{aa-p} și \underline{Z}_{ab-p} , la frecvențele sistemelor energetice, sunt independente de înălțimea conductoarelor față de sol.

3.4 Relațiile lui Sunde

Sunde propune următoarele expresii ale impedanței căii de întoarcere prin sol, necesară la calculul impedanțelor proprii și mutuale de secvență homopolară ale liniilor electrice ([76], [77]):

$$\underline{Z}_{pp} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h_a x}}{\sqrt{x^2 + \gamma_p^2}} dx \quad (3.21)$$

$$\underline{Z}_{pm} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(h_a+h_b)x}}{\sqrt{x^2 + \gamma_p^2}} \cos(H_{ab}x) dx \quad (3.22)$$

unde:

- \underline{Z}_{pp} reprezintă impedanța proprie a căii de întoarcere prin sol;
- \underline{Z}_{pm} - reprezintă impedanța mutuală dintre două căi de întoarcere prin sol;
- γ_p - reprezintă constanta de propagare în sol: $\gamma_p = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)}$;
- H_{ab} - reprezintă distanța orizontală dintre conductoarele a și b .

Se observă că aceste expresii sunt similare celor deduse de Carson pentru joasă frecvență ($\sigma \gg \omega\epsilon_0\epsilon_r$).

Din cauza dificultăților de evaluare numerică a expresiilor (3.21) și (3.22), Sunde propune pentru expresia (3.22) următoarea formulă de aproximare:

$$\underline{Z}'_{pp} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_p h_a}{\gamma_p h_a}\right) \quad (3.23)$$

Comparațiile efectuate între expresiile (3.21) și (3.23), dovedesc faptul că relația (3.23) reprezintă o excelentă aproximare a relației (3.21) ([33]).

În cele ce urmează, se prezintă o extindere a aproximării logaritmice propusă de Sunde pentru impedanța mutuală dintre două conductoare cu cale de întoarcere prin pământ ([64]). Pentru aceasta, se folosește relația lui Euler:

$$\cos(H_{ab}x) = \frac{e^{jH_{ab}x} + e^{-jH_{ab}x}}{2} \quad (3.24)$$

Introducând (3.24) în (3.22), rezultă:

$$\underline{Z}'_{pm} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \left[\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2t_{ab}x}}{\sqrt{x^2 + \gamma_p^2} + x} dx + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2t_{ab}^*x}}{\sqrt{x^2 + \gamma_p^2} + x} dx \right] \quad (3.25)$$

în care:

$$t_{ab} = \frac{h_a + h_b}{2} + j \frac{H_{ab}}{2} \quad (3.26)$$

$$t_{ab}^* = \frac{h_a + h_b}{2} - j \frac{H_{ab}}{2} \quad (3.27)$$

Utilizând expresia (3.23) de aproximare a relației (3.21), înseamnă că se poate scrie:

$$\frac{j\omega\mu_0}{2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2t_{ab}x}}{\sqrt{x^2 + \gamma_p^2} + x} dx \cong \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_p t_{ab}}{\gamma_p t_{ab}}\right) \quad (3.28)$$

$$\frac{j\omega\mu_0}{2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2t_{ab}^*x}}{\sqrt{x^2 + \gamma_p^2} + x} dx \cong \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_p t_{ab}^*}{\gamma_p t_{ab}^*}\right) \quad (3.29)$$

Introducând (3.28) și (3.29) în (3.25), se obține următoarea formulă de aproximare pentru impedanța mutuală a căii de întoarcere prin sol:

$$\underline{Z}'_{pm} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln\left[\frac{(1 + \gamma_p \frac{h_a + h_b}{2})^2 + (\gamma_p \frac{H_{ab}}{2})^2}{(\gamma_p \frac{h_a + h_b}{2})^2 + (\gamma_p \frac{H_{ab}}{2})^2} \right] \quad (3.30)$$

Pentru a obține impedanța proprie a buclei monofazate, la relația (3.23) trebuie adunată impedanța proprie totală a conductorului, rezultând astfel pentru impedanța proprie a buclei monofazate conductor-pământ, expresia:

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + jx_l) + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{d} + \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_p h_a}{\gamma_p h_a}\right) \quad (3.31)$$

Pentru impedanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ, la expresia (3.30) trebuie adunată impedanța mutuală dintre cele două conductoare ce aparțin celor două bucle monofazate conductor-pământ (figura 3.2), rezultând astfel următoarea expresie:

$$\underline{Z}_{ab-p} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}} + \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \left[\frac{(1 + \gamma_p \frac{h_a + h_b}{2})^2 + (\gamma_p \frac{H_{ab}}{2})^2}{(\gamma_p \frac{h_a + h_b}{2})^2 + (\gamma_p \frac{H_{ab}}{2})^2} \right] \quad (3.32)$$

3.5 Relațiile lui Dubanton

În 1981, Deri introduce o nouă metodă de determinare a distribuției curentului din sol, metoda “*planului complex*”. Conceptul de *plan complex* este sugerat de Dubanton, însă demonstrația matematică îi aparține lui Deri ([29]). Conform acestei metode, impedanțele proprii și impedanțele mutuale de secvență homopolară, sunt date de următoarele expresii, cunoscute în literatura de specialitate ca ecuațiile lui Dubanton ([29]):

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + jx_i) + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{h + \underline{p}}{d} \right) \quad (3.33)$$

$$\underline{Z}_{ab-p} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(h_a + h_b + 2\underline{p})^2 + H_{ab}^2}}{(h_a - h_b)^2 + H_{ab}^2} \right) \quad (3.34)$$

H_{ab} reprezintă distanța orizontală dintre conductoarele a și b .

\underline{p} în expresiile de mai sus e definit astfel:

$$\underline{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} \quad (3.35)$$

sau dacă se notează cu:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (3.36)$$

atunci:

$$\frac{1}{\underline{p}} = (1 + j) \frac{1}{\delta} \quad (3.37)$$

Dacă se înlocuiește (3.35) în (3.36), pentru $\underline{p} \gg h$ rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{aa-p} &= (r_c + jx_i) + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1+j}{d} \right) = (r_c + jx_i) + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2}}{2} \delta + (-j \frac{\pi}{4}) \right] = \\ &= (r_c + \pi^2 f 10^{-4}) + j(x_i + 2\omega 10^{-4} \ln 2 \frac{711,8}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}}) \end{aligned} \quad (3.38)$$

adică:

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + \pi^2 f 10^{-4}) + j[x_i + 2\omega 10^{-4} (\ln \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 6,56)] \quad (3.39)$$

3.6 Influența diversilor factori asupra parametrilor buclelor monofazate conductor-pământ

În continuare sunt prezentate comparații între rezultatele numerice obținute cu relațiile prezentate, comparații efectuate pentru componentele activă și reactivă ale impedanțelor buclelor monofazate conductor-pământ. Este prezentată, de asemenea, o analiză a influenței diversilor factori asupra parametrilor buclelor monofazate conductor-pământ.

În cazul regimurilor homopolare, la valoarea rezistenței și reactanței conductorului, se adaugă valoarea rezistenței și reactanței căii de întoarcere prin pământ, obținându-se astfel valoarea impedanței homopolare a buclei monofazate conductor-pământ.

În tabelele A1.1 și A1.2 din Anexa A1, sunt date valorile rezistenței căii de întoarcere prin sol, în $[\Omega/km]$, dacă se consideră un singur conductor electric ce face parte dintr-o buclă monofazată conductor-pământ, în funcție de rezistivitatea electrică a solului și de înălțimea conductorului față de suprafața solului. Valorile sunt obținute cu relația (3.7) a lui Carson și relația (3.23) a lui Sunde, din care s-a reținut doar componenta rezistivă. Aceste valori sunt prezentate și sub formă grafică în figura 3.3.

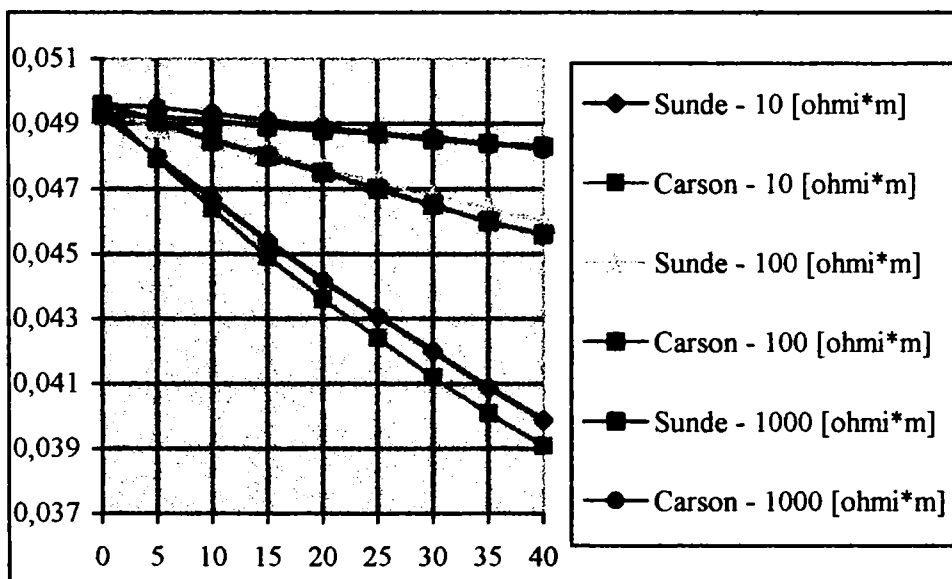


Figura 3.3 Rezistența căii de întoarcere prin sol, în $[\Omega/km]$, în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului în $[m]$

În figura 3.4 se prezintă rezistența căii de întoarcere prin sol în funcție de rezistivitatea electrică a solului, pentru diferite valori ale înălțimii conductorului față de suprafața solului.

Din cele două figuri, se poate observa faptul că influența înălțimii conductorului față de suprafața solului, depinde în mare măsură de rezistivitatea electrică a solului. Astfel, pentru valori ale rezistivității electrice a solului mai mari de $(250-300) \Omega m$, se poate considera că rezistența căii de întoarcere prin sol este, practic, independentă de înălțimea conductorului față de suprafața solului.

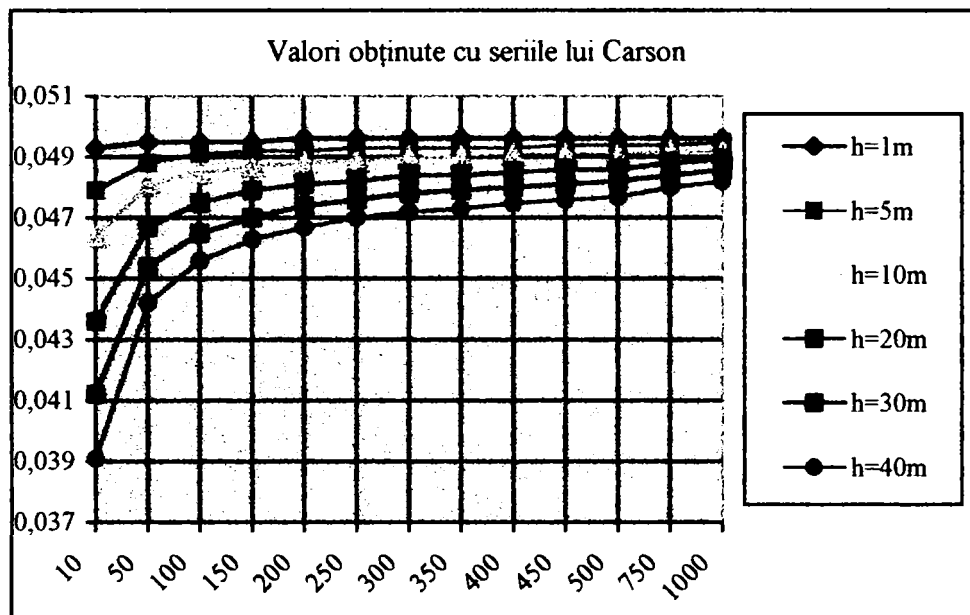


Figura 3.4 Rezistența căii de întoarcere prin sol, în [Ω/km], în funcție de rezistivitatea electrică a solului în [Ωm]

În figura 3.5 se prezintă reactanța căii de întoarcere prin pământ, în [Ω/km], dacă se consideră un singur conductor ce face parte dintr-o buclă având solul drept cale de întoarcere, în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului, pentru diferite valori ale rezistivității solului.

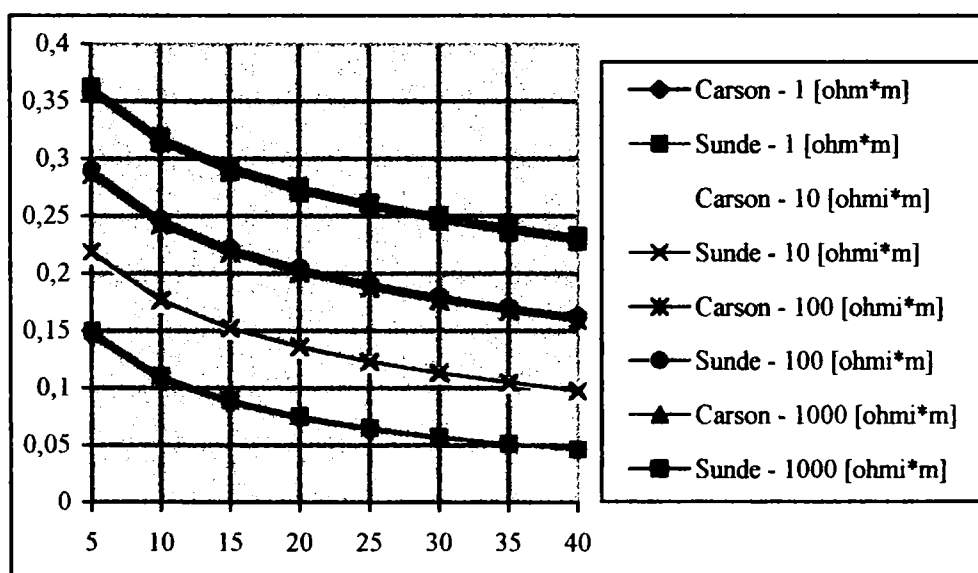


Figura 3.5 Reactanța căii de întoarcere prin sol, în [Ω/km], în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului în [m]

În figura 3.6 se prezintă reactanța căii de întoarcere prin pământ, în Ω/km , în funcție de rezistivitatea electrică a solului, pentru diferite valori ale înălțimii conductorului față de suprafața solului.

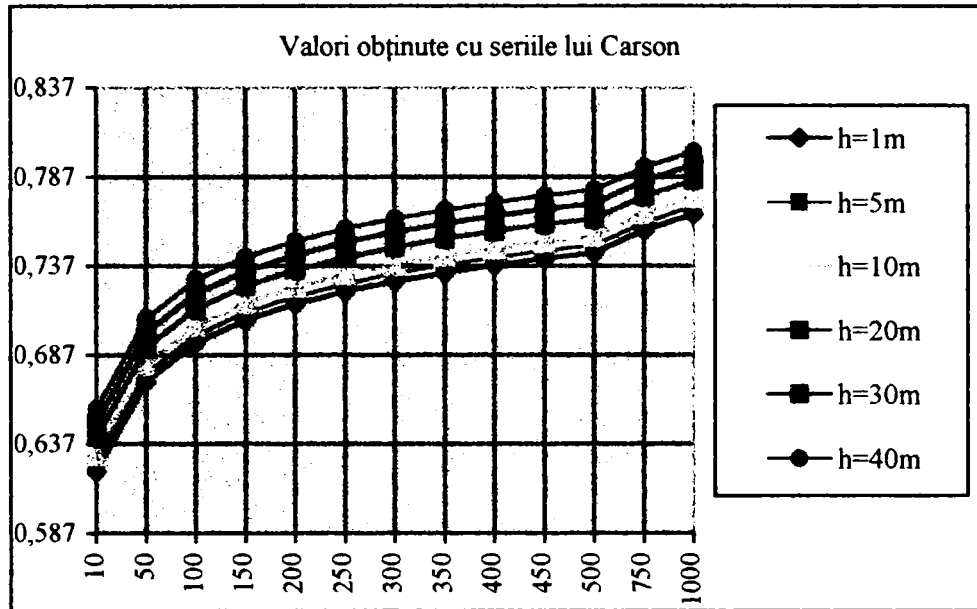


Figura 3.6 Reactanța căii de întoarcere prin sol, în [Ω/km], în funcție de rezistivitatea electrică a solului în [Ωm]

Din figurile 3.5 și 3.6, se poate observa faptul că valorile reactanței căii de întoarcere prin sol depind atât de rezistivitatea electrică a solului, cât și de înălțimea conductorului față de suprafața solului.

Se observă că rezultatele numerice obținute pe baza relațiilor lui Carson și Sunde, sunt foarte apropiate pentru valori mici ale rezistivității solului, ușoare diferențe apărând la valori mai mari (cca $1000\Omega m$).

În tabelul A1.3 din Anexa A1, sunt date valorile reactanței buclei monofazate conductor-pământ $X_{buc\grave{a}i} = X_{aa-p} + x_i$, valori obținute utilizând seriile propuse de Carson. În tabelul A1.4 din Anexa A1, sunt date valorile obținute cu ajutorul expresiei (3.31) propusă de Sunde, din care s-a reținut doar componenta reactivă. Rezultatele prezentate sunt obținute pentru diverse valori ale rezistivității solului, în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului și de diametrul conductorului. Aceste valori sunt prezentate sub formă grafică în figurile 3.7, 3.8, 3.9 și 3.10.

În figurile 3.7 și 3.8 este prezentată reactanța buclei monofazate conductor-pământ, în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului, iar în figurile 3.9 și 3.10, în funcție de diametrul conductorului.

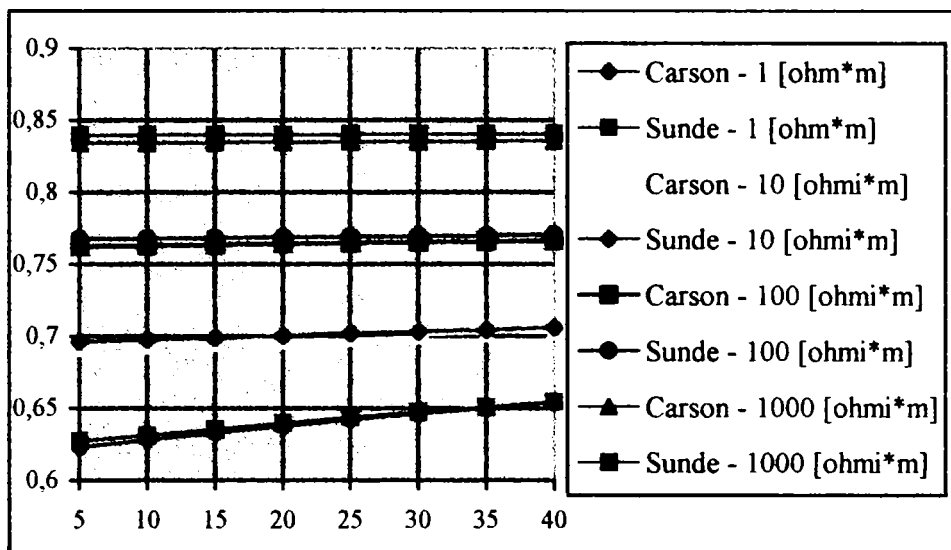


Figura 3.7 Reactanța buclei monofazate conductor-pământ în [Ω/km], în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului în [m], pentru un diametru al conductorului $d=1cm$

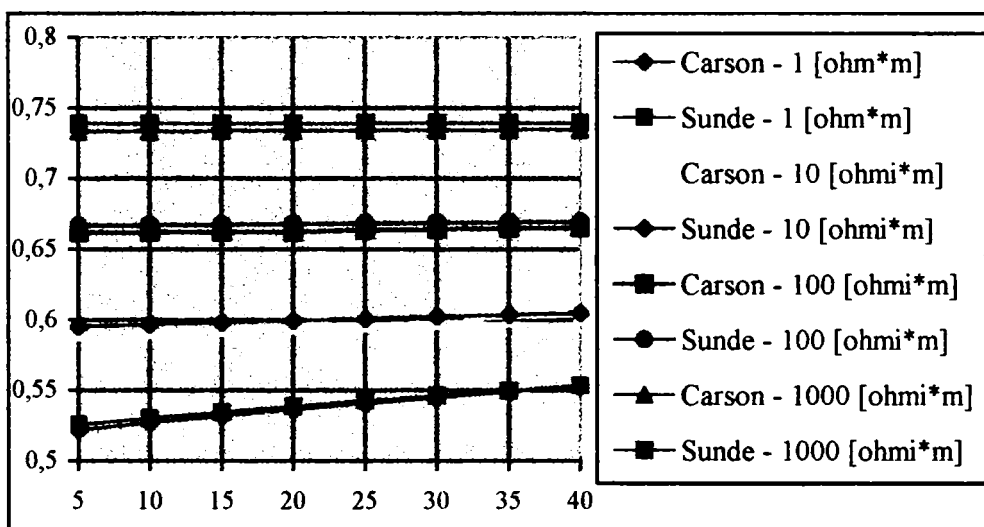


Figura 3.8 Reactanța buclei monofazate conductor-pământ în [Ω/km], în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului în [m], pentru un diametru al conductorului $d=5cm$

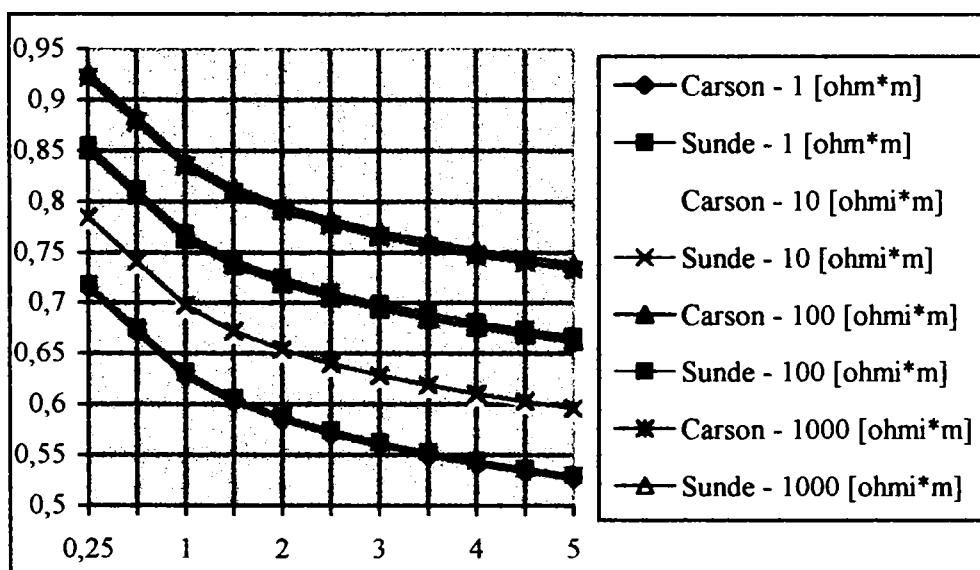


Figura 3.9 Reactanța buclei monofazate conductor-pământ în [Ω/km], în funcție de diametrul conductorului în [cm], pentru o înălțime a conductorului față de suprafața solului $h=10m$

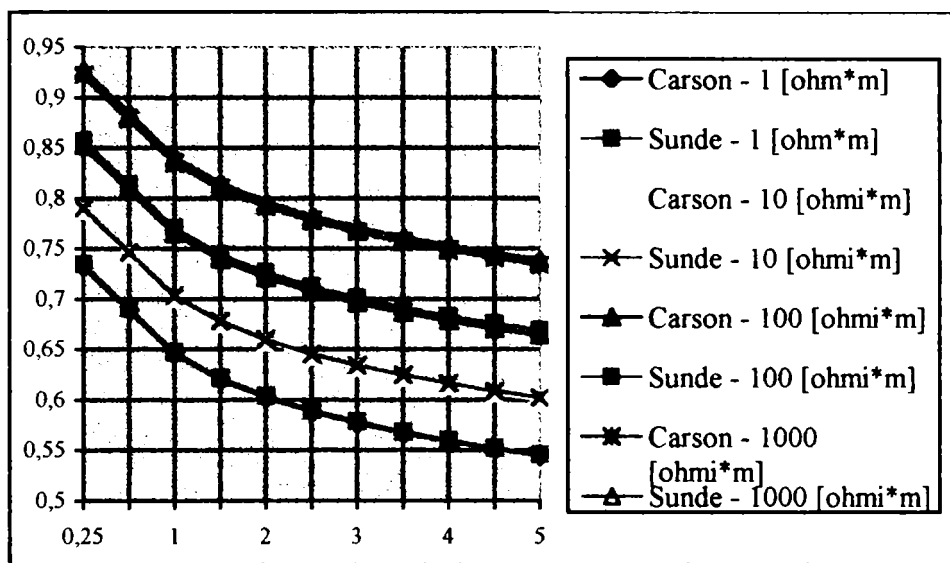


Figura 3.10 Reactanța buclei monofazate conductor-pământ în $[\Omega/km]$ în funcție de diametrul conductorului în $[cm]$, pentru o înălțime a conductorului față de suprafața solului $h=30m$

Se remarcă faptul că, dacă se neglijează corecțiile date de relațiile (3.11)-(3.14), atunci relațiile lui Carson (3.7)-(3.10) sunt independente de înălțimea conductorului față de suprafața solului. R_{aa-p} și R_{ab-p} pentru o frecvență de $50Hz$ sunt mai mici de $0,062\Omega/km$. În calculul lui \underline{Z}_{aa-p} , R_{aa-p} se adună la rezistența r_c care, exceptând liniile cu o rezistență mai mică decât $0,062\Omega/km$, reduce eroarea la componenta rezistivă din \underline{Z}_{aa-p} la mai puțin de jumătate din valoarea indicată mai sus. Mai mult, componentele rezistive R_{aa-p} și R_{ab-p} , trebuie să fie combinate cu componentele reactive X_{aa-p} și X_{ab-p} pentru a obține impedanțele proprii și mutuale \underline{Z}_{aa-p} și \underline{Z}_{ab-p} . În sistemele cu o frecvență de $50Hz$, unde impedanța de succesiune a liniei de transport este numai o parte din impedanța totală de succesiune homopolară, eroarea făcută prin neglijarea termenilor care urmează primului termen în ΔR_{aa-p} și ΔR_{ab-p} este mai mică ([13]). Neglijând termenii în ΔX_{aa-p} și ΔX_{ab-p} care urmează primului termen, se obțin rezultate cu o eroare mai mică de 3%.

Figurile 3.7 și 3.8, în care este reprezentată reactanța buclei monofazate conductor-pământ în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului calculată cu relația (3.9), arată faptul că înălțimea conductorului față de suprafața solului poate fi neglijată. Din acest motiv, nu se va studia efectul pe care îl are asupra parametrilor de secvență homopolară faptul că această înălțime nu este constantă într-o deschidere.

Comparând ecuațiile lui Rudenberg cu ecuațiile lui Carson, neglijând termenii considerați corecții (relația (3.11) în care apare înălțimea h), se constată faptul că pentru componenta rezistivă apare aceeași expresie:

$$R_p = R_{aa-p} = R_{ab-p} = \pi^2 f 10^{-4} \quad (3.40)$$

Termenii corespunzători reactanțelor în ecuațiile lui Carson sunt mai mari cu valoarea:

$$\omega 10^{-3} (0,4602 \lg \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 1,436) - 2\omega 10^{-4} (\ln \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 6,33) = 0,00985 \quad (3.41)$$

Comparând ecuația (3.39) a lui Dubanton cu ecuațiile (3.7) și (3.8) ale lui Carson, neglijând termenii considerați corecții (în care apare înălțimea h), se constată faptul că pentru componenta rezistivă apare aceeași expresie, iar termenii corespunzători reactanțelor în ecuațiile lui Carson sunt mai mici cu valoarea:

$$2\omega 10^{-4} (\ln \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 6,56) - \omega 10^{-3} (0,4602 \lg \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\rho}{f}} + 1,436) = 0,0046 \quad (3.42)$$

Aceste diferențe sunt lipsite de importanță la liniile la care se poate neglija efectul înălțimii stâlpului. S-a precizat în paragraful precedent că efectul înălțimii stâlpului asupra impedanțelor proprii și mutuale cu întoarcere prin pământ calculate cu ecuațiile lui Carson este neglijabil pentru frecvența de 50Hz, dacă rezistivitatea solului e de $100 \Omega m$, sau mai mare.

În cazul unei linii de transport aeriene complet transpuse, la care distanța dintre conductoare este mai mică decât înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, componentele de întoarcere prin pământ ale impedanțelor proprii și mutuale sunt aceleași în expresiile date de Rudenberg. Ca urmare, e posibilă separarea căii de întoarcere prin pământ $\underline{Z}_p = R_p + jX_p$ din impedanțele proprii și mutuale cu întoarcere prin pământ.

Componenta rezistivă R_p a impedanței \underline{Z}_p a căii de întoarcere prin pământ este independentă de înălțimea h a conductorului față de suprafața solului, însă reactanța X_p este funcție de h .

Prin urmare, după Rudenberg, rezistența căii de întoarcere prin pământ este:

$$R_p = \pi^2 f 10^{-4} \quad (3.43)$$

iar reactanța căii de întoarcere prin pământ diferă cu valoarea din relația (3.41) de reactanța rezultată din relațiile lui Carson.

Se observă că rezistența căii de întoarcere prin pământ nu depinde practic de rezistivitatea electrică a solului, dar depinde de frecvența curentului electric. Această concluzie poate fi explicată ținând cont de distribuția curentului prin pământ. Pe baza nenumăratelor cercetări teoretice și experimentale ([9], [29], [80], [101]), s-a stabilit că densitatea curentului în sol variază direct proporțional cu conductibilitatea solului, adică invers proporțional cu rezistivitatea electrică a solului. Deci, la variația conductibilității solului variază și densitatea curentului prin pământ; în aceste condiții, pierderile de putere activă, la o frecvență dată a curentului, rămân aproape constante. Dependența rezistenței căii de întoarcere cu frecvența este o consecință a efectului pelicular în pământ.

Dacă se folosește următoarea notație: $D_p = 711,8 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = D_0 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$, atunci se poate scrie:

$$\underline{Z}_{aa-p} = (r_c + \pi^2 f 10^{-4}) + j(x_i + 2\omega 10^{-4} \ln \frac{2D_p}{d}) \quad (3.44)$$

Dacă D_p reprezintă adâncimea echivalentă de întoarcere a curentului prin pământ, atunci, punând și relațiile lui Carson, Rudenberg și respectiv Dubanton sub o formă asemănătoare, se obțin pentru constanta D_0 următoarele valori:

- $D_0 = 664$ după Carson;
- $D_0 = 563$ după Rudenberg;
- $D_0 = 771,8$ după Dubanton.

În mod obișnuit, calculele se fac pentru o adâncime de pătrundere $D_p = 1000m$, corespunzătoare unei rezistivități a solului de $100 \Omega m$.

În tabelele A1.5 și A1.6 din Anexa A1, sunt date valorile componentelor rezistivă și reactivă ale impedanței mutuale dintre două bucle monofazate conductor-pământ, în funcție de distanța orizontală dintre conductoare. În tabelele A1.7 și A1.8 din Anexa A1, sunt date valorile componentelor rezistivă și reactivă ale impedanței mutuale dintre două bucle monofazate conductor-pământ, în funcție de distanța verticală dintre cele două conductoare. S-au folosit relațiile (3.8) și (3.10) ale lui Carson și respectiv relația (3.32) a lui Sunde. Aceste valori sunt prezentate și sub formă grafică în figurile următoare.

În figura 3.11 este reprezentată rezistența mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în funcție de distanța verticală dintre conductoare, la diferite valori ale rezistivității solului. S-a considerat un conductor situat la o înălțime de $10m$ față de suprafața solului, iar înălțimea celuilalt variază între $(0,1 - 20) m$. Distanța orizontală dintre cele două conductoare s-a considerat nulă.

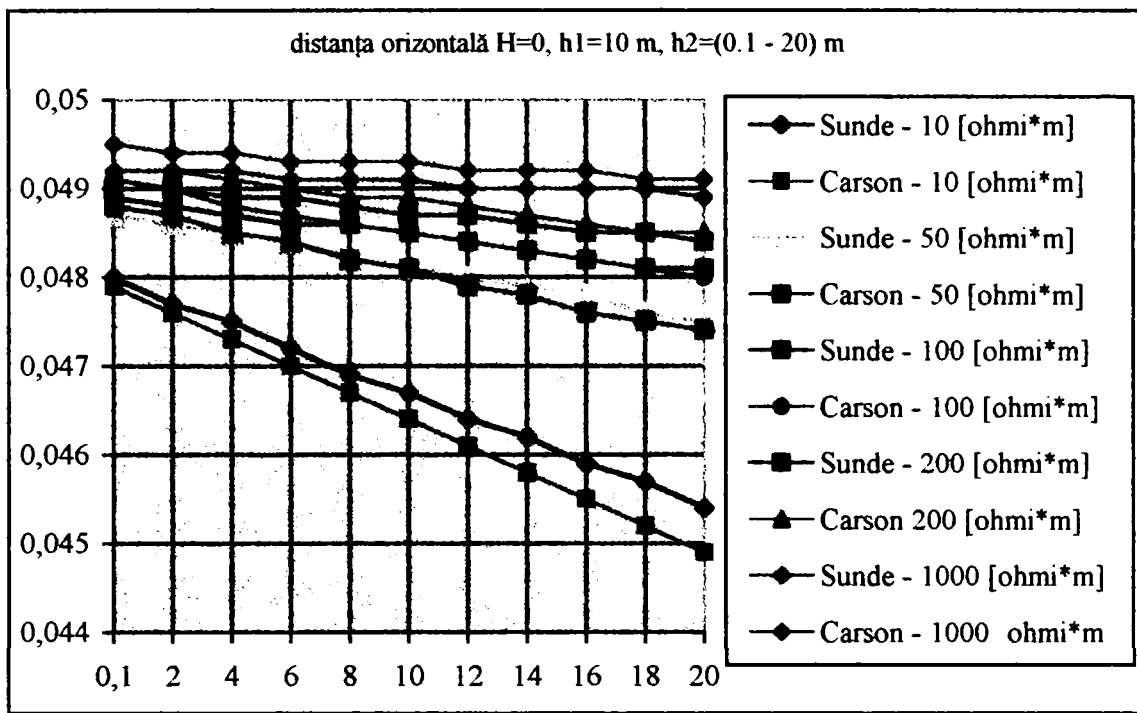


Figura 3.11 Rezistența mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în [Ω/km], în funcție de distanța verticală dintre conductoare în [m]

În figura 3.12 este reprezentată rezistența mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în funcție de distanța orizontală dintre conductoare și în funcție de rezistivitatea electrică a solului. Cele două conductoare s-au considerat situate la înălțimea de 10m față de suprafața solului.

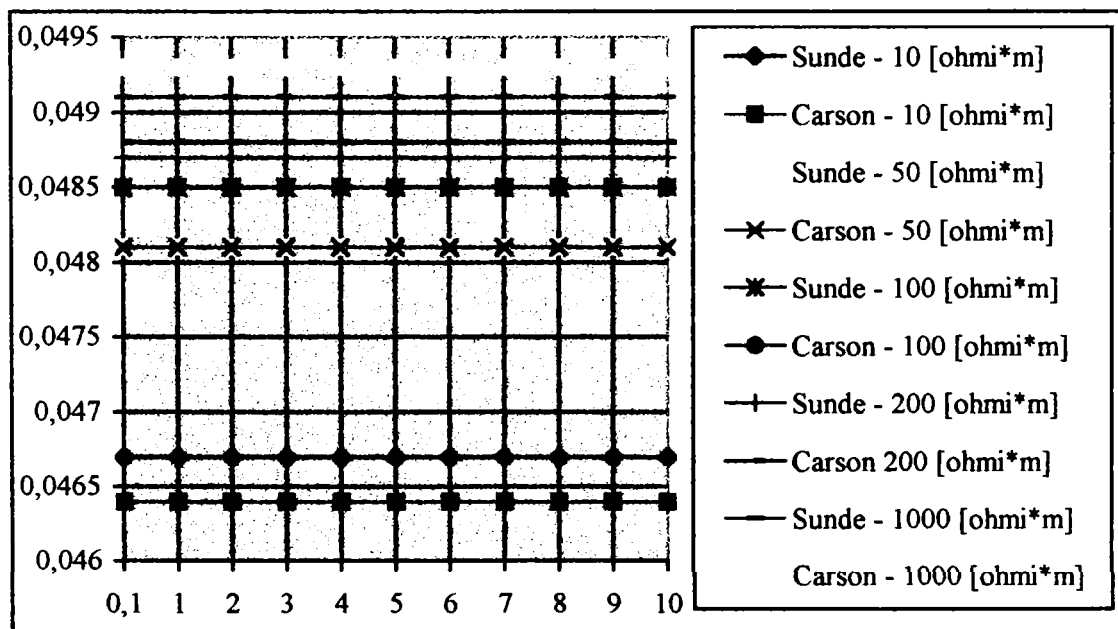


Figura 3.12 Rezistența mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în [Ω/km], în funcție de distanța orizontală dintre conductoare în [m]

Se constată că valoarea rezistenței mutuale nu este influențată de distanța orizontală dintre conductoare, dar e, în schimb, influențată de distanța verticală dintre conductoare, în special la valori mai mici ale rezistivității solului.

În figura 3.13 este reprezentată reactanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ, în funcție de distanța orizontală dintre conductoare. S-a considerat că cele două conductoare se află situate la aceeași înălțime $h=10m$ față de suprafața solului.

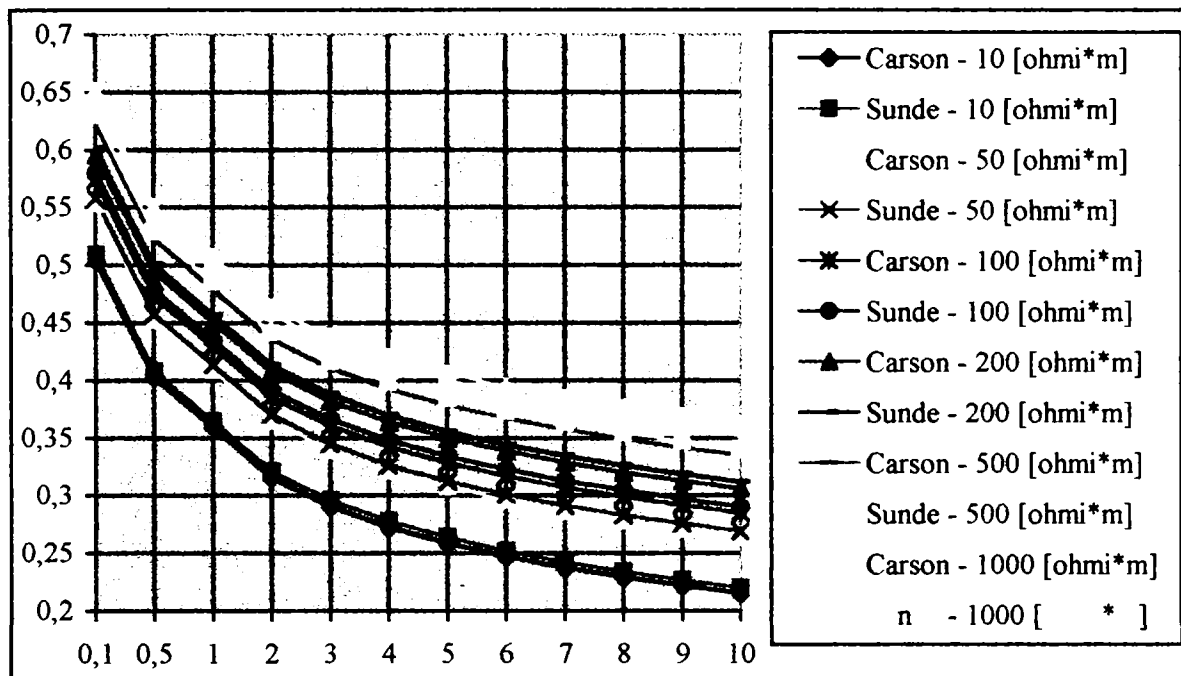


Figura 3.13 Reactanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în $[\Omega/km]$, în funcție de distanța orizontală dintre conductoare în $[m]$

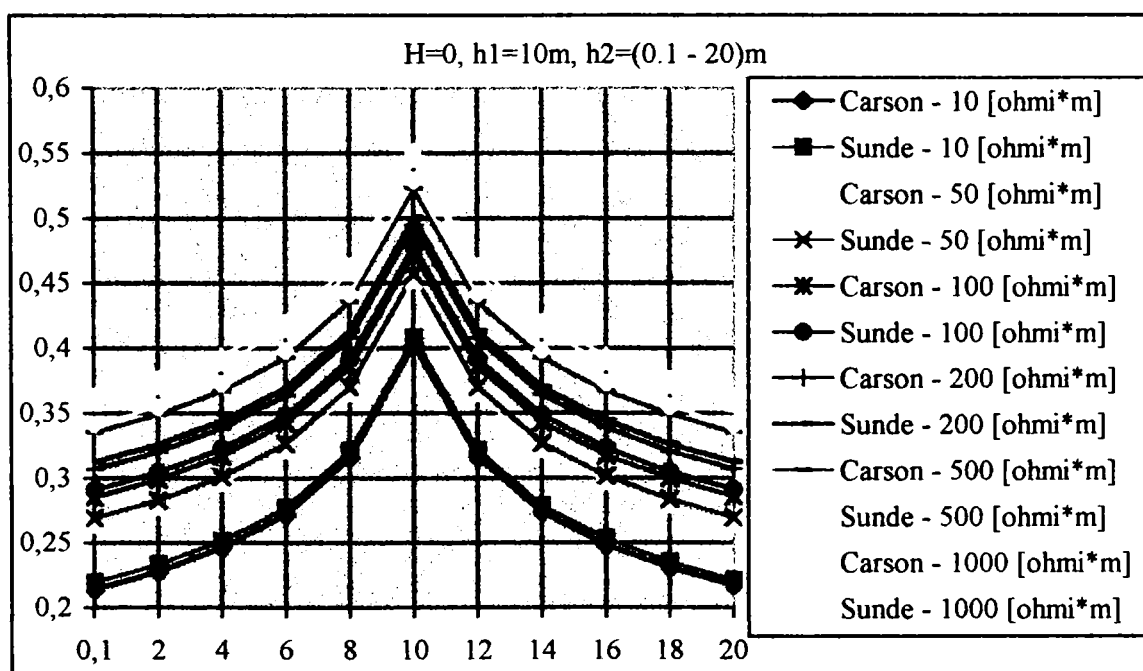


Figura 3.14 Reactanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în $[\Omega/km]$, în funcție de distanța verticală dintre conductoare în $[m]$

În figura 3.14 este prezentată reactanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ, în funcție de distanța verticală dintre conductoare. S-a considerat un conductor situat la înălțimea $h=10m$ față de suprafața solului, înălțimea celuilalt variind în intervalul $(0,1 - 20)m$ față de suprafața solului, iar distanța orizontală dintre conductoare s-a considerat nulă.

Din figurile 3.13 și 3.14, se poate observa faptul că reactanța mutuală dintre două bucle monofazate, depinde atât de distanța orizontală dintre conductoare, cât și de distanța verticală dintre ele.

În figura 3.15 este reprezentată impedanța mutuală dintre cele două bucle monofazate în funcție de distanța verticală dintre cele două conductoare.

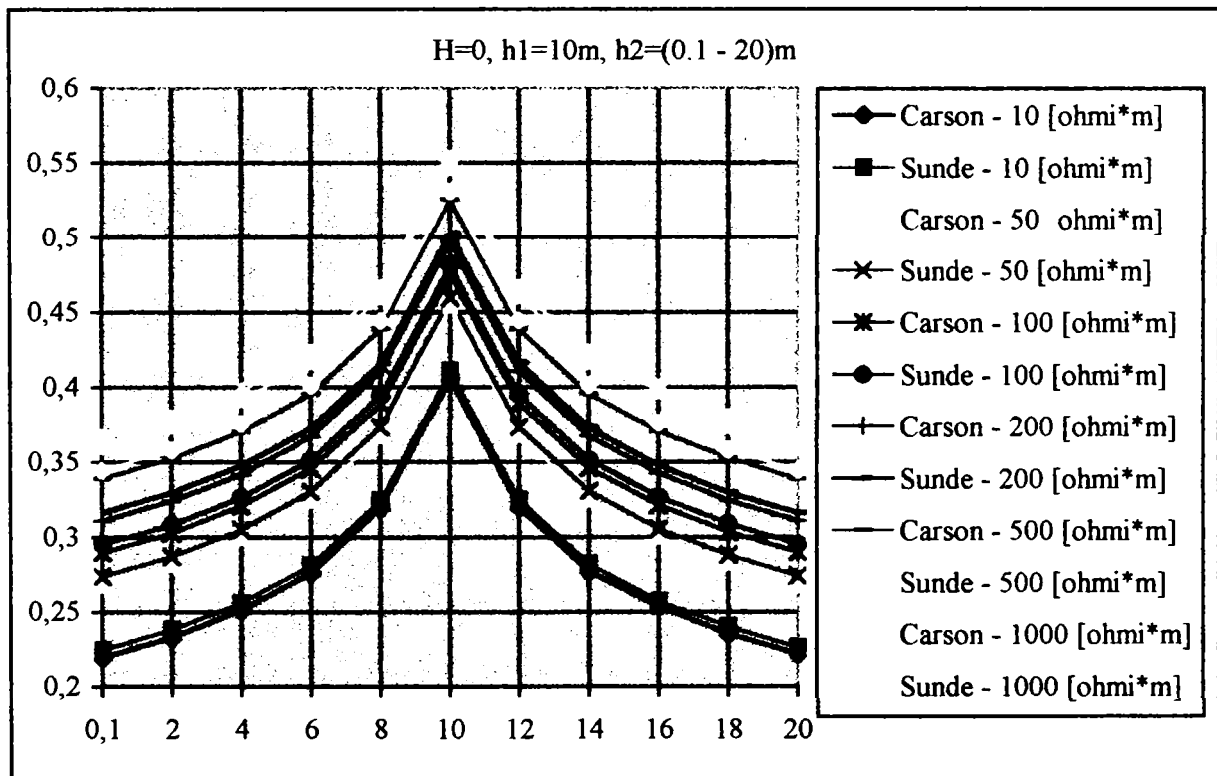


Figura 3.15 Impedanța mutuală dintre două bucle monofazate conductor-pământ în $[\Omega/km]$, în funcție de distanța verticală dintre conductoare în $[m]$

Comparațiile efectuate între rezultatele numerice obținute cu seriile lui Carson și ecuațiile lui Dubanton, pentru impedanțele mutuale de secvență homopolară, arată faptul că

dacă distanța dintre conductoare nu e mare ($\beta = \frac{r_{ab}}{h_a + h_b} \leq 2$), valoarea absolută a diferenței

dintre valorile obținute cu formulele lui Carson și cele obținute cu formulele lui Dubanton nu depășesc 3%. Pentru $\beta < 0,5$, valoare valabilă pentru rețelele electrice de transport a energiei electrice, diferențele sunt foarte mici, tinzând la zero.

3.7 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate relațiile de calcul al impedanțelor proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ, prezentate în literatura de specialitate. S-au făcut comparații între rezultatele numerice obținute cu aceste relații și s-a arătat că, practic, pot fi folosite oricare din aceste relații, pentru că diferențele între rezultatele numerice sunt neînsemnate cantitativ. A fost apoi efectuat un studiu al influenței diverșilor factori asupra rezistențelor și reactanțelor proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ și au fost prezentate concluziile obținute.

Pe baza acestor relații, se poate determina expresia impedanței de secvență homopolară a unei linii electrice aeriene trifazate, care intervine în relația de calcul a curentului de scurtcircuit monofazat.

În capitolul următor, se prezintă modul de determinare a impedanței de secvență homopolară a unei linii electrice aeriene trifazate, pornind de la expresiile impedanțelor buclelor monofazate conductor-pământ.

CAP. 4 SCHEME ECHIVALENTE ȘI PARAMETRII DE SECVENȚĂ HOMOPOLARĂ AI LINIILOR ELECTRICE AERIENE TRIFAZATE

În capitolul 1 al acestei lucrări a fost prezentată expresia curentului de scurtcircuit monofazat, care apare în rețelele electrice de înaltă tensiune realizate cu linii electrice aeriene, la un scurtcircuit monofazat prin impedanță de defect. S-a arătat că în expresia acestui curent intervin și impedanțele de secvență homopolară ale elementelor de rețea. În acest capitol se va prezenta modul de determinare a impedanței de secvență homopolară a unei linii electrice aeriene trifazate. În expresia acestei impedanțe intervin și impedanțele proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ, prezentate în capitolul 3 al acestei lucrări.

Tot în acest capitol se va face și un studiu al influenței diversilor factori asupra valorii impedanței de secvență homopolară a liniei: influența conductorului de protecție, a materialului conductoarelor, a numărului de conductoare, a rezistivității electrice a solului etc.

4.1 Linii electrice aeriene trifazate cu simplu circuit

Impedanțele de succesiune homopolară ale celor trei faze ale unei linii electrice aeriene (LEA) trifazate cu simplu circuit, vor fi notate cu \underline{Z}_{aa} , \underline{Z}_{bb} , \underline{Z}_{cc} . Ele reprezintă raportul dintre tensiunile din cele 3 faze și curenții din fazele corespunzătoare, în situația în care pe linie circulă numai curenți de succesiune homopolară. În figura 4.1 sunt indicați curenții de succesiune homopolară în cele trei faze ale unei linii electrice aeriene fără conductor de protecție. Cele trei faze sunt conectate între ele la un capăt și puse la pământ. Cu \underline{U}_a , \underline{U}_b și \underline{U}_c s-au notat căderile de tensiune în fazele a , b și c , în sensul de referință al curenților indicat în figură ([13]).

Tensiunile în cele trei circuite, fiecare alcătuite din conductorul unei faze și pământ, vor fi:

$$\begin{cases} \underline{U}_a = I_h (\underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{ac-p}) \\ \underline{U}_b = I_h (\underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p}) \\ \underline{U}_c = I_h (\underline{Z}_{cc-p} + \underline{Z}_{ac-p} + \underline{Z}_{bc-p}) \end{cases} \quad (4.1)$$

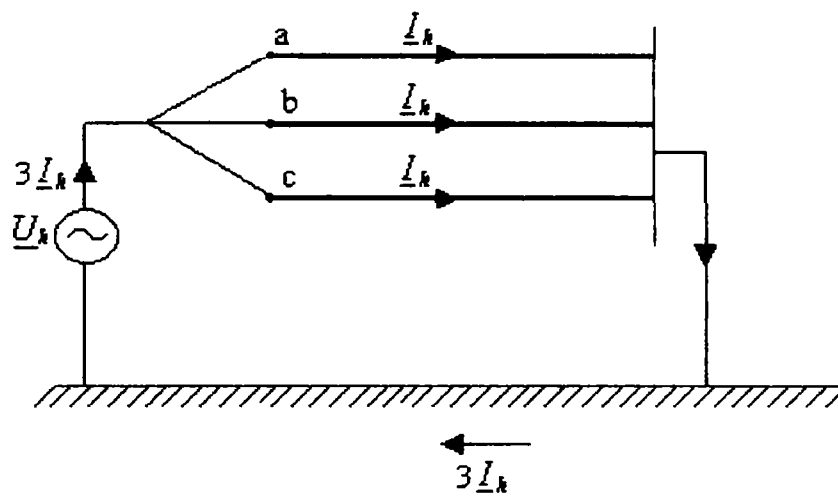


Figura 4.1 Curenții de succesiune homopolară în cele trei faze ale unei LEA fără conductor de protecție

Impedanțele de succesiune homopolară ale fazelor a , b , și c , vor avea expresiile:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{ah} = \frac{U_a}{I_h} = \underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{ac-p} \\ \underline{Z}_{bh} = \frac{U_b}{I_h} = \underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p} \\ \underline{Z}_{ch} = \frac{U_c}{I_h} = \underline{Z}_{cc-p} + \underline{Z}_{ac-p} + \underline{Z}_{bc-p} \end{cases} \quad (4.2)$$

Pentru impedanța proprie de succesiune homopolară a unei linii electrice aeriene trifazate, netranspusă și nesimetrică, sau impedanța de succesiune homopolară proprie medie a unui circuit complet transpus, exprimată în funcție de impedanțele de succesiune homopolară - proprii și mutuale - ale circuitelor fazelor cu întoarcere prin pământ, conform metodei componentelor simetrice, rezultă următoarea expresie:

$$\underline{Z}_h = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{ah} + \underline{Z}_{bh} + \underline{Z}_{ch}) = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{cc-p}) + \frac{2}{3}(\underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p} + \underline{Z}_{ac-p}) \quad (4.3)$$

Impedanțele \underline{Z}_{aa-p} , \underline{Z}_{bb-p} și \underline{Z}_{cc-p} depind de frecvență, de diametrul conductorului, de rezistența pământului și de înălțimea conductorului față de suprafața solului. Dacă conductoarele pe cele trei faze sunt identice, atunci aceste impedanțe diferă doar prin termenii care conțin înălțimea h a conductorului față de suprafața solului. Dacă conductoarele se află la aceeași înălțime față de suprafața solului, atunci aceste impedanțe sunt egale. În capitolul precedent s-a studiat efectul variației lui h asupra rezistențelor și reactanțelor proprii și

mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ (pentru $H_{ab} = 0$). Deoarece curbele obținute sunt aproximativ linii drepte, valoarea medie a celor trei impedanțe proprii cu întoarcere prin pământ, la conductoare care nu au aceeași înălțime față de suprafața solului, este sensibil corespunzătoare înălțimii medii deasupra pământului a celor trei conductoare. De aceea, se poate considera că [13]:

$$\frac{1}{3}(\underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{cc-p}) = \underline{Z}_{aa-p} = (r_c + R_{aa-p}) + j(x_i + X_{aa-p}) \quad [\Omega/km] \quad (4.4)$$

\underline{Z}_{aa-p} în relația (4.4) este valoarea medie a celor trei impedanțe proprii cu întoarcere prin pământ, iar R_{aa-p} și X_{aa-p} sunt determinate pentru un conductor cu înălțimea h , dată de relația (4.9):

$$h = \frac{1}{3}(h_a + h_b + h_c) \quad (4.5)$$

Termenul al doilea din expresia (4.3), este de două ori media valorilor impedanțelor mutuale \underline{Z}_{ab-p} , \underline{Z}_{bc-p} și \underline{Z}_{ac-p} . Dacă ΔX_{ab-p} , care este suma termenilor ce includ înălțimea conductorului față de suprafața solului, este neglijabilă (relația (3.20)), la o frecvență și rezistență date, reactanța mutuală depinde de distanța medie geometrică dintre conductoare.

Valoarea medie a termenilor \underline{Z}_{ab-p} , \underline{Z}_{bc-p} și \underline{Z}_{ac-p} care includ înălțimea conductoarelor față de suprafața pământului, poate fi aproximată utilizând înălțimea medie a celor trei conductoare și distanța medie pe orizontală. Prin urmare, pentru al doilea termen din expresia (4.3), se poate scrie:

$$\frac{2}{3}(\underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p} + \underline{Z}_{ac-p}) = 2\underline{Z}_{ab-p} = 2(R_{ab-p} + jX_{ab-p}) \quad [\Omega/km] \quad (4.6)$$

\underline{Z}_{ab-p} în relația (4.6) este valoarea medie a celor trei impedanțe mutuale cu întoarcere prin pământ și este determinată în funcție de următoarele mărimi:

- $D_m = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}}$, distanța medie geometrică dintre cele trei conductoare de fază;
- $h = \frac{1}{3}(h_a + h_b + h_c)$, înălțimea medie față de suprafața solului a celor trei conductoare;

- $H = \frac{1}{3}(H_{ab} + H_{bc} + H_{ac})$, distanța medie orizontală dintre cele trei conductoare.

Impedanța de succesiune homopolară a liniei, în Ω/km , poate fi scrisă sub forma:

$$\underline{Z}_h = R_h + X_h = \underline{Z}_{aa-p} + 2\underline{Z}_{ab-p} = (r_c + R_{aa-p} + 2R_{ab-p}) + j(x_i + X_{aa-p} + 2X_{ab-p}) \quad (4.7)$$

Dacă se notează cu \underline{Z} impedanțele proprii corespunzătoare circuitelor fazelor și cu \underline{Z}' impedanțele mutuale dintre circuitele fazelor liniei electrice aeriene și se consideră că elementele componente prezintă o simetrie totală, caracterizată prin egalitatea tuturor impedanțelor proprii $\underline{Z} = \underline{Z}_{aa-p} = \underline{Z}_{bb-p} = \underline{Z}_{cc-p}$ și egalitatea tuturor impedanțelor mutuale $\underline{Z}' = \underline{Z}_{ab-p} = \underline{Z}_{bc-p} = \underline{Z}_{ac-p}$, atunci pentru impedanța de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene trifazate se poate folosi următoarea relație ([4], [5]):

$$\underline{Z}_h = \underline{Z} + 2\underline{Z}' \quad [\Omega/km] \quad (4.8)$$

În cele ce urmează, se va prezenta modul de determinare al impedanței de succesiune homopolară a unei LEA trifazate, în condițiile în care se va ține cont și de prezența conductorului de protecție. În acest sens, se vor considera cazurile în care LEA este prevăzută cu unul, respectiv cu două conductoare de protecție.

4.2 Linii electrice aeriene trifazate simplu circuit, cu conductoare de protecție

Impedanța proprie \underline{Z}_{cp} a conductorului de protecție cu întoarcere prin pământ și impedanța mutuală \underline{Z}_{a-cp} dintre conductorul de protecție cp și conductorul de fază a cu întoarcere comună prin pământ, se determină întocmai ca și impedanța proprie și mutuală a conductoarelor fazelor cu întoarcere prin pământ.

4.2.1 Un conductor de protecție

În cazul în care prin cele tre faze ale circuitului din figura 4.2 circulă numai curenți de succesiune homopolară, tensiunile celor patru bucle, alcătuite din cele trei conductoare și conductorul de protecție, fiecare cu întoarcere prin pământ, sunt:

$$\begin{cases} \underline{U}_a = \underline{I}_h (\underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{ac-p}) - \underline{I}_{cp} \underline{Z}_{a-cp} \\ \underline{U}_b = \underline{I}_h (\underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p}) - \underline{I}_{cp} \underline{Z}_{b-cp} \\ \underline{U}_c = \underline{I}_h (\underline{Z}_{cc-p} + \underline{Z}_{ac-p} + \underline{Z}_{bc-p}) - \underline{I}_{cp} \underline{Z}_{c-cp} \\ 0 = \underline{I}_{cp} \underline{Z}_{cp} - \underline{I}_h (\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp}) \end{cases} \quad (4.9)$$

Cu $\underline{Z}_{a-cp}, \underline{Z}_{b-cp}, \underline{Z}_{c-cp}$ s-au notat impedanțele mutuale dintre buclele monofazate conductor de fază-conductor de protecție, corespunzătoare fazelor a, b și c .

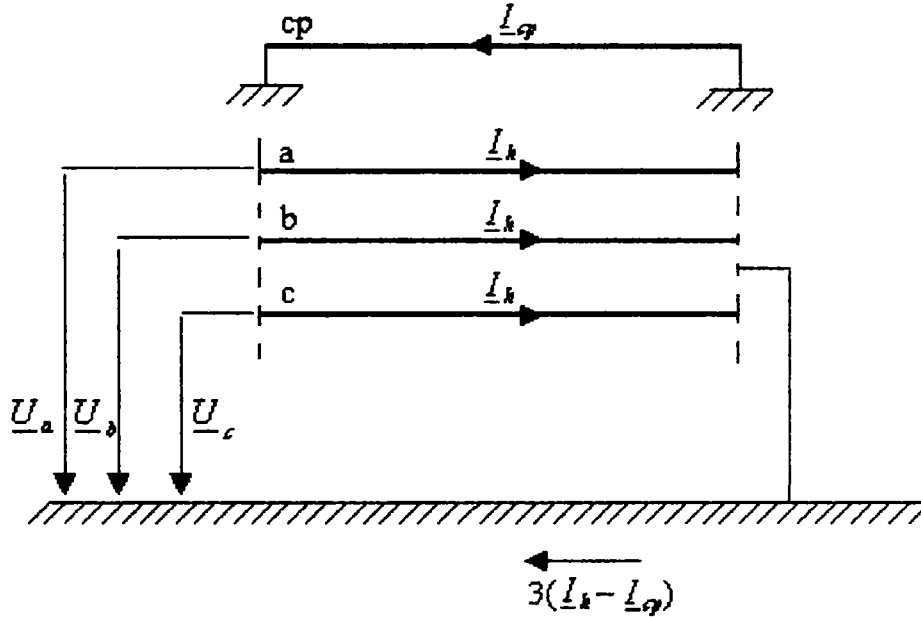


Figura 4.2 Curenții de succesiune homopolară în cele trei faze ale unei LEA cu un conductor de protecție

Din ultima relație din (4.9), se obține:

$$\underline{I}_{cp} = \underline{I}_h \frac{\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp}}{\underline{Z}_{cp}} \quad (4.10)$$

Înlocuindu-l pe \underline{I}_{cp} din relația (4.10) în relațiile (4.9), se obțin pentru impedanțele de secvență homopolară ale fazelor, în prezența conductorului de protecție, expresiile:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{ah} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{ac-p} - \frac{\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp}}{\underline{Z}_{cp}} \underline{Z}_{a-cp} \\ \underline{Z}_{bh} = \frac{\underline{U}_b}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p} - \frac{\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp}}{\underline{Z}_{cp}} \underline{Z}_{b-cp} \\ \underline{Z}_{ch} = \frac{\underline{U}_c}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_{cc-p} + \underline{Z}_{ac-p} + \underline{Z}_{bc-p} - \frac{\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp}}{\underline{Z}_{cp}} \underline{Z}_{c-cp} \end{cases} \quad (4.11)$$

Pentru impedanța de secvență homopolară a liniei electrice aeriene în prezența conductorului de protecție, se obține următoarea expresie:

$$\underline{Z}_{h-cp} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{ah} + \underline{Z}_{bh} + \underline{Z}_{ch}) = \underline{Z}_h - \frac{(\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp})^2}{\underline{Z}_{cp}} \quad (4.12)$$

Relația (4.10) poate fi scrisă sub forma:

$$\underline{I}_{cp} = \underline{I}_h \frac{\underline{Z}_{a-cp} + \underline{Z}_{b-cp} + \underline{Z}_{c-cp}}{\underline{Z}_{cp}} = 3\underline{I}_h \frac{\underline{Z}'_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} \quad (4.13)$$

\underline{Z}'_{cp} din relația (4.13) este valoarea medie a impedanțelor mutuale cu întoarcere prin pământ dintre conductorul de protecție și conductoarele de fază și este determinată pentru o distanță D'_{cp} - distanța medie geometrică între conductorul de protecție și conductoarele de fază - dată de următoarea expresie:

$$D'_{cp} = \sqrt[3]{D_{a-cp} D_{b-cp} D_{c-cp}} \quad (4.14)$$

Înlocuindu-l pe \underline{I}_{cp} din relația (4.13) în relațiile (4.11), se obțin pentru impedanțele de secvență homopolară ale fazelor, în prezența conductorului de protecție, expresiile:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{ah} = \frac{U_a}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{ac-p} - 3 \frac{\underline{Z}'_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} \underline{Z}_{a-cp} \\ \underline{Z}_{bh} = \frac{U_b}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p} - 3 \frac{\underline{Z}'_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} \underline{Z}_{b-cp} \\ \underline{Z}_{ch} = \frac{U_c}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_{cc-p} + \underline{Z}_{ac-p} + \underline{Z}_{bc-p} - 3 \frac{\underline{Z}'_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} \underline{Z}_{c-cp} \end{cases} \quad (4.15)$$

Impedanța de secvență homopolară a liniei electrice aeriene, în prezența conductorului de protecție, va fi:

$$\underline{Z}_{h-cp} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{ah} + \underline{Z}_{bh} + \underline{Z}_{ch}) = \underline{Z}_h - 3 \frac{\underline{Z}'_{cp}}{\underline{Z}_{cp}} \quad (4.16)$$

Dacă se consideră că: $\underline{Z}_{a-cp} = \underline{Z}_{b-cp} = \underline{Z}_{c-cp} = \underline{Z}_{cp}'$, $\underline{Z} = \underline{Z}_{aa-p} = \underline{Z}_{bb-p} = \underline{Z}_{cc-p}$ și $\underline{Z}' = \underline{Z}_{ab-p} = \underline{Z}_{bc-p} = \underline{Z}_{ac-p}$, atunci pentru impedanța de secvență homopolară a liniei trifazate \underline{Z}_{h-cp} în prezența conductorului de protecție se obține relația:

$$\underline{Z}_{h-cp} = \underline{Z} + 2\underline{Z}' - 3\frac{\underline{Z}_{cp}'^2}{\underline{Z}_{cp}} = \underline{Z}_h - 3\frac{\underline{Z}_{cp}'^2}{\underline{Z}_{cp}} \quad (4.17)$$

4.2.2 Două conductoare de protecție

În figura 4.3 se prezintă un circuit trifazat cu două conductoare de protecție, prin care circulă numai curentul de succesiune homopolară.

Căderile de tensiune în cele cinci bucle, alcătuite din cele trei conductoare de fază și cele două conductoare de protecție, fiecare cu întoarcere prin pământ, sunt date de relațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_a = \underline{I}_h(\underline{Z}_{aa-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{ac-p}) - \underline{I}_{cp1}\underline{Z}_{a-cp1} - \underline{I}_{cp2}\underline{Z}_{a-cp2} \\ \underline{U}_b = \underline{I}_h(\underline{Z}_{bb-p} + \underline{Z}_{ab-p} + \underline{Z}_{bc-p}) - \underline{I}_{cp1}\underline{Z}_{b-cp1} - \underline{I}_{cp2}\underline{Z}_{b-cp2} \\ \underline{U}_c = \underline{I}_h(\underline{Z}_{cc-p} + \underline{Z}_{ac-p} + \underline{Z}_{bc-p}) - \underline{I}_{cp1}\underline{Z}_{c-cp1} - \underline{I}_{cp2}\underline{Z}_{c-cp2} \\ 0 = \underline{I}_{cp1}\underline{Z}_{cp1} + \underline{I}_{cp2}\underline{Z}_{cp1-cp2} - \underline{I}_h(\underline{Z}_{a-cp1} + \underline{Z}_{b-cp1} + \underline{Z}_{c-cp1}) \\ 0 = \underline{I}_{cp1}\underline{Z}_{cp1-cp2} + \underline{I}_{cp2}\underline{Z}_{cp2} - \underline{I}_h(\underline{Z}_{a-cp2} + \underline{Z}_{b-cp2} + \underline{Z}_{c-cp2}) \end{cases} \quad (4.18)$$

Cu $\underline{Z}_{cp1-cp2}$ s-a notat impedanța mutuală dintre cele două bucle monofazate conductor de protecție-pământ, corespunzătoare conductoarelor de protecție notate cu cp_1 și cp_2 .

Din relațiile (4.18), se obțin pentru curenții în cele două conductoare de protecție, următoarele expresii:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{cp1} &= 3\underline{I}_h \frac{\underline{Z}_{cp2}\underline{Z}_{cp1}' - \underline{Z}_{cp1-cp2}\underline{Z}_{cp2}'}{\underline{Z}_{cp1}\underline{Z}_{cp2} - \underline{Z}_{cp1-cp2}^2} \\ \underline{I}_{cp2} &= 3\underline{I}_h \frac{\underline{Z}_{cp1}\underline{Z}_{cp2}' - \underline{Z}_{cp1-cp2}\underline{Z}_{cp1}'}{\underline{Z}_{cp1}\underline{Z}_{cp2} - \underline{Z}_{cp1-cp2}^2} \end{aligned} \quad (4.19)$$

\underline{Z}_{cp1}' , \underline{Z}_{cp2}' din relațiile (4.19), sunt valorile medii ale impedanțelor mutuale cu întoarcere prin pământ dintre conductoarele de protecție cp_1 și cp_2 și cele trei conductoare

de fază și sunt determinate de distanțele $D_{cp1} = \sqrt[3]{D_{a-cp1}D_{b-cp1}D_{c-cp1}}$ și

$$D_{cp2} = \sqrt[3]{D_{a-cp2}D_{b-cp2}D_{c-cp2}}.$$

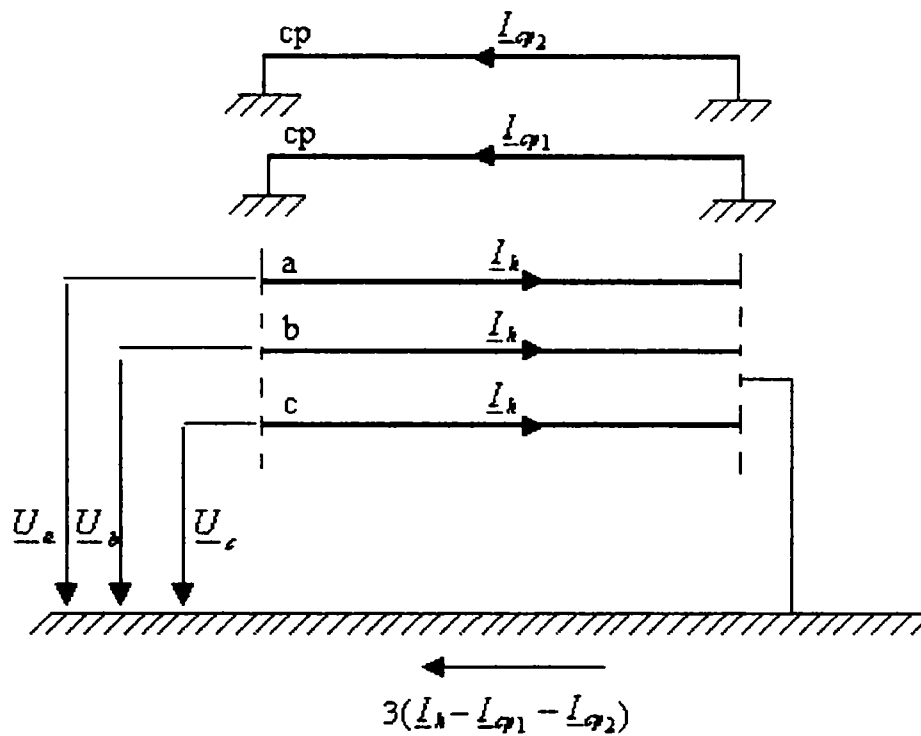


Figura 4.3 Curenții de succesiune homopolară în cele trei faze ale unei LEA cu două conductoare de protecție

Înlocuind curenții din relațiile (4.19), în relațiile (4.18) și rezolvând aceste ecuații, se obțin impedanțele homopolare ale fazelor. Pentru impedanța de secvență homopolară a liniei electrice aeriene cu două conductoare de protecție, se obține următoarea expresie ([13]):

$$\underline{Z}_{h-cp1,cp2} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{ah} + \underline{Z}_{bh} + \underline{Z}_{ch}) = \underline{Z}_h - 3 \frac{\underline{Z}_{cp2} \underline{Z}_{cp1}'^2 + \underline{Z}_{cp1} \underline{Z}_{cp2}'^2 - 2 \underline{Z}_{cp1-cp2} \underline{Z}_{cp2}' \underline{Z}_{cp1}'}{\underline{Z}_{cp1} \underline{Z}_{cp2} - \underline{Z}_{cp1-cp2}^2} \quad (4.20)$$

unde $\underline{Z}_{h-cp1,cp2}$ este impedanța de succesiune homopolară a liniei electrice aeriene în cazul în care există două conductoare de protecție cp_1 și cp_2 , iar \underline{Z}_h este impedanța de succesiune homopolară a liniei electrice aeriene în absența conductoarelor de protecție.

Relația (4.20) este valabilă în cazul în care cele două conductoare de protecție au diametre diferite, sunt din materiale diferite, sau sunt asimetric amplasate în raport cu circuitul.

Dacă cele două conductoare de protecție sunt identice și dispuse simetric în raport cu conductoarele de fază și echidistante față de pământ, impedanțele lor proprii în cazul

întoarcerii prin pământ și impedanțele lor mutuale față de conductoarele de fază având întoarcerea prin pământ, sunt egale:

$$\underline{Z}_{cp1} = \underline{Z}_{cp2}; \quad \underline{Z}'_{cp1} = \underline{Z}'_{cp2} \quad (4.21)$$

Înlocuind aceste expresii în relațiile (4.19), se obțin pentru curenții în cele două conductoare de protecție, următoarele expresii:

$$\underline{I}_{cp1} = \underline{I}_{cp2} = 3\underline{I}_h \frac{\underline{Z}'_{cp1}(\underline{Z}_{cp1} - \underline{Z}_{cp2})}{\underline{Z}_{cp1}^2 - \underline{Z}_{cp1-cp2}^2} = 3\underline{I}_h \frac{\underline{Z}'_{cp1}}{\underline{Z}_{cp1} + \underline{Z}_{cp1-cp2}} \quad (4.22)$$

Curentul total în cele două conductoare de protecție, va fi:

$$\underline{I} = \underline{I}_{cp1} + \underline{I}_{cp2} = 3\underline{I}_h \frac{2\underline{Z}'_{cp1}}{\underline{Z}_{cp1} + \underline{Z}_{cp1-cp2}} = 3\underline{I}_h \frac{\underline{Z}'_{cp1}}{\frac{1}{2}(\underline{Z}_{cp1} + \underline{Z}_{cp1-cp2})} \quad (4.23)$$

Pentru impedanța de succesiune homopolară a liniei electrice aeriene se obține, în acest caz, expresia:

$$\underline{Z}_{h-cp1,cp2} = \underline{Z}_h - \frac{3\underline{Z}_{cp1}^2}{\frac{1}{2}(\underline{Z}_{cp1} + \underline{Z}_{cp1-cp2})} \quad (4.24)$$

Impedanța mutuală \underline{Z}'_{cp1} din expresia (4.24) este determinată de distanța

$$D_{cp1} = D_{cp2} = \sqrt[3]{D_{a-cp1}D_{b-cp1}D_{c-cp1}}.$$

4.3 Linii electrice aeriene trifazate cu dublu circuit

În figura 4.4 sunt reprezentate două linii de transport paralele, situate pe aceiași stâlpi, a, b, c fiind conductoarele uneia dintre linii, iar A, B, C conductoarele celeilalte linii.

Impedanța mutuală de succesiune homopolară dintre cele două circuite de transport paralele, este influențată de distanța dintre circuite și de numărul și dispunerea conductoarelor de protecție. Prezența conductoarelor de protecție are ca efect reducerea impedanței mutuale de succesiune homopolară dintre cele două circuite.

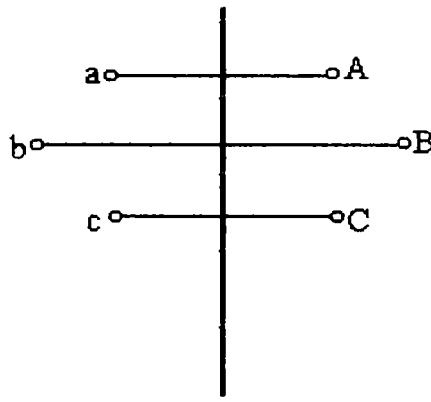


Figura 4.4 Coronamentul LEA

Curenții de succesiune homopolară care circulă într-unul dintre cele două circuite trifazate, induc tensiuni în cele trei faze ale celui alt circuit. Aceste tensiuni induse, pot fi separate în componentele lor simetrice. Componentele de succesiune directă și inversă ale tensiunilor induse sunt mici. Considerând numai componentele de succesiune homopolară ale tensiunilor induse de către componentele de succesiune homopolară ale curentului, impedanța mutuală de succesiune homopolară dintre circuitele de transport paralele, este raportul dintre tensiunea homopolară indusă într-un circuit și curentul homopolar de fază din celălalt circuit, care o induce [13].

Impedanța mutuală de succesiune homopolară dintre două circuite paralele poate fi determinată considerând că într-unul dintre circuite circulă doar curenții de succesiune homopolară, iar celălalt circuit este deschis la o extremitate, dar are cele trei faze conectate la pământ la cealaltă extremitate. Media celor trei tensiuni induse în cele trei faze ale circuitului deschis de către curenții de succesiune homopolară din circuitul închis și de către curenții din conductoarele de protecție, este tensiunea indusă de succesiune homopolară. Raportul dintre această tensiune și curentul de succesiune homopolară de fază din circuitul inductor, este impedanța mutuală de succesiune homopolară dintre circuite [13].

Tensiunile induse în fazele A, B, C ale circuitului deschis datorită curenților de succesiune homopolară \underline{I}_h din fazele a, b, c ale circuitului inductor și curenților $\underline{I}_{cp1}, \underline{I}_{cp2}, \dots, \underline{I}_{cpn}$ din cele n conductoare de protecție, sunt date de relațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_{Ah} = \underline{I}_h \underline{Z}_{Aa-p} + \underline{I}_h \underline{Z}_{Ab-p} + \underline{I}_h \underline{Z}_{Ac-p} + \underline{I}_{cp1} \underline{Z}_{A-cp1} + \underline{I}_{cp2} \underline{Z}_{A-cp2} + \dots + \underline{I}_{cpn} \underline{Z}_{A-cpn} \\ \underline{U}_{Bh} = \underline{I}_h \underline{Z}_{Ba-p} + \underline{I}_h \underline{Z}_{Bb-p} + \underline{I}_h \underline{Z}_{Bc-p} + \underline{I}_{cp1} \underline{Z}_{B-cp1} + \underline{I}_{cp2} \underline{Z}_{B-cp2} + \dots + \underline{I}_{cpn} \underline{Z}_{B-cpn} \\ \underline{U}_{Ch} = \underline{I}_h \underline{Z}_{Ca-p} + \underline{I}_h \underline{Z}_{Cb-p} + \underline{I}_h \underline{Z}_{Cc-p} + \underline{I}_{cp1} \underline{Z}_{C-cp1} + \underline{I}_{cp2} \underline{Z}_{C-cp2} + \dots + \underline{I}_{cpn} \underline{Z}_{C-cpn} \end{cases} \quad (4.25)$$

Dacă se notează cu \underline{Z}_{hm} impedanța mutuală de succesiune homopolară, atunci ea va fi dată de relația:

$$\underline{Z}_{hm} = \frac{1}{3} \left(\frac{U_{Ah}}{I_h} + \frac{U_{Bh}}{I_h} + \frac{U_{Ch}}{I_h} \right) \quad (4.26)$$

Valoarea medie a tensiunii \underline{U}_{Ah} indusă în fazele A, B, C ale circuitului deschis datorită curenților de succesiune homopolară \underline{I}_h din fazele a, b, c ale circuitului inductor și curenților $\underline{I}_{cp1}, \underline{I}_{cp2}, \dots, \underline{I}_{cpn}$ din cele n conductoare de protecție, poate fi scrisă sub forma:

$$\underline{U}_{Ah} = 3\underline{I}_h \underline{Z}_{Aa-p} + \underline{I}_{cp1} \underline{Z}_{A-cp1} + \underline{I}_{cp2} \underline{Z}_{A-cp2} + \dots + \underline{I}_{cpn} \underline{Z}_{A-cpn} \quad (4.27)$$

Pentru impedanța mutuală \underline{Z}_{hm} , va rezulta următoarea expresie:

$$\underline{Z}_{hm} = \frac{\underline{U}_{Ah}}{\underline{I}_h} = 3\underline{Z}_{Aa-p} + \frac{\underline{I}_{cp1}}{\underline{I}_{ah}} \underline{Z}_{A-cp1} + \frac{\underline{I}_{cp2}}{\underline{I}_{ah}} \underline{Z}_{A-cp2} + \dots + \frac{\underline{I}_{cpn}}{\underline{I}_{ah}} \underline{Z}_{A-cpn} \quad (4.28)$$

\underline{Z}_{Aa-p} din expresia (4.28) este impedanța mutuală medie dintre cele trei conductoare ale circuitului deschis și cele ale circuitului inductor, cu întoarcere prin pământ. Această impedanță este determinată de distanța medie geometrică dintre conductoarele celor două circuite:

$$D_{aA} = \sqrt[3]{D_{aA} D_{aB} D_{aC} D_{bA} D_{bB} D_{bC} D_{cA} D_{cB} D_{cC}} \quad (4.29)$$

$\underline{Z}_{A-cp1}, \underline{Z}_{A-cp2}, \dots, \underline{Z}_{A-cpn}$ din relația (4.28) sunt impedanțele mutuale medii dintre conductoarele A, B, C ale circuitului deschis și conductoarele de protecție cp_1, cp_2, \dots, cp_n cu întoarcere prin pământ și corespund distanțelor medii geometrice

$$D_{A-cp1} = \sqrt[3]{D_{A-cp1} D_{B-cp1} D_{C-cp1}}, \quad D_{A-cp2} = \sqrt[3]{D_{A-cp2} D_{B-cp2} D_{C-cp2}}, \quad D_{A-cpn} = \sqrt[3]{D_{A-cpn} D_{B-cpn} D_{C-cpn}}.$$

În cazul în care nu există conductoare de protecție, relația (4.28) devine:

$$\underline{Z}_{hm} = 3\underline{Z}_{Aa-p} = 3(R_{Aa-p} + jX_{Aa-p}) \quad (4.30)$$

În cazul în care există un singur conductor de protecție, relația (4.28) devine:

$$\underline{Z}_{hm-cp1} = \underline{Z}_{hm} - 3 \frac{\underline{Z}_{A-cp1} \underline{Z}_{a-cp1}}{\underline{Z}_{cp1}} \quad (4.31)$$

Dacă conductorul de protecție este la aceeași distanță față de ambele circuite, $\underline{Z}_{A-cp1} = \underline{Z}_{a-cp1}$ și relația (4.49) poate fi scrisă sub forma:

$$\underline{Z}_{hm-cp1} = \underline{Z}_{hm} - 3 \frac{\underline{Z}_{a-cp1}^2}{\underline{Z}_{cp1}} \quad (4.32)$$

În cazul în care există două conductoare de protecție, ținând cont de expresiile (4.19) ale curenților în cele două conductoare de protecție, pentru impedanța mutuală se obține expresia:

$$\underline{Z}_{hm-cp1,cp2} = \underline{Z}_{hm} - \frac{-3 \frac{\underline{Z}_{a-cp1} \underline{Z}_{A-cp1} \underline{Z}_{cp2} + \underline{Z}_{a-cp2} \underline{Z}_{A-cp2} \underline{Z}_{cp1} - (\underline{Z}_{a-cp1} \underline{Z}_{A-cp2} + \underline{Z}_{a-cp2} \underline{Z}_{A-cp1}) \underline{Z}_{cp1-cp2}}{\underline{Z}_{cp1} \underline{Z}_{cp2} - \underline{Z}_{cp1-cp2}^2}}{\quad} \quad (4.33)$$

Dacă cele două conductoare de protecție sunt identice, în ipoteza repartiției egale a curentului între cele două conductoare, impedanța mutuală de succesiune homopolară va fi dată de relația:

$$\underline{Z}_{hm-cp1,cp2} = \underline{Z}_{hm} - 3 \frac{2\underline{Z}_{a-cp1}^2}{\underline{Z}_{cp1} + \underline{Z}_{cp1-cp2}} \quad (4.34)$$

În cazul general al circuitelor neidentice, impedanța homopolară a liniei cu dublu circuit, se determină folosind schema echivalentă cunoscută a două circuite cuplate magnetic. În figura 4.5 sunt reprezentate cele două circuite cu impedanțele proprii \underline{Z}_{hI} , \underline{Z}_{hII} conectate la ambele extremități și cu impedanța mutuală \underline{Z}_{km} între ele.

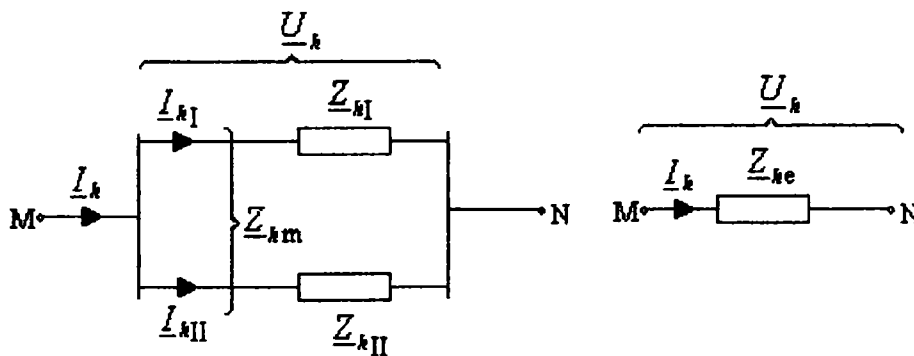


Figura 4.5 Determinarea impedanței homopolară a unei LEA trifazate cu dublu circuit

Căderile de tensiune pe fază în regim homopolar, sunt date de următoarele expresii:

$$\begin{cases} \underline{U}_h = \underline{I}_{hl} \underline{Z}_{hl} + \underline{I}_{hll} \underline{Z}_{hm} \\ \underline{U}_h = \underline{I}_{hl} \underline{Z}_{hm} + \underline{I}_{hll} \underline{Z}_{hll} \end{cases} \quad (4.35)$$

Primul termen din relațiile de mai sus corespunde căderii de tensiune pe faza unui circuit, corespunzătoare curentului ce trece prin faza aceluși circuit, iar al doilea termen corespunde căderii de tensiune pe faza unui circuit, corespunzătoare curentului ce trece prin faza celuilalt circuit. Rezolvând acest sistem, se obține pentru impedanța \underline{Z}_{he} a circuitului echivalent, următoarea expresie ([13]):

$$\underline{Z}_{he} = \frac{\underline{U}_h}{\underline{I}_h} = \frac{\underline{Z}_{hl} \underline{Z}_{hll} - \underline{Z}_{hm}^2}{\underline{Z}_{hl} + \underline{Z}_{hll} - 2\underline{Z}_{hm}} \quad (4.36)$$

Pentru circuite identice, $\underline{Z}_{hl} = \underline{Z}_{hll}$ expresia (4.36) devine:

$$\underline{Z}_{he} = \frac{\underline{Z}_{hl} + \underline{Z}_{hm}}{2} \quad (4.37)$$

4.4 Analiza influenței diverșilor factori asupra impedanței de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene trifazate

Impedanța de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene depinde de mai mulți factori și anume: prezența conductoarelor de protecție, înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, diametrul conductorului, frecvența curentului, rezistivitatea electrică a solului etc. În continuare, se prezintă o analiză a influenței acestor factori asupra parametrilor de secvență homopolară ai liniilor electrice aeriene.

Pentru exemplificare, se consideră o linie electrică aeriană trifazată de 220 kV dublu circuit, dispusă pe stâlpi având configurația din figura 4.6 ([62]). Conform [62], linia electrică poate fi prevăzută cu conductor de protecție din aluminiu-oțel (*AL-OL*) având secțiunea $S_n = 160/95mm^2$, sau cu conductor de protecție din oțel (*OL*), cu secțiunea $S_n = 95mm^2$.

În figura 4.6 sunt date posibilele înălțimi ale stâlpului, conform [79]. Înălțimea stâlpului coincide cu înălțimea la care este plasat conductorul de protecție.

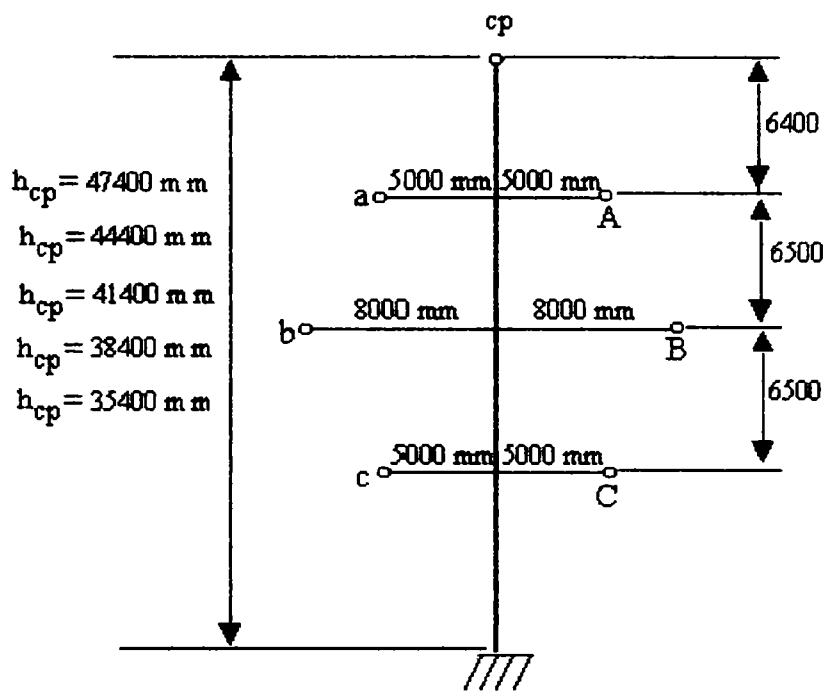


Figura 4.6 LEA trifazată de 220kV

În tabelele A2.1 și A2.2 din Anexa A2 sunt date valorile rezistenței, respectiv reactanței de secvență homopolară ale liniei considerate, în funcție de rezistivitatea electrică a solului și pentru valorile înălțimii conductoarelor față de suprafața solului prezentate în figura 4.6. Sunt date și valorile rezistenței și reactanței de secvență homopolară, în ipoteza în care s-ar neglija prezența conductorului de protecție. Valorile prezentate sunt calculate cu formulele complete prezentate în acest capitol și anume, relația (4.7) pentru impedanța proprie a liniei, relația (4.16) pentru impedanța de secvență homopolară a liniei în prezența unui conductor de protecție și relația (4.32) pentru calculul impedanței mutuale dintre cele două circuite ce funcționează în paralel.

În figura 4.7 este reprezentată grafic rezistența de secvență homopolară a acestei linii, în funcție de rezistivitatea electrică a solului în [Ωm].

În figura 4.8 este reprezentată reactanța de secvență homopolară a liniei electrice considerate, în funcție de rezistivitatea electrică a solului, pentru o înălțime a conductorului de protecție $h=47,4m$.

Sunt reprezentate valorile rezistenței și reactanței de secvență homopolară pentru cazul în care conductorul de protecție este din *AL-OL*, pentru cazul în care conductorul de protecție este din *OL*, pentru situația în care s-ar neglija rezistența conductorului de protecție din *OL* și apoi cazul în care s-ar neglija prezența conductorului de protecție.

În aceste figuri, *cp* este abrevierea folosită pentru conductor de protecție.

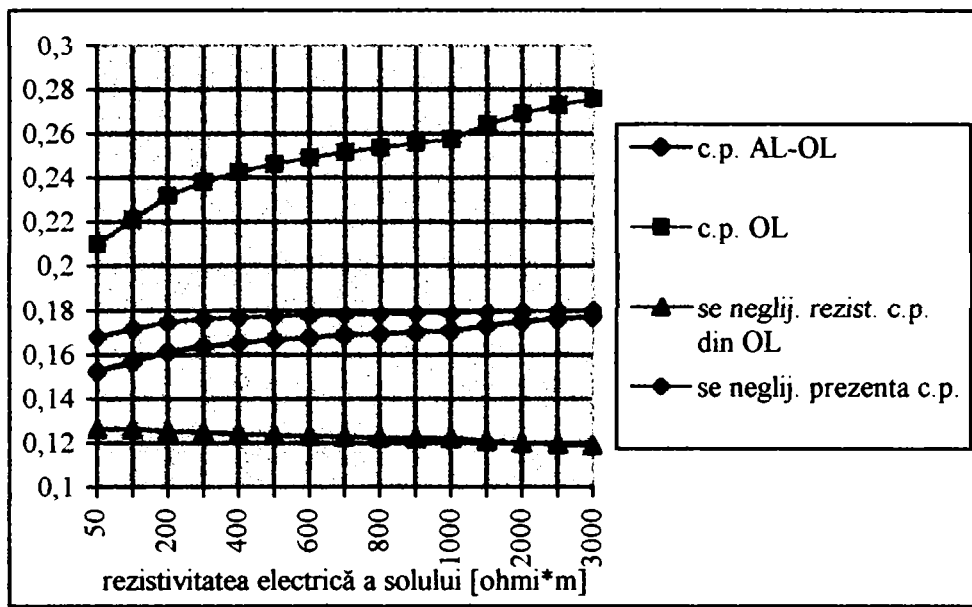


Figura 4.7 Rezistența de secvență homopolară a liniei de 220 kV dublu circuit, în Ω/km , pentru $h=47,4m$, în funcție de rezistivitatea electrică a solului în Ωm

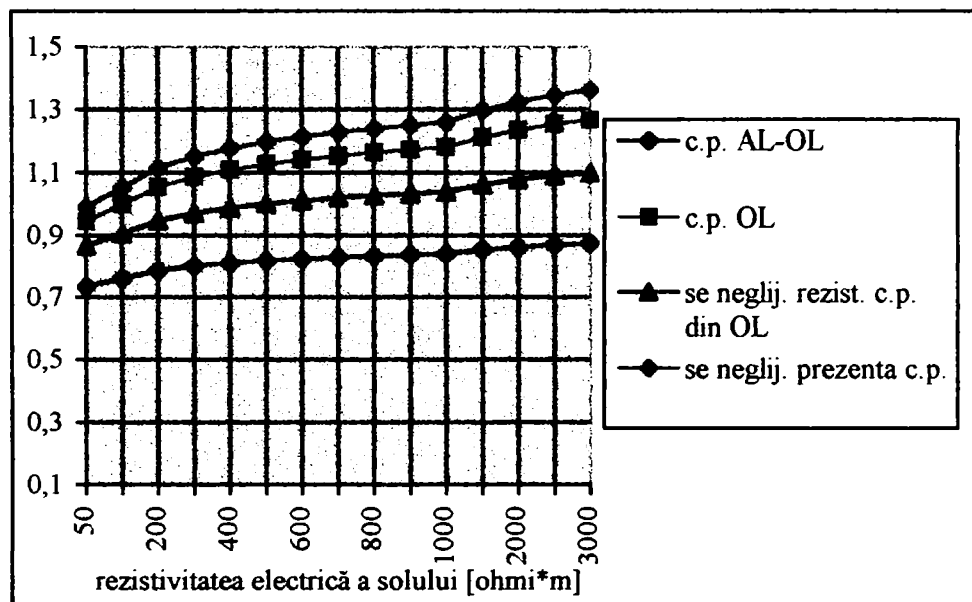


Figura 4.8 Reactanța de secvență homopolară a liniei de 220 kV dublu circuit, în Ω/km , pentru $h=47,4m$, în funcție de rezistivitatea electrică a solului în Ωm

În ceea ce privește valoarea rezistenței de secvență homopolară a liniei, se poate observa că în cazul conductoarelor de protecție cu rezistențe mici, cum este cazul conductorului de protecție din *AL-OL*, această valoare scade. În cazul conductoarelor de protecție cu rezistențe mari, cum este cazul conductorului din oțel, valoarea rezistenței de secvență homopolară a liniei crește.

În cazul reactanței de secvență homopolară, se observă că valoarea acesteia în cazul în care se neglijează prezența conductorului de protecție este mai mare, dar apropiată de valoarea obținută pentru cazul în care conductorul de protecție ar fi din oțel. Se observă de

asemenea că, în cazul în care conductorul de protecție este din *AL-OL*, influența acestuia asupra reactanței de secvență homopolară este puternică.

În figura 4.9 se reprezintă, în procente, scăderea relativă a valorii rezistenței de secvență homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție de aluminiu-oțel, față de valoarea rezistenței de secvență homopolară a liniei fără conductor de protecție, în funcție de rezistivitatea electrică a solului.

Se poate observa faptul că valoarea rezistenței de secvență homopolară scade cu maximum 10% și cu cât rezistivitatea electrică a solului este mai mare, cu atât prezența conductorului de protecție influențează mai puțin valoarea rezistenței de secvență homopolară. Dacă la o rezistivitate de $50\Omega m$, scăderea valorii rezistenței de secvență homopolară este de 9,31%, la o rezistivitate electrică a solului de $3000\Omega m$ această scădere este de doar 1,7%.

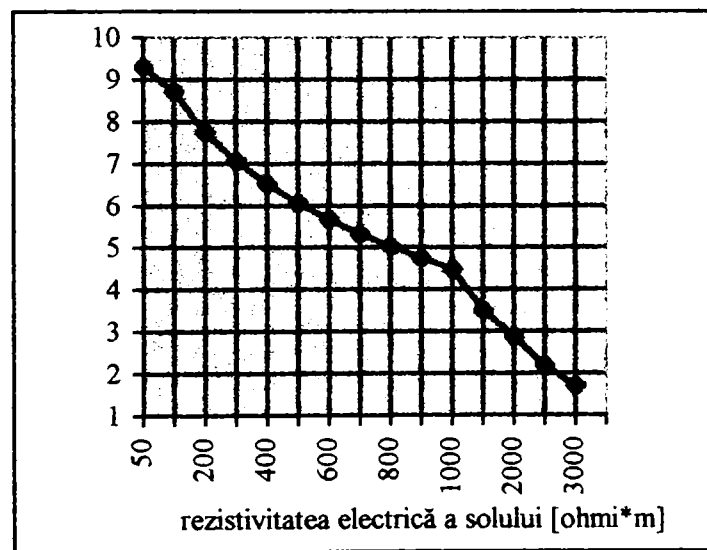


Figura 4.9 Scăderea relativă a valorii rezistenței de secvență homopolară a liniei, în [%], datorată conductorului de protecție din *AL-OL*. S-a considerat $h=47,4m$

În figura 4.10 este reprezentată, în procente, scăderea relativă a valorii reactanței de secvență homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție de aluminiu-oțel, față de valoarea reactanței de secvență homopolară a liniei fără conductor de protecție, în funcție de rezistivitatea electrică a solului.

Se poate observa influența puternică pe care o are prezența conductorului de protecție asupra valorii reactanței de secvență homopolară a liniei. Valoarea acesteia scade cu peste 25% și scăderea este cu atât mai pronunțată cu cât rezistivitatea electrică a solului este mai mare.

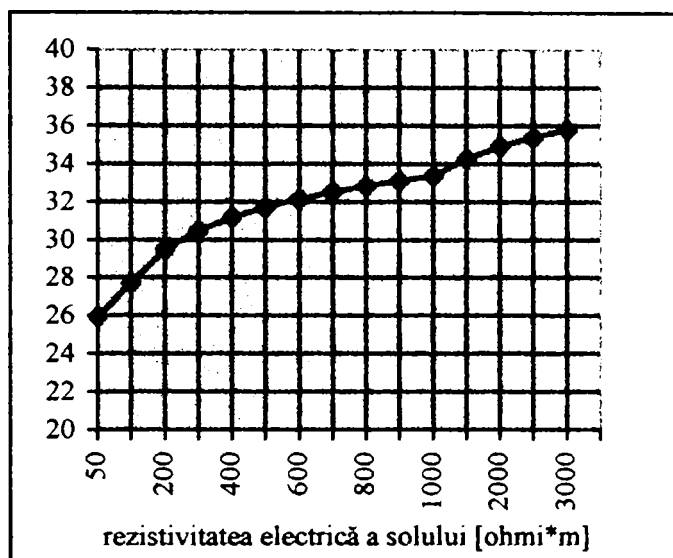


Figura 4.10 Scăderea relativă a valorii reactanței de secvență homopolară a liniei, în [%], datorată conductorului de protecție din *AL-OL*. S-a considerat $h=47,4m$

În figurile 4.11 și 4.12, se prezintă influența prezenței conductorului de protecție din oțel asupra rezistenței și reactanței de secvență homopolară. Se poate observa că prezența conductorului de protecție din oțel, care are o rezistență mare față de conductorul din *AL-OL*, determină o creștere a valorii rezistenței de secvență homopolară a liniei, spre deosebire de conductorul din *AL-OL* care, având o rezistență mică, determină scăderea valorii rezistenței de secvență homopolară.

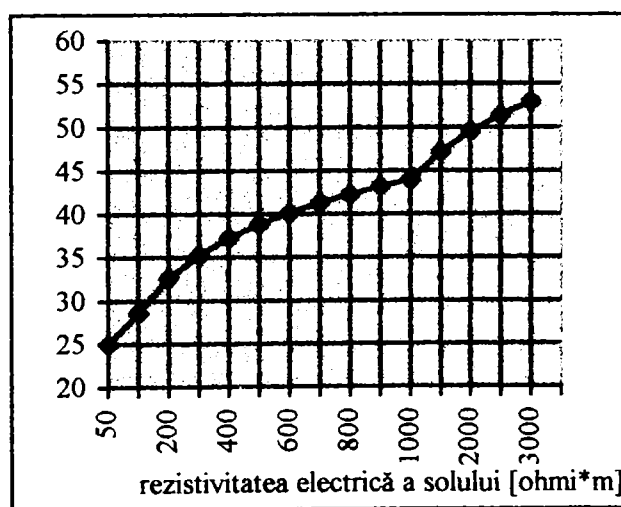


Figura 4.11 Creșterea relativă a valorii rezistenței de secvență homopolară a liniei, în [%], datorată conductorului de protecție din *OL*. S-a considerat $h=47,4m$

Se poate observa faptul că, dacă pentru o rezistivitate electrică a solului de $50\Omega m$ rezistența de secvență homopolară crește cu 25%, pentru o rezistivitate electrică a solului de $3000\Omega m$, creșterea valorii rezistenței homopolare este de 53%.

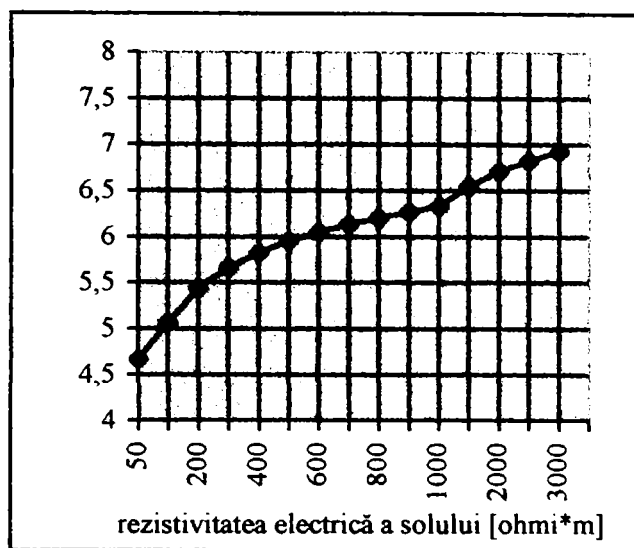


Figura 4.12 Scăderea relativă a valorii reactanței de secvență homopolară a liniei, în [%], datorată conductorului de protecție din OL. S-a considerat $h=47,4m$

În ceea ce privește valoarea reactanței de secvență homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel, din figura 4.12 se observă faptul că aceasta scade față de valoarea reactanței homopolare a liniei fără conductor de protecție. La o rezistivitate electrică a solului de $50\Omega m$, scăderea relativă este de 4,67%, iar la o rezistivitate electrică de $3000\Omega m$, scăderea relativă este de 6,93%.

Rezistența conductorului de protecție influențează valoarea reactanței de secvență homopolară a liniei. Dacă la calculul reactanței liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel se neglijează rezistența conductorului de protecție, se va obține o valoare mai mică a reactanței de secvență homopolară față de valoarea reală, cu aproximativ (10-15)%. În figura 4.13 se prezintă scăderea relativă a valorii reactanței de secvență homopolară pentru diferite valori ale rezistivității electrice a solului, în situația în care se neglijează rezistența conductorului de protecție din oțel, față de cazul în care se ține cont de rezistența acestuia. Se poate observa că diferența dintre valori crește cu creșterea valorii rezistivității electrice a solului. Astfel, pentru o rezistivitate electrică de $100\Omega m$, reactanța homopolară a liniei calculată în condițiile în care se ține cont de rezistența conductorului de protecție din oțel este $0,9992\Omega/km$, iar dacă se neglijează rezistența conductorului de protecție reactanța homopolară a liniei va fi $0,9059\Omega/km$, adică o valoare mai mică cu 9,3%. La o rezistivitate electrică a solului de $3000\Omega m$, valoarea reactanței homopolare în condițiile în care se neglijează rezistența conductorului de protecție va fi mai mică cu 13,33%.

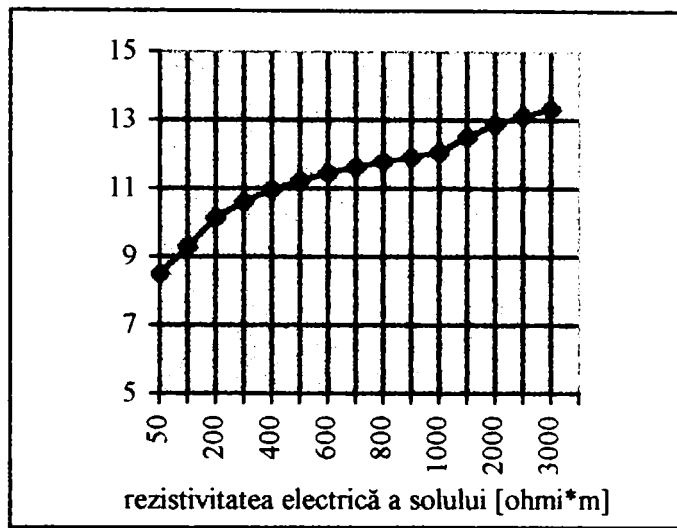


Figura 4.13 Scăderea relativă a valorii reactanței de secvență homopolară a liniei, în [%], dacă se neglijează rezistența conductorului de protecție din OL. S-a considerat $h=47,4m$

Dacă se neglijează în totalitate prezența conductorului de protecție din oțel, pentru reactanța homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel se obțin valori mai mari cu până la 10%. În figura 4.14 se poate observa creșterea relativă a valorii reactanței homopolare a liniei în cazul în care se neglijează prezența conductorului de protecție, față de cazul în care se ține cont de prezența conductorului de protecție din oțel.

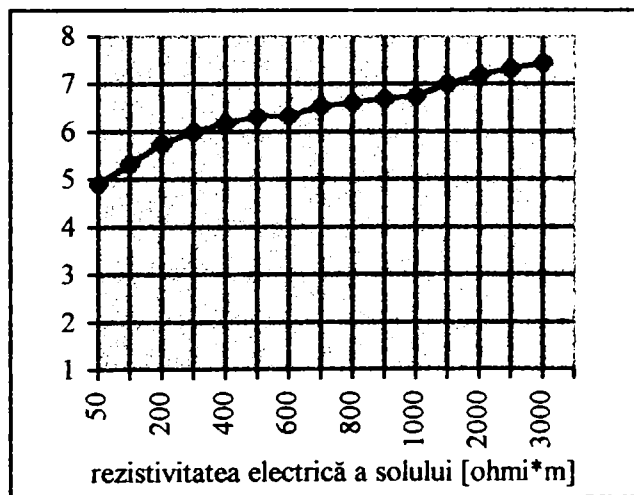


Figura 4.14 Creșterea relativă a valorii reactanței de secvență homopolară a liniei, în [%], dacă se neglijează prezența conductorului de protecție din OL. S-a considerat $h=47,4m$

În figura 4.15 este reprezentată rezistența de secvență homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție din AL-OL, în funcție de înălțimea stâlpului - care este aceeași cu a conductorului de protecție, pentru diferite valori ale rezistivității electrice a solului.

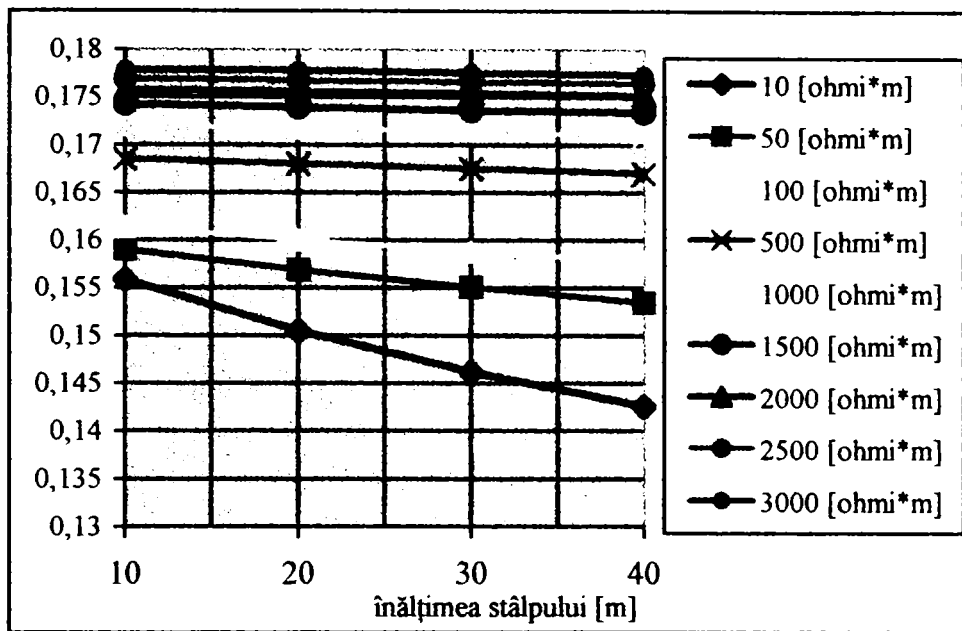


Figura 4.15 Rezistența de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în [Ω/km], prevăzută cu conductor de protecție din AL-OL, în funcție de înălțimea stâlpului în [m]

În figura 4.16 este reprezentată reactanța de secvență homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție de aluminiu-oțel, în funcție de înălțimea stâlpului, care este aceeași cu a conductorului de protecție, pentru diferite valori ale rezistivității electrice a solului.

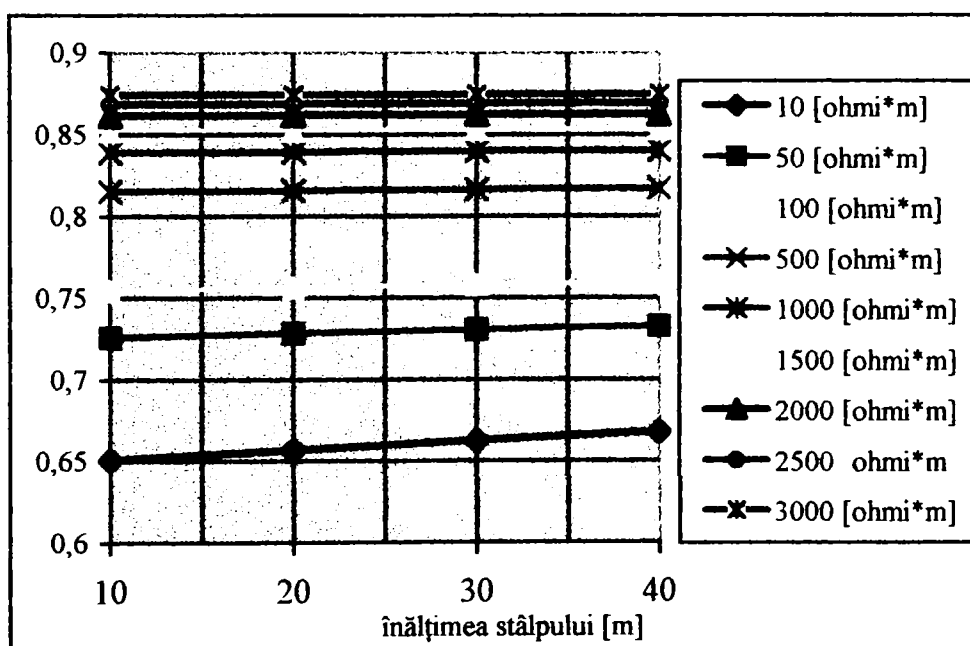


Figura 4.16 Reactanța de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în [Ω/km], prevăzută cu conductor de protecție din AL-OL, în funcție de înălțimea stâlpului în [m]

În figurile 4.17, 4.18, 4.19 și 4.20, sunt reprezentate rezistența, respectiv reactanța de secvență homopolară ale liniei considerate, în funcție de înălțimea stâlpului, pentru o rezistivitate a solului de $100 \Omega m$, respectiv de $500 \Omega m$; valorile s-au obținut considerând linia

prevăzută cu conductor de protecție din *AL-OL*, cu conductor de protecție din *OL* și în ipoteza în care se neglijează rezistența conductorului de protecție din *OL*, respectiv dacă se neglijează prezența conductorului de protecție.

Se observă că la aceeași valoare a rezistivității electrice a solului, rezistența și reactanța de secvență homopolară ale liniei electrice, pot fi considerate ca fiind independente de înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, curbele care exprimă dependența acestora fiind aproximativ linii drepte orizontale.

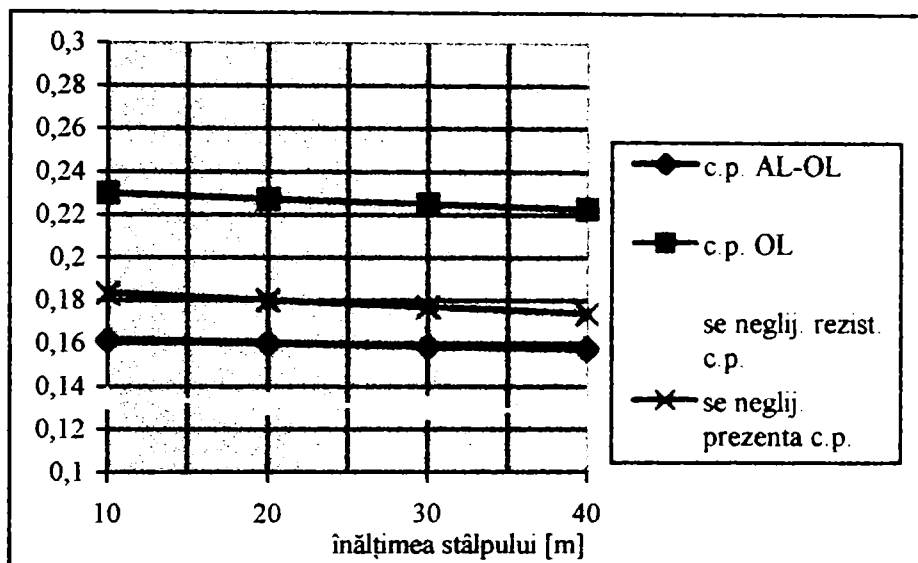


Figura 4.17 Rezistența de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în [Ω/km], în funcție de înălțimea stâlpului în [m], pentru o rezistivitate electrică a solului de $100\Omega m$

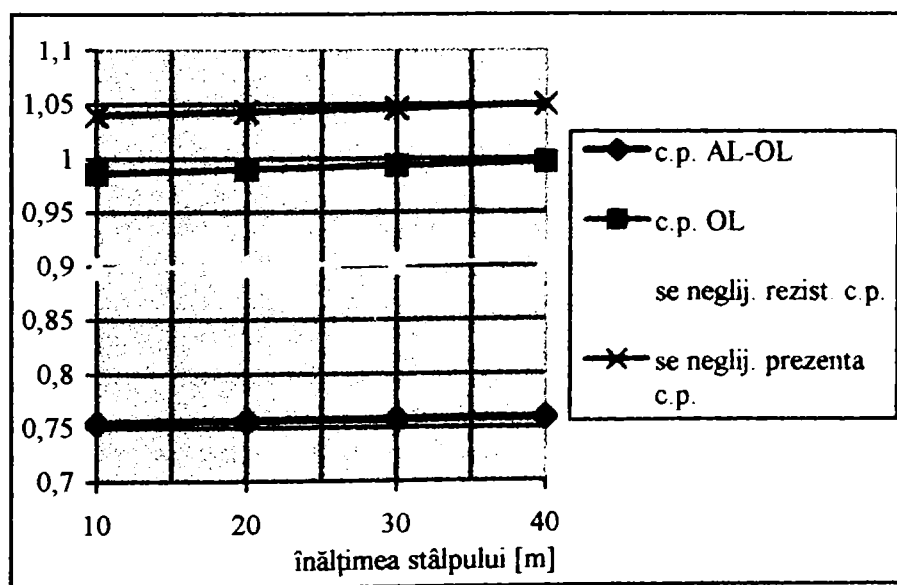


Figura 4.18 Reactanța de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în [Ω/km], în funcție de înălțimea stâlpului în [m], pentru o rezistivitate electrică a solului de $100\Omega m$

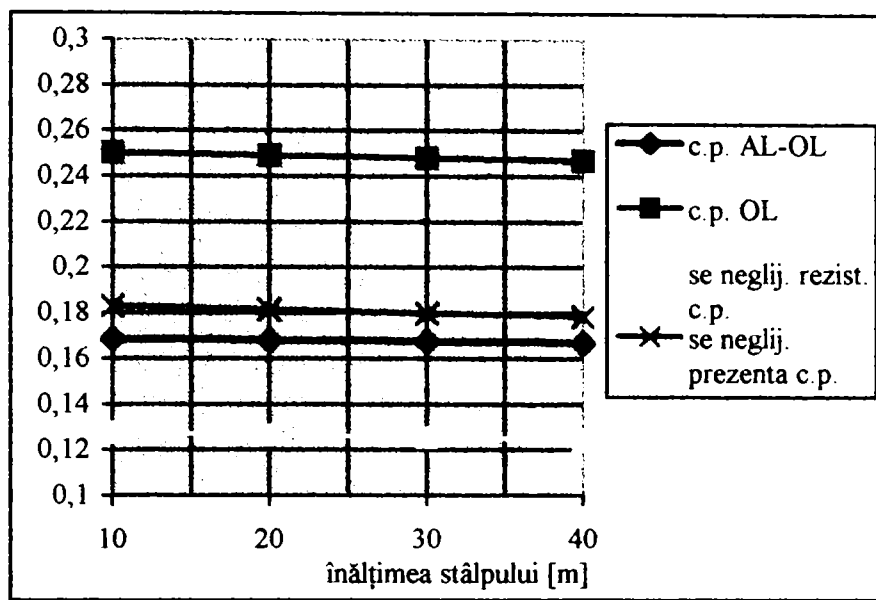


Figura 4.19 Rezistența de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în $[\Omega/km]$, în funcție de înălțimea stâlpului în $[m]$, pentru o rezistivitate electrică a solului de $500 \Omega m$

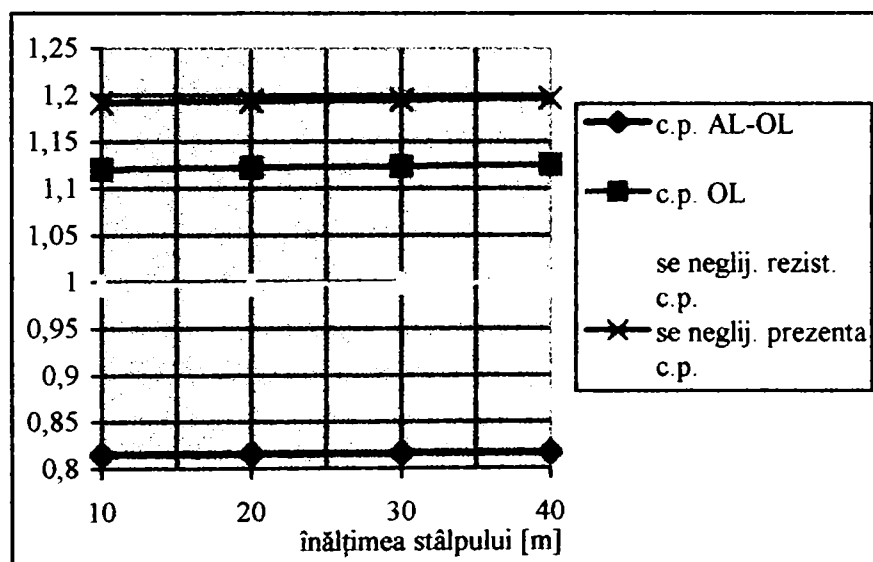


Figura 4.20 Reactanța de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în $[\Omega/km]$, în funcție de înălțimea stâlpului în $[m]$, pentru o rezistivitate electrică a solului de $500 \Omega m$

Pentru a avea o reprezentare a influenței cantitative a impedanței mutuale dintre cele două circuite paralele asupra impedanței de secvență homopolară a liniei, s-au calculat valorile rezistenței și reactanței homopolare pentru distanțele orizontale dintre conductoarele active reprezentate în figura 4.21d).

În figurile 4.22 și 4.23 se prezintă rezistența și reactanța de succesiune homopolară ale liniei electrice prevăzută cu conductor de protecție din AL-OL, pentru diferite valori ale rezistivității electrice a solului, pentru situația în care acestea se calculează cu relațiile complete de calcul și pentru situația în care la calculul lor se neglijează valorile rezistenței și reactanței mutuale dintre cele două circuite.

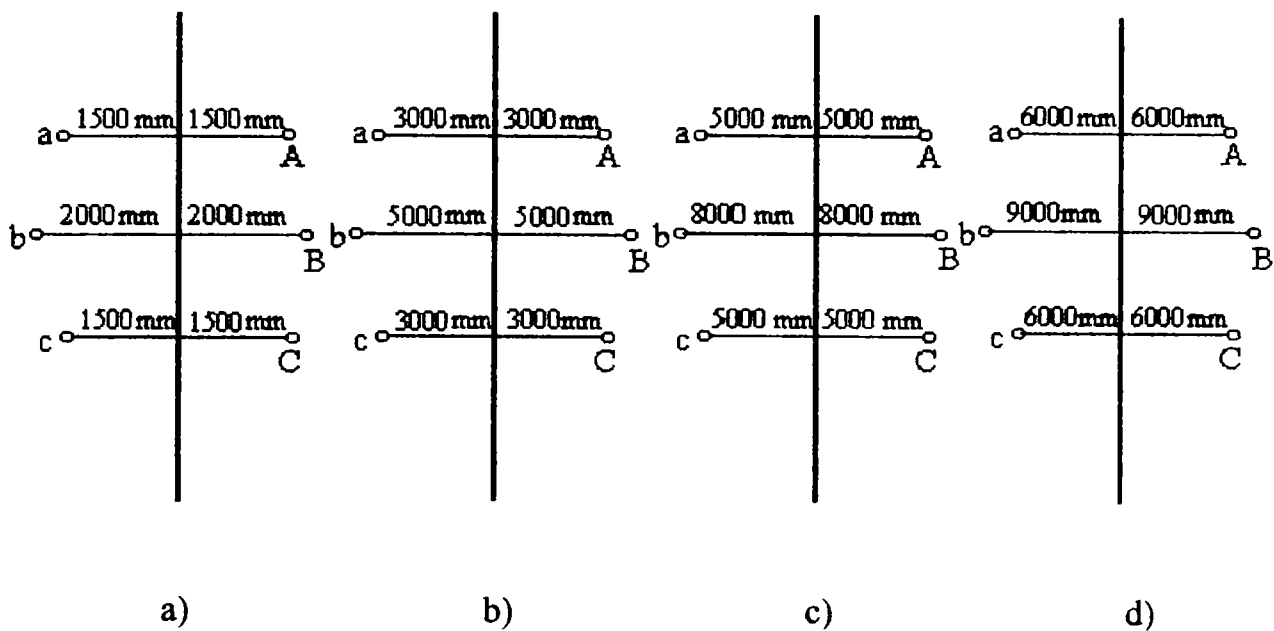


Figura 4.21 Distanțe horizontale între conductoarele de fază ale liniei

Analizând figurile 4.22 și 4.23, se poate observa că valorile rezistenței și reactanței de succesiune homopolară ale liniei sunt mai mari în cazul în care se ține cont de cuplajul magnetic dintre cele două circuite. Ca urmare, impedanța de succesiune homopolară a fiecărui circuit al unei linii electrice aeriene cu dublu circuit se mărește (la trecerea curenților prin ambele circuite în aceeași direcție), datorită inducției mutuale dintre conductoarele circuitelor paralele. Valorile rezistenței și reactanței homopolare ale liniei electrice, conform valorilor obținute, sunt mai mari cu aproximativ 10%.

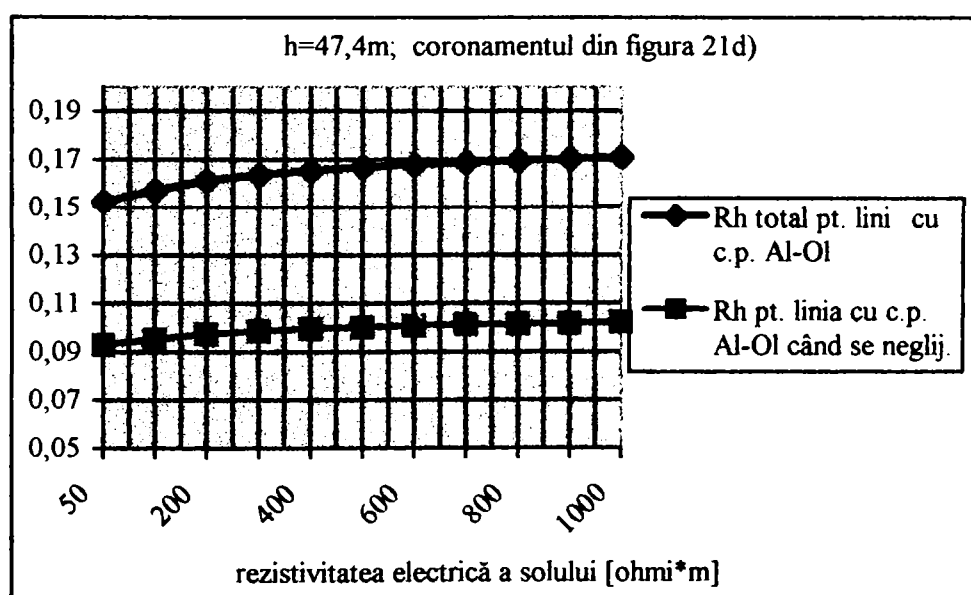


Figura 4.22 Influența rezistenței mutuale dintre cele două circuite asupra rezistenței de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în [Ω/km], pentru diferite valori ale rezistivității electrice a solului în [Ωm]

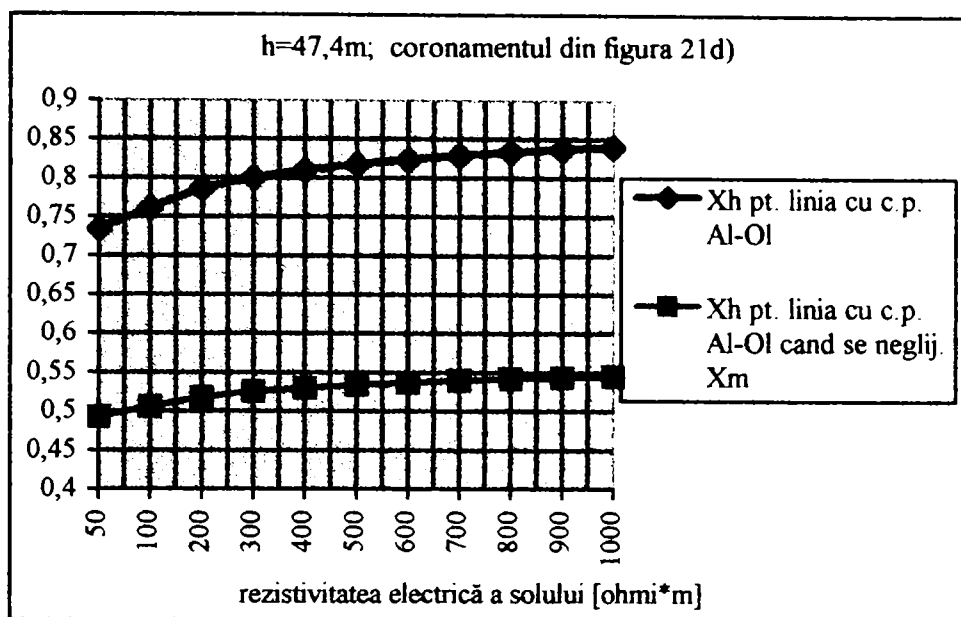


Figura 4.23 Influența reactanței mutuale dintre cele două circuite asupra reactanței de secvență homopolară a LEA de 220 kV dublu circuit, în [Ω/km], pentru diferite valori ale rezistivității electrice a solului în [Ωm]

4.5 Concluzii

Din analiza rezultatelor prezentate, se observă influența conductoarelor de protecție asupra rezistenței și reactanței de secvență homopolară ale liniei electrice. Existența conductoarelor de protecție legate la pământ, poate modifica substanțial valorile parametrilor de succesiune homopolară ai liniei electrice aeriene trifazate și influențează impedanța mutuală de secvență homopolară dintre circuitele de transport paralele.

Dacă conductorul de protecție este realizat din materiale cu rezistență scăzută (cupru, aluminu AL, OL-AL), influența lui este foarte puternică și trebuie luată în considerare la determinarea impedanței de secvență homopolară a LEA trifazate.

S-a arătat că în cazul în care LEA sunt prevăzute cu conductoare de protecție din aluminu-oțel, acestea conduc la scăderea valorii rezistenței de secvență homopolară cu maximum 10% și la scăderea reactanței de secvență homopolară cu aproximativ (25-50)%.

Conductorul de protecție din oțel OL are o rezistență mare și reduce impedanța homopolară a liniei cu aproximativ (5-8)%. În majoritatea calculelor practice ale curenților de scurtcircuit, se neglijează rezistența conductoarelor liniilor. Pentru linii cu conductoare de protecție din oțel, această ipoteză în evaluarea impedanței de secvență a liniei poate conduce la o eroare însemnată, deoarece valoarea reactanței de succesiune homopolară a liniei depinde de rezistența conductorului de protecție. Astfel, în analiza efectuată s-a arătat că neglijarea rezistenței conductorului de protecție din oțel conduce la valori ale reactanței de secvență

homopolară mai mici cu aproximativ (15-20)%. Dacă se neglijează cu totul prezența conductorului de protecție din oțel, se obțin valori ale reactanței de secvență homopolară mai mari cu până la 15% față de valorile calculate în prezența conductorului de protecție. De remarcat că rezultatele obținute sunt în concordanță cu valorile prezentate în literatura de specialitate ([101]).

Trebuie de asemenea precizat că, datorită faptului că rezistența și reactanța interioară a conductoarelor de oțel depind de permeabilitatea magnetică a materialului, care depinde de intensitatea câmpului magnetic - dependentă de intensitatea curentului electric din conductor, pentru calcule de precizie trebuie ca valorile rezistenței și reactanței interioare a conductorului din oțel să se considere după tabelele obținute pe cale experimentală, pentru fiecare marcă a materialului dat. Pentru cazul de față, valorile prezentate au fost calculate pentru un conductor de protecție din oțel marca *TK-70*. Când LEA sunt prevăzute cu astfel de conductoare de protecție, se poate spune că acestea conduc la o mărire a valorii rezistenței homopolare a liniei cu peste 50% și la o scădere a valorii reactanței homopolare a liniei cu până la 15%.

Din analiza prezentată, s-a putut observa, de asemenea, influența rezistivității electrice a solului asupra rezistenței și reactanței de secvență homopolară a liniei electrice. Astfel, dacă la o rezistivitate a solului de $100 \Omega m$, reactanța liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel, este $0,995 \Omega/km$, la o rezistivitate a solului de $500 \Omega m$, valoarea acesteia crește cu aproximativ 13%, fiind $1,125 \Omega/km$. Dacă conductorul de protecție este din *AL-OL*, atunci creșterea e de 8%. În ceea ce privește rezistența homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel, la o rezistivitate a solului de $100 \Omega m$ aceasta este de $0,158 \Omega/km$, iar la o rezistivitate a solului de $500 \Omega m$, aceasta este $0,167 \Omega/km$, adică o creștere de 5%.

În cazul liniei electrice aeriene cu dublu circuit, s-a arătat că impedanța de succesiune homopolară a fiecărui circuit se mărește (la trecerea curenților prin ambele circuite în aceeași direcție), datorită inducției mutuale dintre conductoarele circuitelor paralele. A fost pusă în evidență influența impedanței mutuale dintre cele două circuite ale liniei. Astfel, s-a arătat că impedanța mutuală de succesiune homopolară între două circuite de transport paralele, este influențată de distanța dintre circuite, de materialul, numărul și dispoziția conductoarelor de protecție.

Calculule efectuale au arătat faptul că prezența conductorului de protecție influențează și impedanța mutuală de secvență homopolară dintre circuitele de transport paralele. În cazul a două conductoare de protecție dintr-un material cu rezistivitate mică, reactanța mutuală de succesiune homopolară este aproximativ jumătate din valoarea ei în lipsa conductoarelor de

protecție. Cu conductoare de protecție, reactanța mutuală este 47% din reactanța proprie a fiecărui circuit; fără conductor de protecție, ea este aproximativ 60% din reactanța proprie.

În ceea ce privește distanța dintre cele două circuite ale liniei electrice, pentru distanțe uzuale între circuite de 10-20m, cantitativ, influența inducției mutuale datorată circuitului paralel, se manifestă prin creșterea reactanței cu peste 25% față de reactanța unui singur circuit. S-a arătat că valorile rezistenței și reactanței de succesiune homopolară ale liniei sunt mai mari în cazul în care se ține cont de cuplajul magnetic dintre cele două circuite. În ceea ce privește influența numărului de circuite al liniei asupra impedanțelor pe fază, se poate aprecia că valoarea reactanței unui circuit, în prezența celui de-al doilea circuit, crește cu 2-4%.

Referitor la numărul conductoarelor pe fază, în cazul conductoarelor fasciculare, reactanța liniei se reduce cu aproximativ 30%, în comparație cu cea a conductoarelor simple.

În ceea ce privește influența înălțimii conductoarelor față de suprafața solului, se observă că la aceeași valoare a rezistivității electrice a solului, rezistența de secvență homopolară a liniei electrice poate fi considerată ca fiind independentă de înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, curbele care exprimă dependența acesteia fiind aproximativ linii drepte orizontale. S-a arătat că rezistența de secvență homopolară a liniei electrice este independentă de distanța orizontală dintre conductoarele celor două circuite, iar în ceea ce privește valoarea reactanței de secvență homopolară, s-a arătat că aceasta depinde de distanța dintre conductoarele celor două circuite, deci reactanța mutuală dintre cele două circuite influențează valoarea reactanței homopolare a liniei.

Rezultatele obținute sunt în concordanță cu valorile prezentate în literatura de specialitate [4], [13], [101] etc.

CAP. 5 ESTIMAREA REPARTIȚIEI CURENTULUI DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT ÎN REȚELELE ELECTRICE TRIFAZATE DE ÎNALTĂ TENSIUNE

5.1 Considerații generale

Rețelele electrice de înaltă tensiune au realizată o legătură rigidă la pământ a punctului neutru al unuia, sau mai multor transformatoare. La aceste rețele, orice punere la pământ a unei faze, devine un scurtcircuit monofazat. Curentul de scurtcircuit monofazat se închide prin pământ, legăturile punctelor neutre ale transformatoarelor și autotransformatoarelor și faza cu defect. Pentru protecția liniilor electrice aeriene (LEA) ale acestor rețele împotriva supratensiunilor atmosferice, se folosesc conductoare de protecție legate la pământ. În aceste condiții, orice curent de descărcare pe un stâlp al unei linii electrice aeriene datorat unei puneri la pământ prin arc, se închide la pământ prin baza stâlpului defect, dar și prin conductoarele de protecție și prin ceilalți stâlpi. În acest fel, rezistența de punere la pământ, obținută prin punerea în paralel a prizelor stâlpilor ce participă la derivarea curentului de defect se micșorează și determină astfel micșorarea tensiunilor de atingere și se pas în apropierea stâlpului cu defect.

Determinarea curentului de scurtcircuit cu tehnica prezentată în capitolul 1 al acestei lucrări conduce la determinarea curentului la locul de scurtcircuit și nu a curenților prin elementele longitudinale de rețea, pentru determinarea acestora fiind necesară parcurgerea altei etape, care presupune determinarea repartiției curentului de defect, apelând la teoremele lui Kirchoff.

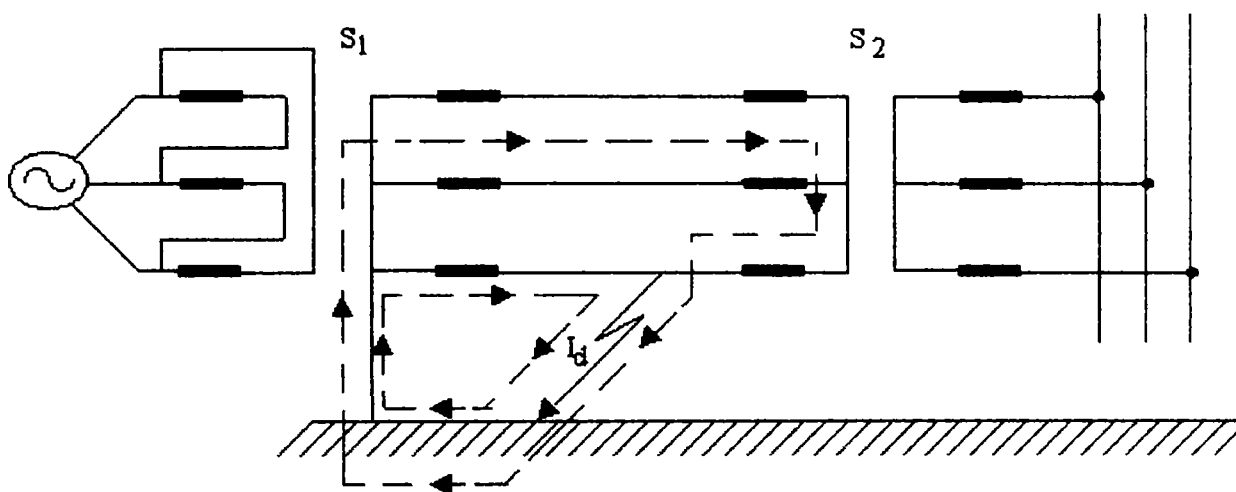
În acest capitol, considerându-se cunoscute valorile curenților la locul de defect, se determină distribuția acestora în rețeaua electrică. Se pot determina astfel valorile curenților în stâlpii liniei electrice, în porțiunile de conductor de protecție adiacente și valorile curenților care circulă prin legăturile la pământ ale neutrelor transformatoarelor și autotransformatoarelor din stațiile de la capetele liniei analizate.

În acest scop, se analizează două cazuri:

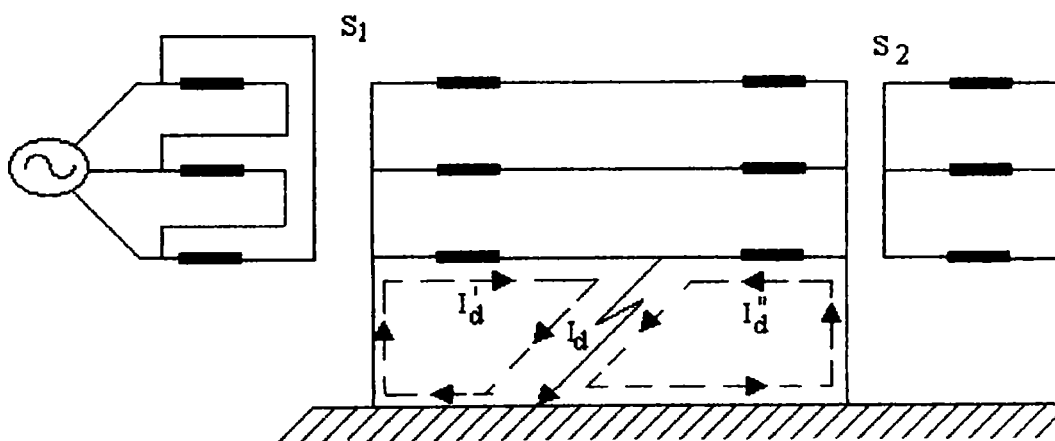
- se consideră mai întâi cazul din figura 5.1a), în care se prezintă o rețea trifazată cu neutrul legat direct la pământ. În figura 5.1, I_d reprezintă curentul de scurtcircuit. În situația în

care o fază este pusă la pământ, curentul de defect se închide prin neutrul legat la pământ. Acest caz este tratat în subcapitolul 5.2.

- se consideră apoi situația prezentată în figura 5.1b), analizată în subcapitolul 5.3. În această figură, I'_d și I''_d reprezintă curenții de scurtcircuit din stânga, respectiv din dreapta secțiunii cu defect.



a)



b)

Figura 5.1 Scurtcircuit monofazat în rețea cu neutrul legat la pământ

Un defect fază-pământ care apare pe o linie electrică aeriană, împarte linia respectivă în două porțiuni de linie – fiecare porțiune considerată de la locul de defect spre capetele liniei. Determinarea distribuției curentului de defect se face ținând cont de lungimea acestor porțiuni de linie, adică de distanța de la locul de defect până capetele liniei. În aceste condiții, se determină impedanța acestor porțiuni de linie în funcție de lungimea fiecăreia în parte și impedanța totală a liniei electrice aeriene determinată în funcție de impedanțele fiecărei porțiuni.

În cele ce urmează, se consideră un singur conductor de protecție, legat la pământ în dreptul fiecărui stâlp al liniei, prin intermediul prizei de pământ a stâlpului, neglijându-se: capacitățile conductoarelor față de pământ și capacitățile dintre conductoare, rezistențele de contact dintre stâlpi și conductoarele de protecție, rezistențele corespunzătoare ale stâlpilor pe porțiunile dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate. Se menționează că aceste ipoteze sunt unanim acceptate în literatura de specialitate [25], [31], [33], [37] etc. S-a considerat că rezistivitatea solului are valoare constantă.

5.2 Defect alimentat de la un capăt

În figura 5.2 se prezintă modul în care un conductor de protecție este legat la pământ în dreptul fiecărui stâlp prin intermediul impedanței de legare la pământ a stâlpului Z_{st} . Se presupune că toți stâlpii au aceeași impedanță Z_{st} și că sunt fixați la distanțe suficient de mari pentru a se exclude interacțiunea dintre prizele lor de pământ.

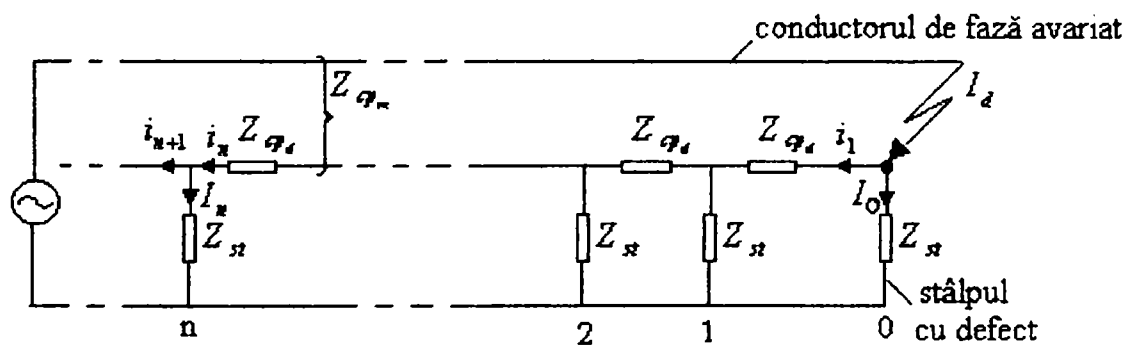


Figura 5.2 Defect la ultimul stâlp al liniei; repartizarea curentului de defect

Cu Z_{cp_d} s-a notat impedanța porțiunii de conductor de protecție, corespunzătoare unei deschideri. Se consideră că fiecare deschidere a conductorului de protecție are aceeași lungime l_d și că Z_{cp_d} e aceeași pentru fiecare deschidere: $Z_{cp_d} = Z_{cp} l_d$, unde Z_{cp} reprezintă impedanța longitudinală raportată la unitatea de lungime a conductorului de protecție. Cu Z_{cp_n} s-a notat impedanța mutuală dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate, corespunzătoare unei deschideri a conductorului de protecție.

În [80] este prezentat modul în care se poate determina distribuția curentului de defect între stâlpii unei linii electrice, atunci când defectul apare la ultimul stâlp al liniei, fără să se țină cont de existența cuplajului mutual dintre conductorul fazei avariate și conductorul de protecție. În continuare, pornind de la cele prezentate în [80] și [104], se determină distribuția

curentului de defect în condițiile în care se ține cont și de cuplajul mutual dintre conductorul fazei avariate și conductorul de protecție.

Curentul I_n , care se închide la pământ prin stâlpul al n -lea considerat de la stâlpul cu defect, este egal cu diferența dintre curenții i_n și i_{n+1} care circulă prin porțiunile adiacente ale conductorului de protecție.

$$I_n = i_n - i_{n+1} \quad (5.1)$$

Pentru orice circuit care cuprinde porțiunea n a conductorului de protecție și stâlpii de ordinele n și $(n-1)$ ai liniei, se poate scrie:

$$I_n Z_{st} - I_{n-1} Z_{st} + i_n Z_{cp_d} - \nu I_d Z_{cp_d} = 0 \quad (5.2)$$

- $\nu = \frac{Z_{cp_n}}{Z_{cp_d}}$, factorul de cuplaj dintre conductorul de protecție și conductorul de pe faza avariata;
- I_d , curentul de defect.

Ecuția (5.2) poate fi scrisă sub forma:

$$i_n = \frac{(I_{n-1} - I_n) Z_{st}}{Z_{cp_d}} + \nu I_d \quad (5.3)$$

Această ecuație e valabilă pentru porțiunea de ordinul n a conductorului de protecție.

Analog, pentru porțiunea de ordinul $(n+1)$, se poate scrie:

$$i_{n+1} = \frac{(I_n - I_{n+1}) Z_{st}}{Z_{cp_d}} + \nu I_d \quad (5.4)$$

Prin înlocuirea expresiilor (5.4) și (5.3) în ecuația (5.1), se obține pentru curentul din stâlpul cu defect următoarea ecuație liniară, cu diferențe finite, de ordinul al doilea:

$$I_n = \frac{(I_{n-1} - I_n) Z_{st}}{Z_{cp_d}} + \nu I_d - \frac{(I_n - I_{n+1}) Z_{st}}{Z_{cp_d}} - \nu I_d \quad (5.5)$$

sau:

$$I_n \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} = I_{n+1} - 2I_n + I_{n-1} \quad (5.6)$$

Așa cum se arată în [80], soluția ecuației (5.6) este de forma:

$$I_n = Ae^{\alpha n} + Be^{-\alpha n} \quad (5.7)$$

Apariția a două constante arbitrare A și B este datorată faptului că ecuația (5.6) cu diferențe finite conține, în partea dreaptă, a doua diferență a lui I_n și anume:

$$I_{n+1} - 2I_n - I_{n-1} = (I_{n+1} - I_n) - (I_n + I_{n-1}) = \Delta^2 I_n \quad (5.8)$$

Exponentul α poate fi determinat prin înlocuirea soluției (5.7) în ecuația (5.6). În acest scop, se înlocuiește n cu $(n+1)$, respectiv cu $(n-1)$, în relația (5.7):

$$I_{n+1} = Ae^{\alpha(n+1)} + Be^{-\alpha(n+1)} = Ae^{\alpha n} e^{\alpha} + Be^{-\alpha n} e^{-\alpha} \quad (5.9)$$

$$I_{n-1} = Ae^{\alpha(n-1)} + Be^{-\alpha(n-1)} = Ae^{\alpha n} e^{-\alpha} + Be^{-\alpha n} e^{\alpha} \quad (5.10)$$

Ecuația (5.6) devine:

$$(Ae^{\alpha n} + Be^{-\alpha n}) \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} = (Ae^{\alpha n} + Be^{-\alpha n})(e^{\alpha} + e^{-\alpha} - 2) \quad (5.11)$$

adică:

$$\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} = e^{\alpha} + e^{-\alpha} - 2 = (e^{\frac{\alpha}{2}} - e^{-\frac{\alpha}{2}})^2 = 2(\operatorname{sh} \frac{\alpha}{2})^2 \quad (5.12)$$

respectiv:

$$\operatorname{sh} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}} \quad (5.13)$$

Deoarece impedanța porțiunii de conductor de protecție dintre doi stâlpi este mult mai mică decât impedanța de legare la pământ a fiecărui stâlp, se poate scrie:

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}} \quad (5.14)$$

Conform soluției (5.7) în care apar constantele arbitrare A și B ce vor fi determinate ulterior, curentul care se închide la pământ prin stâlpii succesivi, variază cu distanța până la stâlpul cu defect, după o lege exponențială.

O relație similară se obține pentru curentul i din conductorul de protecție, prin aplicarea ecuației (5.1) stâlpului de ordinul $(n-1)$:

$$I_{n-1} = i_{n-1} - i_n \quad (5.15)$$

Prin introducerea expresiilor (5.1) și (5.15) în ecuația (5.2), se obține ecuația următoare în care apare un termen constant:

$$i_n \frac{Z_{cpd}}{Z_{st}} = i_{n+1} - 2i_n + i_{n-1} + vI_d \frac{Z_{cpd}}{Z_{st}} \quad (5.16)$$

Prin analogie cu ecuația (5.6), curentul din conductorul de protecție este dat de relația:

$$i_n = ae^{\alpha n} + be^{-\alpha n} + vI_d \quad (5.17)$$

a, b –constante arbitrare.

Deoarece curenții i_n și I_n sunt legați între ei prin ecuația (5.1), constantele A, B, a, b nu sunt independente.

Prin înlocuirea soluțiilor (5.7) și (5.17) în ecuația (5.1), se obține:

$$Ae^{\alpha n} + Be^{-\alpha n} = ae^{\alpha n}(1 - e^{-\alpha}) + be^{-\alpha n}(1 - e^{-\alpha}) \quad (5.18)$$

Deoarece aceste relații sunt valabile pentru orice valoare a lui n , se obțin relațiile:

$$A = a(1 - e^{-\alpha}) \quad (5.19)$$

$$B = b(1 - e^{-\alpha}) \quad (5.20)$$

Curentul în conductorul de protecție va fi deci:

$$i_n = A \frac{e^{\alpha n}}{1 - e^{-\alpha}} + B \frac{e^{-\alpha n}}{1 - e^{-\alpha}} + vI_d \quad (5.21)$$

Ecuațiile (5.7) și (5.17) conțin doar două constante arbitrare A și B , ale căror valori se determină din condițiile de la capetele liniei analizate.

Curentul de defect I_d se împarte în curentul care circulă prin stâlp I_0 și curentul în prima deschidere a conductorului de protecție i_1 :

$$I_d = I_0 + i_1 \quad (5.22)$$

Aceasta este condiția limită pentru $n = 0$.

Pe măsură ce distanța față de stâlpul cu defect crește, curentul scade. În cazul limită al unei linii de lungime mare, conform ecuațiilor (5.7) și (5.21), se poate scrie:

$$A = 0 \quad (5.23)$$

În acest caz, în expresiile curenților rămân doar termenii în care apare constanta B :

$$I_n = Be^{-\alpha n} \quad (5.24)$$

$$i_n = B \frac{e^{-\alpha n}}{1 - e^{-\alpha}} + \nu I_d \quad (5.25)$$

Prin înlocuirea acestor expresii în relația (5.22), punând condițiile $n = 0$ pentru I_n și $n = 1$ pentru i_n , se obține:

$$I_d = B + B \frac{e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha}} + \nu I_d = \frac{B}{1 - e^{-\alpha}} + \nu I_d \quad (5.26)$$

Rezultă pentru constanta B expresia:

$$B = (1 - \nu)(1 - e^{-\alpha})I_d = (1 - \nu)I_d \left[\frac{1 - th \frac{\alpha}{2}}{1 + th \frac{\alpha}{2}} \right] = (1 - \nu) \frac{2th \frac{\alpha}{2}}{1 + th \frac{\alpha}{2}} I_d \quad (5.27)$$

Pentru curentul în stâlpul cu defect, rezultă expresia:

$$I_0 = B = (1 - \nu)(1 - e^{-\alpha})I_d = (1 - \nu) \frac{2th \frac{\alpha}{2}}{1 + th \frac{\alpha}{2}} I_d \quad (5.28)$$

Pentru curentul din prima deschidere a conductorului de protecție, se obține:

$$i_1 = I_d - I_0 = I_d[e^{-\alpha} + \nu(1 - e^{-\alpha})] \quad (5.29)$$

Pentru calcule numerice este convenabil să se evite funcțiile transcendente. Ținând cont de relația (5.13), se poate scrie:

$$th \frac{\alpha}{2} = \frac{sh \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 + sh^2 \frac{\alpha}{2}}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}{1 + \frac{1}{4} \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}} \quad (5.30)$$

Căderea de tensiune pe stâlpul cu defect va fi:

$$U_0 = Z_{st} I_0 = Z_{st} (1 - \nu)(1 - e^{-\alpha}) I_d = (1 - \nu) \frac{2th \frac{\alpha}{2}}{1 + th \frac{\alpha}{2}} Z_{st} I_d = (1 - \nu) Z_{\infty} I_d \quad (5.31)$$

unde cu Z_{∞} s-a notat impedanța echivalentă a circuitului constituit din impedanțele tuturor stâlpilor, legați prin impedanțele conductoarelor de protecție, adică:

$$Z_{\infty} = \frac{2th \frac{\alpha}{2}}{1 + th \frac{\alpha}{2}} Z_{st} \quad (5.32)$$

Dacă se ține cont de relația (5.30), atunci Z_{∞} poate fi scrisă și sub forma:

$$Z_{\infty} = Z_{st} \frac{\sqrt{\frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}{1 + \frac{1}{4} \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}}}{1 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}{1 + \frac{1}{4} \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}}} \quad (5.33)$$

Dacă se ține cont că în general $Z_{cp_d} \ll Z_{st}$, atunci relația (5.33) mai poate fi scrisă sub forma:

$$Z_{\infty} = \sqrt{Z_{cp_d} Z_{st}} \quad (5.34)$$

Analiza precedentă a fost făcută fără să se țină cont de instalația de legare la pământ a stației electrice care închide circuitul (figura 5.3). În acest caz, doar o parte I'_d din curentul total de defect va circula prin impedanța Z_{∞} , restul se va închide la pământ prin instalația de legare la pământ a stației electrice.

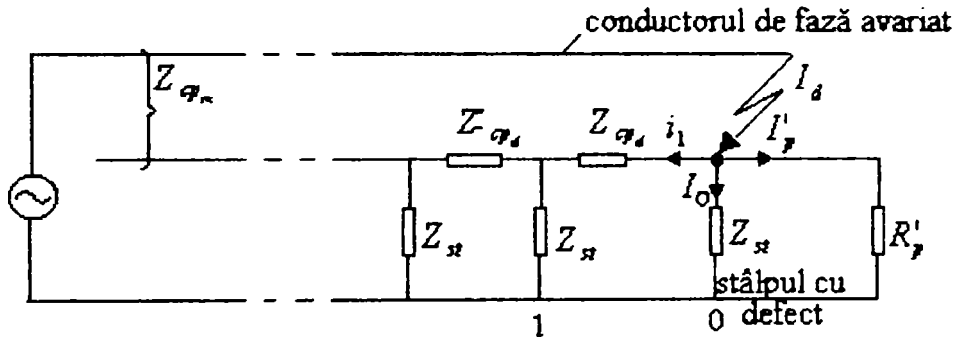


Figura 5.3 Repartiția curentului de defect

Dacă se notează cu R'_p rezistența instalației de legare la pământ a stației electrice și ținând cont de faptul că în expresiile de mai sus trebuie înlocuit I_d cu I'_d , atunci valoarea curentului prin stâlpul cu defect va fi:

$$I_0 = (1 - \nu)(1 - e^{-\alpha}) I'_d \quad (5.35)$$

Curentul prin instalația de legare la pământ a stației electrice, notat cu I'_p , va fi dat de relația:

$$I'_p = I_d \frac{Z_{\infty}}{R'_p + Z_{\infty}} \quad (5.36)$$

Dacă R'_p și Z_{∞} sunt cunoscute, atunci I'_p poate fi determinat din relația (5.36).

Curentul I'_d poate fi determinat din relația următoare:

$$I'_d = I_d - I'_p = I_0 + i_1 \quad (5.37)$$

Dacă trebuie să se țină cont și de faptul că între ultimul stâlp și instalația de legare la pământ a stației electrice legătura se realizează prin intermediul unei ultime deschideri a conductorului de protecție Z'_{cp_d} , atunci în locul lui R'_p în relațiile de mai sus apare $Z'_p = R'_p + Z'_{cp_d}$.

Se va determina în continuare distanța – în număr de stâlpi- la care curentul în stâlp scade la 1% din valoarea sa inițială, adică $I_n = \frac{1}{100} I_0$ ([80]). Din ecuația (5.24) rezultă:

$$Be^{-\alpha n} = \frac{1}{100} B \Rightarrow n = \frac{\ln 100}{\alpha} \approx 4,6 \sqrt{\frac{Z_{st}}{Z_{cp_d}}} \quad (5.38)$$

Se observă că lungimea porțiunii de linie în care curenții se distribuie între stâlpi, este direct proporțională cu rădăcina pătrată a raportului $\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}$. Pentru un raport $\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} = 0,03$, rezultă $n=26.5$, adică la al 26-lea stâlp de la locul defectului rezultă un curent de 1% din valoarea sa inițială.

Pe baza acestor considerații, se poate afla dacă linia poate fi considerată suficient de lungă pentru ca, pe baza relației care presupune constanta $A=0$, să poată fi reduși primii termeni ai ecuațiilor care dau expresiile curenților în stâlpi și în conductorul de protecție. Numărul de stâlpi trebuie să fie cel puțin egal cu cel determinat de relația (5.38), pentru a permite simplificările efectuate.

Dacă linia nu poate fi considerată de lungime suficient de mare pentru a putea considera constanta $A = 0$, atunci constantele arbitrare A și B se determină din condițiile de la capetele liniei analizate. S-au notat cu R_p , respectiv R'_p , rezistențele instalațiilor de legare la pământ ale stațiilor de la capetele liniei. Se consideră că legătura de la ultimii stâlpi la stații - la fiecare din capete - se realizează prin intermediul unei porțiuni de conductor de impedanță Z'_{cp_d} și s-a notat $Z'_p = R'_p + Z'_{cp_d}$.

Pentru capătul liniei unde apare defectul, se poate scrie (figura 5.4):

$$I_d = I'_p + I_0 + i_1 = i_1 + I_0 + I_0 \frac{Z_{st}}{Z'_p} \quad (5.39)$$

Pentru capătul dinspre sursa de alimentare, se poate scrie:

$$I_d = I_p + i_{N+1} \quad (5.40)$$

$$I_N Z_{st} + I_p R_p - i_{N+1} Z'_{cp_d} + \nu I_d Z'_{cp_d} = 0 \quad (5.41)$$

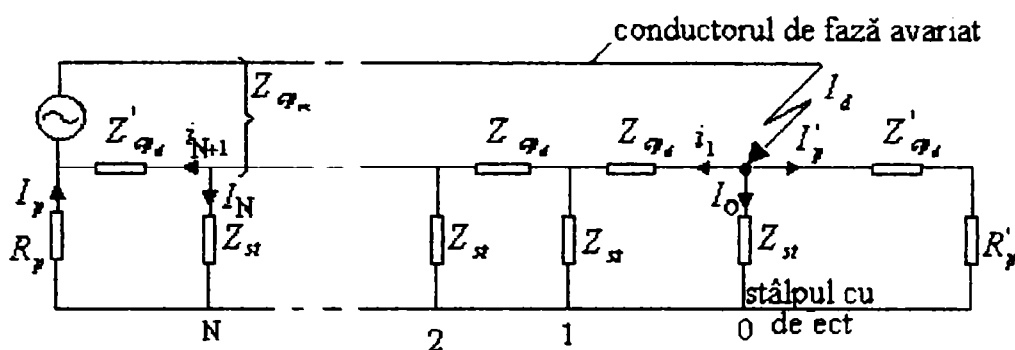


Figura 5.4 Repartiția curentului de defect

Înlocuind pe I_p din relația (5.41) în relația (5.40), se obține:

$$I_d(1 + \nu \frac{Z'_{cp_d}}{R_p}) = i_{N+1}(1 + \frac{Z'_{cp_d}}{R_p}) - I_N \frac{Z_{st}}{R_p} \quad (5.42)$$

În relațiile (5.39) și (5.40), se înlocuiesc I_0 , I_N , i_{N+1} și i_1 din soluțiile (5.7) și (5.21), ținând cont de relațiile (5.19) și (5.20). Rezultă astfel un sistem de două ecuații cu două necunoscute, constantele a și b :

$$\begin{cases} I_d(1 - \nu) = a \left[1 + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{Z'_p} \right] + b \left[1 + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{Z'_p} \right] \\ I_d(1 - \nu) = a e^{\alpha N} \left[e^{\alpha} \left(1 + \frac{Z'_{cp_d}}{R_p} \right) - (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p} \right] + b e^{-\alpha N} \left[e^{-\alpha} \left(1 + \frac{Z'_{cp_d}}{R_p} \right) - (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p} \right] \end{cases} \quad (5.43)$$

Soluțiile acestui sistem de ecuații sunt:

$$\begin{cases} a = I_d(1 - \nu) \frac{b_2 - b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} \\ b = I_d(1 - \nu) \frac{a_1 - a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} \end{cases} \quad (5.44)$$

sau, ținând cont de relațiile (5.19) și (5.20):

$$\begin{cases} A = I_d(1-\nu) \frac{b_2 - b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^{-\alpha}) \\ B = I_d(1-\nu) \frac{a_1 - a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^{-\alpha}) \end{cases} \quad (5.45)$$

unde cu a_1, b_1, a_2, b_2 s-au notat:

$$a_1 = 1 + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{Z_p}$$

$$b_1 = 1 + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{Z_p}$$

$$a_2 = e^{\alpha N} \left[e^{\alpha} \left(1 + \frac{Z_{cpd}}{R_p} \right) + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p} \right]$$

$$b_2 = e^{-\alpha N} \left[e^{-\alpha} \left(1 + \frac{Z_{cpd}}{R_p} \right) + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p} \right]$$

Dacă se neglijează impedanțele ultimelor deschideri ale conductorului de protecție Z_{cpd} , atunci pentru constantele A, B respectiv a, b se obțin aceleași expresii, dar a_1, b_1, a_2, b_2 vor avea următoarele expresii:

$$a_1 = 1 + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p}$$

$$b_1 = 1 + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p}$$

$$a_2 = e^{\alpha N} \left[e^{\alpha} + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p} \right]$$

$$b_2 = e^{-\alpha N} \left[e^{-\alpha} + (1 - e^{-\alpha}) \frac{Z_{st}}{R_p} \right]$$

Rezultă pentru curentul în stâlpul cu defect expresia (obținută punând condiția $n = 0$, inclusiv în expresiile coeficienților a_2, b_2):

$$I_0 = A + B = I_d(1-\nu) \left(\frac{b_2 - b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^{-\alpha}) + \frac{a_1 - a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^{-\alpha}) \right) \quad (5.46)$$

Pentru căderea de tensiune pe stâlpul cu defect U_0 , se obține relația:

$$U_0 = I_0 Z_{st} = I_d (1 - \nu) Z_{st} \left(\frac{b_2 - b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^\alpha) + \frac{a_1 - a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^{-\alpha}) \right) = (1 - \nu) I_d Z_N \quad (5.47)$$

S-a notat cu Z_N impedanța echivalentă a circuitului în această situație, adică:

$$Z_N = Z_{st} \left(\frac{b_2 - b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^\alpha) + \frac{a_1 - a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} (1 - e^{-\alpha}) \right) \quad (5.48)$$

În continuare, se determină expresia impedanței echivalente a circuitului, în cazul în care defectul apare la un stâlp oarecare al liniei electrice. În acest caz, defectul împarte linia electrică în două porțiuni de linie, considerate de la locul de defect spre capetele liniei. Impedanța echivalentă a circuitului, "văzută" dinspre locul de defect, poate fi determinată din punerea în paralel a impedanțelor circuitelor corespunzătoare celor două porțiuni de linie.

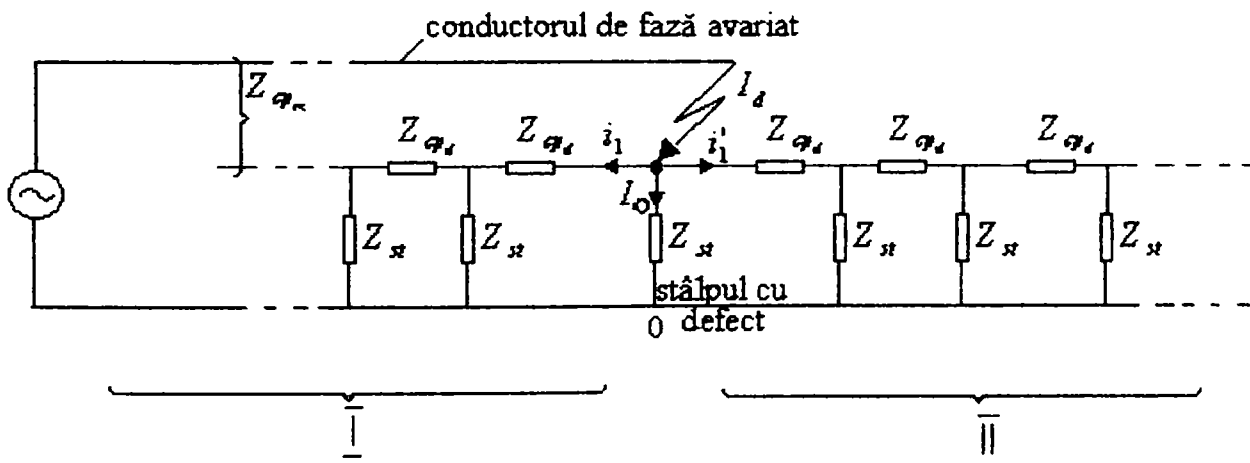


Figura 5.5 Defect la un stâlp oarecare al liniei

Dacă pentru circuitul din figura 5.5 se consideră că ambele porțiuni de linie, notate cu I și II , de la locul de defect spre capetele liniei, pot fi considerate de lungimi mari, adică satisfac relația (5.38), atunci pentru căderea de tensiune pe stâlpul cu defect se poate scrie:

$$U_0 = (1 - \nu) I_d Z_{\infty} \quad (5.49)$$

unde:

$$\frac{1}{Z_{\infty}} = \frac{1}{Z'_{\infty}} + \frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z'_{\infty}} \text{ sau } Z_{\infty} = \frac{2Z_{st}Z'_{\infty}}{2Z_{st} + Z'_{\infty}} \quad (5.50)$$

Cu Z_{∞} s-a notat impedanța echivalentă a întregului circuit, iar Z'_{∞} se determină din relația (5.33), ținând cont că Z_{∞} poate fi scrisă sub forma:

$$Z_{\infty} = \frac{Z_{st}Z'_{\infty}}{Z_{st} + Z'_{\infty}} \Rightarrow Z'_{\infty} = \frac{Z_{st}Z_{\infty}}{Z_{st} - Z_{\infty}} \quad (5.51)$$

Dacă o porțiune de linie de la locul de defect până la capătul liniei poate fi considerată de lungime mare, atunci se poate aplica pentru determinarea impedanței echivalente a circuitului, care este impedanța lanțului de cuadripoli “văzută” dinspre locul de defect și teoria fracțiilor continue.

Pentru circuitul din figura 5.6, impedanța echivalentă a acestui circuit, “văzută” dinspre punctul de defect, pentru porțiunea de circuit dinspre partea opusă sursei de alimentare, este dată de următoarea fracție continuă [32]:

$$Z_{1\infty} = Z_{cp_d} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_{cp_d} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_{cp_d} + \dots + Z_{cp_d} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_{cp_d} + Z_{st}}}}}}} \quad (5.52)$$

Dacă fracția continuă se limitează la 2 termeni, expresia care rămâne la numitor este iarăși egală cu însăși fracția continuă; în consecință, rezultă următoarea ecuație recurentă:

$$Z_{1\infty} = Z_{cp_d} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_{1\infty}}} \quad (5.53)$$

Din relația (5.53), rezultă următoarea ecuație de gradul II:

$$Z_{1\infty}^2 - Z_{cp_d}Z_{1\infty} - Z_{cp_d}Z_{st} = 0 \quad (5.54)$$

cu soluțiile:

$$Z_{1\infty} = \frac{Z_{cp_d}}{2} \pm \sqrt{Z_{cp_d} Z_{st} + \frac{Z_{cp_d}^2}{4}} \quad (5.55)$$

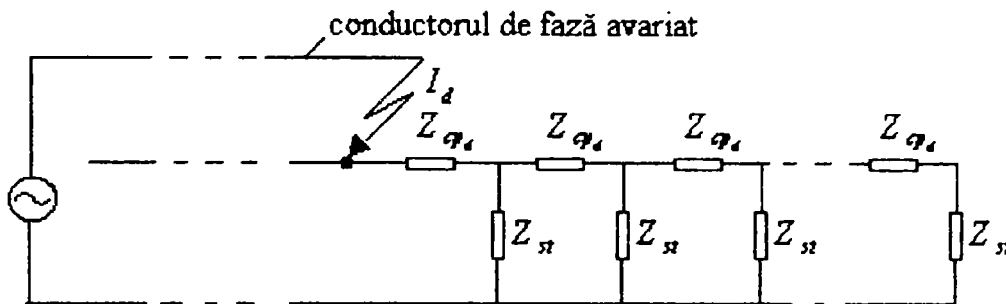


Figura 5.6 Schema echivalentă a porțiunii de linie cuprinsă între locul de defect și capătul dinspre partea opusă sursei

Fracția continuă din ecuația (5.52), converge spre o valoare limită care corespunde semnelui pozitiv dinaintea radicalului din relația (5.55) dacă, conform teoremei lui van Vleck și Jensen, sunt îndeplinite condițiile [13]:

$$\operatorname{Re}(Z_{cp_d}) > 0, \operatorname{Re}(Z_{st}) > 0, |\operatorname{Im}\{Z_{cp_d}\}| < \infty, |\operatorname{Im}\{Z_{st}\}| < \infty \quad (5.56)$$

Fracția continuă infinită corespunzătoare relației (5.52) va fi:

$$Z_{1\infty} = \frac{Z_{cp_d}}{2} + \sqrt{Z_{cp_d} Z_{st} + \frac{Z_{cp_d}^2}{4}} \quad (5.57)$$

Ținând cont că în majoritatea cazurilor $Z_{cp_d} \ll Z_{st}$, relația (5.57) mai poate fi scrisă sub forma:

$$Z_{1\infty} \approx \frac{Z_{cp_d}}{2} + \sqrt{Z_{cp_d} Z_{st}} \quad (5.58)$$

Pentru determinarea impedanței porțiunii de linie de lungime mare, se pot aplica și ecuațiile diferențiale care caracterizează liniile electrice lungi ([3], [33], [88]). În acest caz, parametrii care descriu linia sunt $Z'_{cp} = \frac{Z_{cp_d}}{l_d}$ și $Y'_{st} = \frac{1}{Z_{st}}$, unde $Z'_{st} = Z_{st} l_d$. În aceste

expresii, Z'_{cp} și Z'_{st} reprezintă parametri raportați la unitatea de lungime. Se consideră că parametrii sunt constanți în lungul liniei, adică linia electrică este o linie omogenă.

Se pornește de la ecuațiile de ordinul II ale liniilor electrice lungi [88]:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dx^2} = Z'_{cp} Y'_{st} U \\ \frac{d^2 I}{dx^2} = Z'_{cp} Y'_{st} I \end{cases} \quad (5.59)$$

cu soluțiile:

$$\begin{cases} U = C_1 e^{-\gamma x} + C_2 e^{\gamma x} \\ I = -\frac{1}{Z_c} (C_1 e^{-\gamma x} - C_2 e^{\gamma x}) \end{cases} \quad (5.60)$$

în care Z_c reprezintă impedanța caracteristică a liniei, γ reprezintă constanta de propagare a liniei, C_1, C_2 constante ce se determină din condițiile de la capetele liniei analizate, iar distanța x considerată de la sfârșitul liniei.

Tensiunea și curentul la distanța x de capătul liniei (distanța x considerată de la sfârșitul liniei), se pot exprima în funcție de tensiunea și curentul de la sfârșitul porțiunii de linie analizată. Din relațiile (5.60) se pot determina constantele C_1 și C_2 dacă se introduc $x=0$, $U = U_2$ și $I = I_2$, astfel încât pentru tensiunea și curentul la distanța x , se obțin relațiile:

$$\begin{cases} U = U_2 ch(\gamma x) + I_2 Z_c sh(\gamma x) \\ I = U_2 \frac{1}{Z_c} sh(\gamma x) + I_2 ch(\gamma x) \end{cases} \quad (5.61)$$

Dacă în ecuațiile (5.61) se introduc $x=l$, respectiv $x=0$, unde l reprezintă lungimea porțiunii de linie analizată, se obțin ecuațiile cuadripolare ale linie de lungime l , considerată în întregime ca un cuadripol diport, având mărimile de intrare U_1, I_1 și mărimile de ieșire U_2, I_2 :

$$\begin{cases} U_1 = U_2 ch(\gamma l) + I_2 Z_c sh(\gamma l) \\ I_1 = U_2 \frac{1}{Z_c} sh(\gamma l) + I_2 ch(\gamma l) \end{cases} \quad (5.62)$$

Dacă $I_2 = 0$, atunci din relațiile (5.62) rezultă:

$$\frac{U_1}{I_1} = Z_c \operatorname{cth}(\gamma l) \quad (5.63)$$

Dacă linia e de lungime mare, astfel încât poate fi considerată de lungime infinită, atunci:

$$\frac{U_1}{I_1} = Z_c \quad (5.64)$$

Porțiunea de linie considerată, e caracterizată de impedanța caracteristică:

$$Z_c = \sqrt{Z'_{cp} Z'_{st}} \quad (5.65)$$

Considerând că $\sqrt{Z'_{cp} Z'_{st}} = \sqrt{Z'_{cp} l_d \frac{Z'_{st}}{l_d}} = \sqrt{Z'_{cp} Z'_{st}}$, relația (5.65) se aseamănă cu relația (5.58), diferența fiind termenul $\frac{Z'_{cp} l_d}{2}$.

Pentru ca porțiunea de linie, considerată de lungime mare, caracterizată prin parametri concentrați, să aibă aceeași impedanță atunci cînd e descrisă cu ajutorul parametrilor repartizați, trebuie introdus un factor de corecție astfel încât relația (5.57) să poată fi scrisă sub forma [33]:

$$Z_{1\infty} = \lambda_\infty Z'_{cp} + Z_c \quad (5.66)$$

Valorile exacte ale factorului de corecție λ_∞ se pot obține comparând relația (5.66) cu relația (5.57), dar ținînd cont de relația (5.58), se poate observa că λ_∞ e apropiat de 0.5.

Impedanța porțiunii de linie considerată de lungime mare (referitor la relația (5.38)), cuprinsă între locul de defect și un capăt al liniei, poate fi calculată cu oricare din relațiile (5.33), (5.57) sau (5.66).

Dacă se consideră circuitul din figura 5.7, în care ambele porțiuni de linie de la locul de defect spre capetele liniei au un număr de stâlpi mai mic decît cel determinat din relația (5.38), și defectul e alimentat dintr-o singură direcție, atunci pentru căderea de tensiune pe stîlpul defect și pentru impedanța echivalentă a circuitului, pot fi scrise următoarele expresii:

$$U_0 = (1 - \nu) I_d Z_{NM} \quad (5.67)$$

$$Z_{NM} = \frac{1}{\frac{1}{Z_N} + \frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_M}} \quad (5.68)$$

în care:

- Z_N reprezintă impedanța porțiunii de linie, prevăzută cu N stâlpi, de la locul de defect spre capătul-sursă al liniei;
- Z_M reprezintă impedanța porțiunii de linie, prevăzută cu M stâlpi, de la locul de defect spre celălalt capăt al liniei.

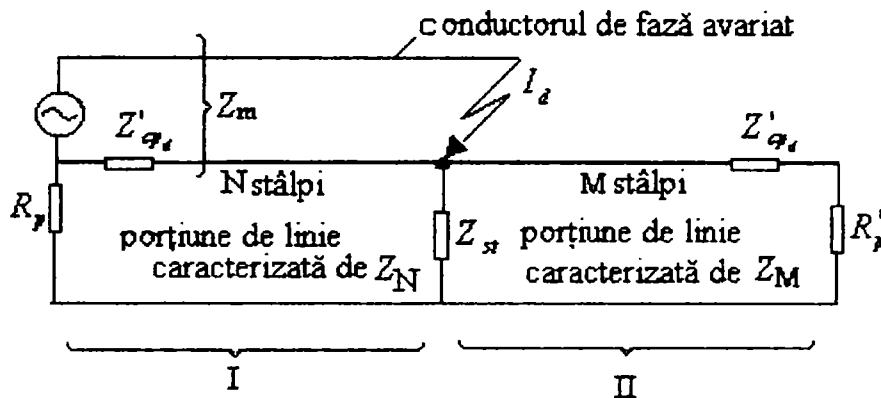


Figura 5.7 Determinarea impedanței liniei, în funcție de impedanțele celor două porțiuni de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei

Cele două impedanțe Z_N și Z_M , pot fi determinate din ecuațiile cuadripolare ale liniilor electrice lungi, ținând cont de condițiile de la capetele porțiunii de linie considerată, așa cum se arată în [33].

Se pleacă de la relația (5.63), care reprezintă impedanța unei porțiuni de linie în regim de mers în gol ($I_2 = 0$). Dacă se preferă parametri corespunzători unei deschideri a conductorului de protecție, această relație poate fi scrisă sub forma:

$$Z_{N0} = Z_c \operatorname{cth}(\gamma l) = Z_c \operatorname{cth}\left(l \sqrt{\frac{Z'_{cpd}}{Z'_{st}}}\right) = Z_c \operatorname{cth}(N\sqrt{K}) \quad (5.69)$$

unde $K = \frac{Z'_{cpd}}{Z'_{st}}$ și $l \sqrt{\frac{Z'_{cpd}}{Z'_{st}}} = \frac{l}{l_d} \sqrt{\frac{Z'_{cpd}}{Z'_{st}}} = N \sqrt{\frac{Z'_{cpd}}{Z'_{st}}} = N\sqrt{K}$; $N = \frac{l}{l_d}$ reprezintă numărul de stâlpi din porțiunea de linie considerată.

Ținând cont de cele prezentate mai sus, impedanța dată de relația (5.69) trebuie completată, analog cu relația (5.66), cu un termen suplimentar astfel încât:

$$Z_N = \lambda_N Z_{cp_d} + Z_{N0} \quad (5.70)$$

Valorile exacte ale lui λ_N se pot obține comparând relația (5.70) cu valorile impedanței Z_N obținute cu metodele cunoscute. În [33] se arată că $\lambda_N \approx \frac{1}{2}$.

În situația în care porțiunea de linie considerată nu este în gol, sau nu poate fi considerată de lungime mare, trebuie să se țină cont și de impedanța de sarcină conectată la sfârșitul liniei.

Dacă se consideră mai întâi porțiunea II de linie (fig. 5.7), impedanța care închide circuitul în acest caz este R'_p - rezistența instalației de legare la pământ a stației electrice; dacă se ține cont și de impedanța porțiunii conductor de protecție care face legătura de la ultimul stâlp la instalația de legare la pământ a stației notată cu Z'_{cp_d} , atunci impedanța de sarcină conectată este $Z'_p = R'_p + Z'_{cp_d}$.

În acest caz, rezolvând ecuațiile diferențiale ale liniilor electrice lungi și ținând cont de condițiile de la capetele porțiunii de linie analizată, se obține pentru impedanța porțiunii de linie analizată, următoarea expresie ([33]):

$$Z_M = \frac{1}{2} Z_{cp_d} + Z_c \frac{Z'_p \operatorname{ch} \gamma l + Z_c \operatorname{sh} \gamma l}{Z'_p \operatorname{sh} \gamma l + Z_c \operatorname{ch} \gamma l} \quad (5.71)$$

Dacă se preferă parametri corespunzători unei deschideri a conductorului de protecție, atunci relația (5.71) poate fi scrisă în acest caz sub forma ([33]):

$$Z_M = \frac{1}{2} Z_{cp_d} + Z_c \frac{Z'_p \operatorname{ch}(M\sqrt{K}) + Z_c \operatorname{sh}(M\sqrt{K})}{Z'_p \operatorname{sh}(M\sqrt{K}) + Z_c \operatorname{ch}(M\sqrt{K})} \quad (5.72)$$

Pentru impedanța Z_N a porțiunii I de linie dinspre capătul-sursă al liniei, pe baza condițiilor de la capetele porțiunii de linie, se obține următoarea expresie ([33]):

$$Z_N = \frac{Z_{cp_d}}{2} + Z_c \frac{Z_p \operatorname{ch} \gamma l - R_p + Z_c \operatorname{sh} \gamma l}{Z_p \operatorname{sh} \gamma l + Z_c \operatorname{ch} \gamma l} \quad (5.73)$$

Dacă se preferă parametrii corespunzători unei deschideri a conductorului de protecție, atunci relația (5.73) poate fi scrisă sub forma ([33]):

$$Z_N = \frac{Z_{cp_d}}{2} + Z_c \frac{Z_p \operatorname{ch}(N\sqrt{K}) - R_p + Z_c \operatorname{sh}(N\sqrt{K})}{Z_p \operatorname{sh}(N\sqrt{K}) + Z_c \operatorname{ch}(N\sqrt{K})} \quad (5.74)$$

- $Z_p = Z'_{cp_d} + R_p$ reprezintă suma dintre rezistența instalației de legare la pământ a stației electrice de la capătul-sursă și impedanța unei ultime deschideri a conductorului de protecție – de la ultimul stâlp la instalația de legare la pământ a stației.

Dacă se consideră circuitul din figura 5.8, în care porțiunea II de linie – de la locul de defect spre capătul liniei, în sens opus sensului de alimentare - nu poate fi considerată de lungime mare, atunci căderea de tensiune pe stâlpul cu defect va avea expresia:

$$U_0 = (1 - \nu) I_d Z_{\infty M} \quad (5.75)$$

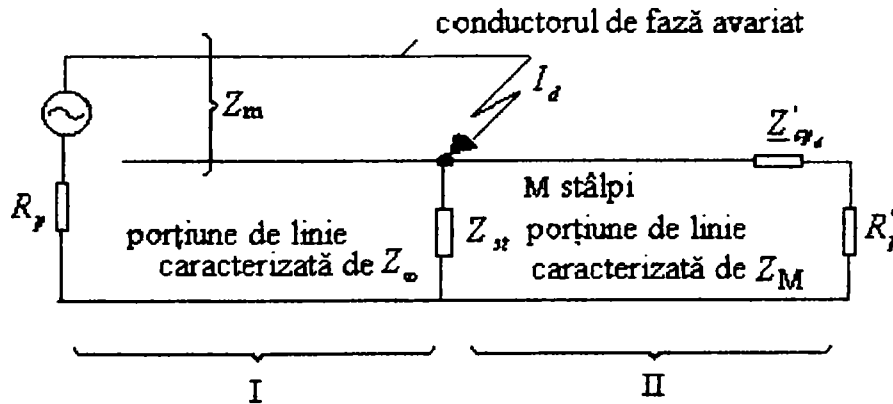


Figura 5.8 Determinarea impedanței liniei, în funcție de impedanțele celor două porțiuni de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei

Impedanța echivalentă a acestui circuit, notată cu $Z_{\infty M}$, va avea expresia:

$$Z_{\infty M} = \frac{1}{\frac{1}{Z_\infty} + \frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_M}} \quad (5.76)$$

- Z'_∞ se obține din relația (5.33), ținând cont că Z_∞ poate fi scrisă sub

$$\text{forma: } Z_\infty = \frac{Z_{st} Z'_\infty}{Z_{st} + Z'_\infty}.$$

- Impedanța porțiunii de linie de lungime mică Z_M , se poate determina cu relația (5.72).

Impedanța echivalentă a circuitului în cazul prezentat în figura 5.9, notată cu $Z_{N\infty}$, este dată de relația:

$$Z_{N\infty} = \frac{1}{\frac{1}{Z_N} + \frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z'_\infty}} \quad (5.77)$$

Z_N în relația (5.77) este dată de relația (5.74), iar Z'_∞ se obține din relația (5.51), ținând cont

că Z_∞ poate fi scrisă sub forma: $Z_\infty = \frac{Z_{st} Z'_\infty}{Z_{st} + Z'_\infty}$.

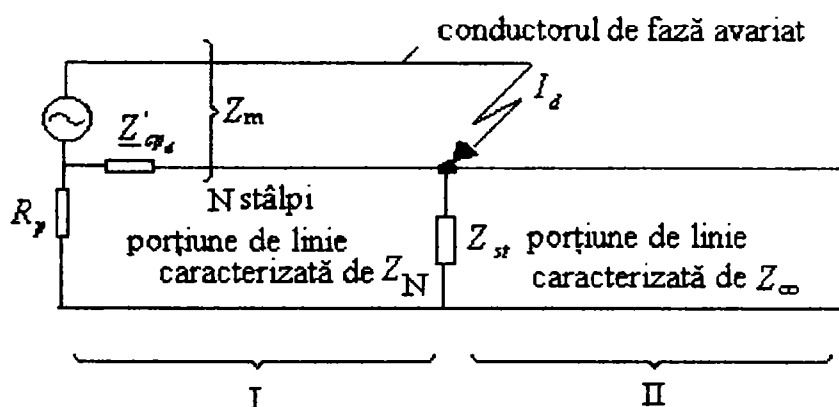


Figura 5.9 Determinarea impedanței liniei, în funcție de impedanțele celor două porțiuni de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei

5.3 Defect alimentat de la ambele capete

În cazul în care defectul este alimentat din ambele părți și distanțele de la locul de defect spre capetele liniei nu satisfac relația (5.38), trebuie să se țină cont de stațiile de la capetele liniei analizate. Situația este prezentată în figura 5.10. Într-o abordare similară cu cea de la punctul 5.2 și ținând cont de cele prezentate în [25], în continuare se dezvoltă modelul matematic care permite determinarea distribuției curentului de defect pentru această situație.

S-a presupus că defectul apare la stâlpul 0. S-a presupus că sunt $(N-1)$ stâlpi cuprinși între stâlpul cu defect și capătul din stânga al liniei și $(M-1)$ stâlpi cuprinși între stâlpul cu defect și celălalt capăt al liniei. Rezistențele instalațiilor de legare la pământ ale stațiilor de la

capetele liniei s-au notat cu R_p și cu R'_p . S-au notat cu Z'_{cp_n} impedanțele porțiunilor de conductor de protecție de la ultimul stâlp până la stația electrică.

Ca și la punctul 5.2 și în această situație, curentul I_n care se scurge la pământ prin stâlpul al n -lea considerat de la stâlpul cu defect, este egal cu diferența dintre curenții i_n și i_{n+1} care circulă prin porțiunile adiacente ale conductorului de protecție.

$$I_n = i_n - i_{n+1} \quad (5.78)$$

O relație similară poate fi scrisă pentru stâlpul de ordinul $(n-1)$:

$$I_{n-1} = i_{n-1} - i_n \quad (5.79)$$

Pentru orice circuit de ordinul n (figura 5.10), care cuprinde porțiunea n a conductorului de protecție și stâlpii de ordinele n și $(n-1)$ ai liniei, se poate scrie:

$$I_n Z_{st} - I_{n-1} Z_{st} + i_n Z_{cp_n} - v I'_d Z_{cp_n} = 0 \quad (5.80)$$

- $v = \frac{Z_{cp_n}}{Z_{cp_d}}$ reprezintă factorul de cuplaj dintre conductorul de protecție și conductorul de pe faza avariată;
- I'_d reprezintă curentul de defect.

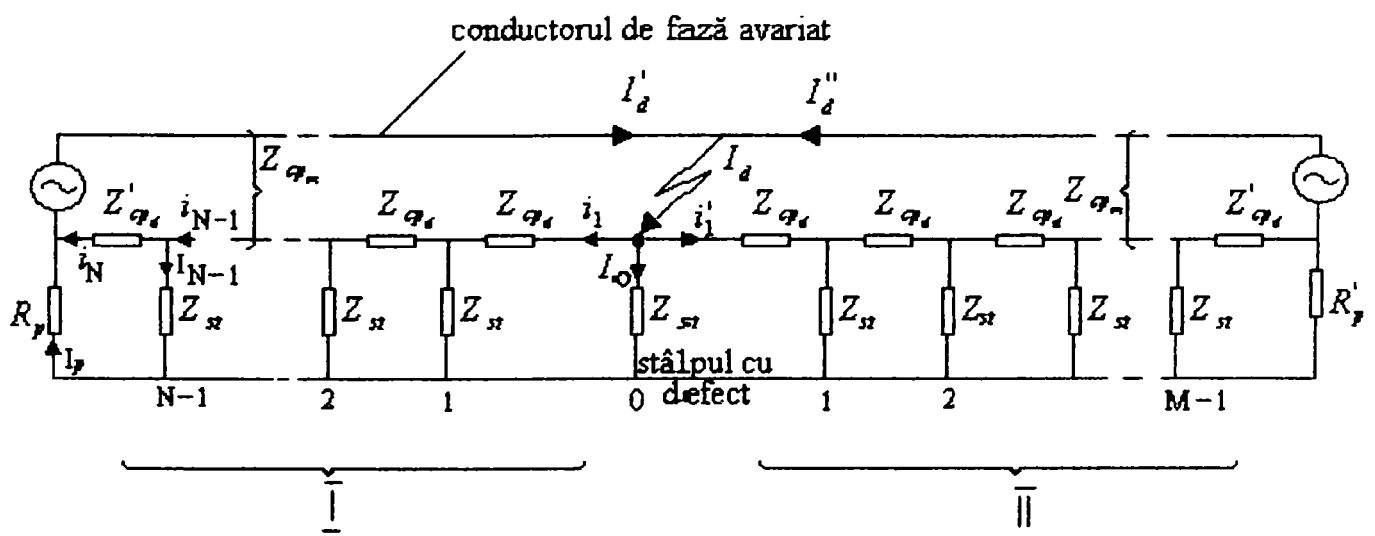


Figura 5.10 Repartiția curentului de defect

O relație similară cu relația (5.80) poate fi scrisă pentru porțiunea de ordinul $(n+1)$ a circuitului:

$$I_{n+1}Z_{st} - I_n Z_{st} + i_{n+1}Z_{cp_d} - \nu l'_d Z_{cp_d} = 0 \quad (5.81)$$

Prin înlocuirea expresiilor curenților i_n și i_{n+1} din relațiile (5.80) și (5.81) în ecuația (5.78), se obține pentru curentul din stâlpul cu defect, o ecuație liniară cu diferențe finite de ordinul al doilea $I_n \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} = I_{n+1} - 2I_n + I_{n-1}$, identică formal cu ecuația (5.6), a cărei soluție este deci de forma (5.7):

$$I_{n-s} = A_s e^{\alpha n} + B_s e^{-\alpha n} \quad (5.82)$$

- I_{n-s} este curentul în stâlpul de ordinul n , considerat de la locul de defect până la capătul din partea stângă (figura 5.10); indicele s se referă la capătul din partea stângă al liniei;
- A_s, B_s -constante arbitrare ce se determină din condițiile de la capetele liniei analizate;
- $sh \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}}$.

Prin introducerea expresiilor (5.78) și (5.79) în ecuația (5.80), se obține de asemenea, o ecuație liniară cu diferențe finite de ordinul al doilea, în care apare un termen constant $i_n \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} + 2i_n - i_{n+1} - i_{n-1} = \nu l'_d \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}$, identică formal cu relația (5.16), a cărei soluție este deci similară soluției (5.17):

$$i_{n-s} = a_s e^{\alpha n} + b_s e^{-\alpha n} + \mu l'_d \quad (5.83)$$

- i_{n-s} este curentul în conductorul de protecție de la locul de defect până la capătul din partea stângă (figura 5.10); indicele s se referă la capătul din partea stângă al liniei;
- a_s, b_s -constante arbitrare ce se determină din condițiile de la capetele liniei analizate.

Deoarece curenții I_{n-s} și i_{n-s} sunt legați între ei prin ecuația (5.78), constantele arbitrare A_s, B_s, a_s, b_s nu sunt independente, ci sunt legate între ele prin relații similare cu relațiile (5.19) și (5.20).

Pentru a determina constantele arbitrare A_s, B_s sau a_s, b_s , pentru stâlpul cu defect se poate scrie:

$$\begin{cases} I_0 Z_{st} - I_1 Z_{st} - i_1 Z_{cp_d} + v Z_{cp_d} I'_d = 0 \\ I_1 Z_{st} - I_2 Z_{st} - i_2 Z_{cp_d} + v Z_{cp_d} I'_d = 0 \end{cases} \quad (5.84)$$

De asemenea, poate fi scrisă relația:

$$I_1 = i_1 - i_2 \quad (5.85)$$

Relațiile (5.84) și (5.85), pot fi scrise sub forma:

$$i_1 = \frac{I_0 Z_{st} - I_1 Z_{st} + v Z_{cp_d} I'_d}{Z_{cp_d}} = \frac{U_0 - U_1}{Z_{cp_d}} + v I'_d \quad (5.86)$$

$$i_2 = \frac{I_1 Z_{st} - I_2 Z_{st} + v Z_{cp_d} I'_d}{Z_{cp_d}} = \frac{U_1 - U_2}{Z_{cp_d}} + v I'_d \quad (5.87)$$

Prin înlocuirea expresiilor (5.86) și (5.87) în (5.85), se obține:

$$I_1 = \frac{U_0 - U_1}{Z_{cp_d}} - \frac{U_1 - U_2}{Z_{cp_d}} \quad (5.88)$$

Ținând cont că $U_0 = I_0 Z_{st}$ și că $I_1 = \frac{U_1}{Z_{st}}$, relația (5.88) poate fi scrisă și sub forma:

$$U_0 = I_0 Z_{st} = -U_2 + \left(2 + \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}\right) U_1 \quad (5.89)$$

Pentru capătul din partea stângă a liniei (figura 5.10), se pot scrie ecuațiile:

$$I_{N-1} + i_N = i_{N-1} \quad (5.90)$$

$$I_{N-1} Z_{st} + I_p R_p - i_N Z'_{cp_d} + Z'_m I'_d = 0 \quad (5.91)$$

$$I_{N-2} Z_{st} - I_{N-1} Z_{st} - i_{N-1} Z_{cp_d} + v Z_{cp_d} I'_d = 0 \quad (5.92)$$

unde Z'_m reprezintă impedanța mutuală dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate, corespunzătoare ultimei deschideri a conductorului de protecție, de impedanță Z'_{cp_d} .

Ecuțiile (5.91) și (5.92), se pot scrie sub forma:

$$i_N = \frac{I_{N-1}Z_{st} + I_p R_p + Z'_m I'_d}{Z'_{cp_d}} = \frac{U_{N-1} + U_p + Z'_m I'_d}{Z'_{cp_d}} \quad (5.93)$$

$$i_{N-1} = \frac{I_{N-2}Z_{st} - I_{N-1}Z_{st} + vZ'_{cp_d} I'_d}{Z'_{cp_d}} = \frac{U_{N-2} - U_{N-1} + vI'_d}{Z'_{cp_d}} \quad (5.94)$$

În relația (5.93) s-a notat $U_p = I_p R_p$.

Prin înlocuirea expresiilor (5.93) și (5.94) în (5.90), se obține:

$$I_{N-1} = \frac{U_{N-2} - U_{N-1}}{Z'_{cp_d}} - \frac{U_{N-1} + U_p}{Z'_{cp_d}} \quad (5.95)$$

S-a considerat că $\frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}} \cong \frac{Z_m}{Z_{cp_d}}$ și deci $v - \frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}} \approx 0$.

Ținând cont că $I_{N-1} = \frac{U_{N-1}}{Z_{st}}$, relația (5.95) poate fi scrisă sub forma:

$$U_p \frac{Z'_{cp_d}}{Z'_{cp_d}} = I_p R_p \frac{Z'_{cp_d}}{Z'_{cp_d}} = -U_{N-2} + U_{N-1} \left(1 + \frac{Z'_{cp_d}}{Z_{st}} + \frac{Z'_{cp_d}}{Z'_{cp_d}}\right) \quad (5.96)$$

De asemenea, tot la acest capăt al liniei se poate scrie relația:

$$i_N = I'_d - I_p \quad (5.97)$$

Înlocuind expresia (5.97) în expresia (5.91), se obține:

$$I_p = \frac{Z'_{cp_d} - Z'_m}{Z'_{cp_d} + R_p} I'_d - \frac{U_{N-1}}{Z'_{cp_d} + R_p} \quad (5.98)$$

Din relațiile (5.96) și (5.98) se obține expresia:

$$U_{N-1} \left(1 + \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} + \frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p}\right) - U_{N-2} = \frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p} R_p I'_d \left(1 - \frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}}\right) \quad (5.99)$$

Expresiile (5.89) și (5.99), reprezintă condițiile de la capetele porțiunii de linie analizată, respectiv de la stâlpul cu defect până la capătul din stânga al liniei.

Pe baza acestor relații, ținând cont de soluția (5.82), rezultă pentru constantele A_s și B_s , expresiile:

$$A_s = \frac{1}{Z_{st}} \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p} \left(1 - \frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}}\right) R_p I'_d - U_0 e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)}{e^{\alpha(N-1)} (x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)} \quad (5.100)$$

$$B_s = \frac{1}{Z_{st}} \left[U_0 - \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p} \left(1 - \frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}}\right) R_p I'_d - U_0 e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)}{e^{\alpha(N-1)} (x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)} \right] \quad (5.101)$$

respectiv:

$$a_s = \frac{e^{-\alpha} - 1}{Z_{cp_d}} * \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p} \left(1 - \frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}}\right) R_p I'_d - U_0 e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)}{e^{\alpha(N-1)} (x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)} \quad (5.102)$$

$$b_s = \frac{e^\alpha - 1}{Z_{cp_d}} \left[U_0 - \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p} \left(1 - \frac{Z'_m}{Z'_{cp_d}}\right) R_p I'_d - U_0 e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)}{e^{\alpha(N-1)} (x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)} \right] \quad (5.103)$$

unde cu x_s , s-a notat: $x_s = 1 + \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} + \frac{Z_{cp_d}}{Z'_{cp_d} + R_p}$.

Cu aceste constante determinate, se pot determina curenții în deschiderile succesive ale conductorului de protecție, de la locul de defect până la capătul liniei, respectiv curenții din stâlpii din partea stângă a liniei.

O relație similară se obține și pentru curenții din partea dreaptă a liniei considerate (figura 5.10):

$$\begin{cases} I_{n-d} = A_d e^{\alpha n} + B_d e^{-\alpha n} \\ i_{n-d} = \frac{A_d}{1 - e^\alpha} e^{\alpha n} + \frac{B_d}{1 - e^{-\alpha}} e^{-\alpha n} + I'_d \end{cases} \quad (5.104)$$

Constantele arbitrare pentru această situație vor fi date de expresiile:

$$A_d = \frac{1}{Z_{st}} * \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'} (1 - \frac{Z_m'}{Z_{cp_d}}) R_p' I_d'' - U_0 e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)}{e^{\alpha(M-1)} (x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)} \quad (5.105)$$

$$B_d = \frac{1}{Z_{st}} \left[U_0 - \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'} (1 - \frac{Z_m'}{Z_{cp_d}}) R_p' I_d'' - U_0 e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)}{e^{\alpha(M-1)} (x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)} \right] \quad (5.106)$$

respectiv:

$$a_d = \frac{e^{-\alpha} - 1}{Z_{cp_d}} * \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'} (1 - \frac{Z_m'}{Z_{cp_d}}) R_p' I_d'' - U_0 e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)}{e^{\alpha(M-1)} (x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)} \quad (5.107)$$

$$b_d = \frac{e^\alpha - 1}{Z_{cp_d}} \left[U_0 - \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'} (1 - \frac{Z_m'}{Z_{cp_d}}) R_p' I_d'' - U_0 e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)}{e^{\alpha(M-1)} (x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-1)} (x_d - e^\alpha)} \right] \quad (5.108)$$

unde $x_d = 1 + \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}} + \frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'}$.

În aceste condiții, la locul de defect, curentul total de defect va fi:

$$I_d = I_d' + I_d'' = i_{1-s} + i_{1-d} + I_0 \quad (5.109)$$

Pentru curentul prin stâlpul cu defect se obține astfel, următoarea expresie:

$$I_0 = \frac{(1-v)I_d + (T_s + T_d)E}{1 + \frac{Z_{st}}{Z_{cp_d}} (2 - G_s - G_d)} \quad (5.110)$$

unde:

$$T_s = \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'} (1-v) R_p' I_d}{e^{\alpha(N-1)} (x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-1)} (x_s - e^\alpha)};$$

$$\begin{aligned}
- T_d &= \frac{\frac{Z_{cp_d}}{Z_{cp_d} + R_p'} (1-\nu) R_p' I_d''}{e^{\alpha(M-1)}(x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-1)}(x_d - e^{\alpha})}; \\
- E &= e^{\alpha} - e^{-\alpha}; \\
- G_s &= \frac{e^{\alpha(N-2)}(x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-2)}(x_s - e^{\alpha})}{e^{\alpha(N-1)}(x_s - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(N-1)}(x_s - e^{\alpha})}; \\
- G_d &= \frac{e^{\alpha(M-2)}(x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-2)}(x_d - e^{\alpha})}{e^{\alpha(M-1)}(x_d - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha(M-1)}(x_d - e^{\alpha})}.
\end{aligned}$$

Căderea de tensiune pe stâlpul cu defect va fi dată de relația:

$$U_0 = Z_{st} I_0 = \frac{(1-\nu)I_d + (T_s + T_d)E}{\frac{Z_{st}}{Z_{cp_d}}(2 - G_s - G_d)} Z_{st} \quad (5.111)$$

Această relație poate fi scrisă sub forma:

$$U_0 = Z_{NM} (1-\nu) I_d \quad (5.112)$$

unde cu Z_{NM} s-a notat impedența echivalentă a întregului circuit.

Dacă rezistențele instalațiilor de legare la pământ ale stațiilor electrice de la capetele liniei analizate pot fi neglijate, atunci relațiile de mai sus se simplifică, astfel încât pentru curentul prin stâlpul cu defect și pentru curenții în conductorul de protecție, de o parte și de alta a defectului, în urma calculelor, se obțin următoarele expresii [25]:

$$I_0 = \frac{(1-\nu)I_d}{1 + \frac{Z_{st}}{Z_{cp_d}} \left[\frac{sh(N\alpha) - sh[(N-1)\alpha]}{sh(N\alpha)} + \frac{sh(M\alpha) - sh[(M-1)\alpha]}{sh(M\alpha)} \right]} \quad (5.113)$$

$$i_{n-s} = I_0 \frac{Z_{st}}{Z_{cp_d}} \frac{sh[(N+1-n)\alpha] - sh[(N-n)\alpha]}{sh(N\alpha)} + \nu I_d' \quad (5.114)$$

$$i_{n-d} = I_0 \frac{Z_{st}}{Z_{cp_d}} \frac{sh[(M+1-n)\alpha] - sh[(M-n)\alpha]}{sh(M\alpha)} + \nu I_d'' \quad (5.115)$$

Căderea de tensiune pe stâlpul cu defect va fi, în acest caz, dată de următoarea relație simplificată:

$$U_0 = I_0 Z_{st} = Z_{st} \frac{(1-\nu)I_d}{1 + \frac{Z_{st}}{Z_{cpd}} \left[\frac{sh(N\alpha) - sh[(N-1)\alpha]}{sh(N\alpha)} + \frac{sh(M\alpha) - sh[(M-1)\alpha]}{sh(M\alpha)} \right]} \quad (5.116)$$

Relația (5.116) poate fi scrisă sub forma:

$$U_0 = Z_{NM} (1-\nu)I_d \quad (5.117)$$

În acest caz, Z_{NM} va fi dat de relația:

$$Z_{NM} = Z_{st} \frac{1}{1 + \frac{Z_{st}}{Z_{cpd}} \left[\frac{sh(N\alpha) - sh[(N-1)\alpha]}{sh(N\alpha)} + \frac{sh(M\alpha) - sh[(M-1)\alpha]}{sh(M\alpha)} \right]} \quad (5.118)$$

Dacă cele două porțiuni de linie nu pot fi considerate de lungimi mari atunci, considerând pentru porțiunea de linie I pe care circulă curentul I_d' că există N stâlpi, iar pe porțiunea de linie II pe care circulă I_d'' că există M stâlpi, pentru căderea de tensiune pe stâlpul cu defect rezultă următoarea expresie [33]:

$$U_0 = U_0' + U_0'' = (1-\nu)(I_d' Z_{NM} + I_d'' Z_{MN}) \quad (5.119)$$

Impedanțele Z_{NM} , respectiv Z_{MN} , se pot stabili și pe baza relației $\frac{1}{Z_{NM}} = \frac{1}{Z_N} + \frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_M}$, în care Z_N se determină cu relația (5.74) iar Z_M cu relația (5.72).

Dacă doar una din porțiunile de linie poate fi considerată de lungime mare, de exemplu porțiunea II , atunci impedanța Z_{MN} va fi înlocuită cu expresia impedanței $Z_{N\infty}$ dată de relația (5.77).

Dacă doar porțiunea I de linie se poate considera de lungime mare, atunci impedanța Z_{NM} va fi înlocuită cu expresia impedanței $Z_{\infty M}$ dată de relația (5.76).

Dacă se consideră că ambele porțiuni de linie de la locul de defect spre capetele liniei sunt de lungimi mari (figura 5.11), astfel încât se poate folosi impedanța Z_{∞} dată de relația

(5.33) determinată la punctul 5.2, în continuare se determină expresia impedanței echivalente a circuitului, în acest caz.

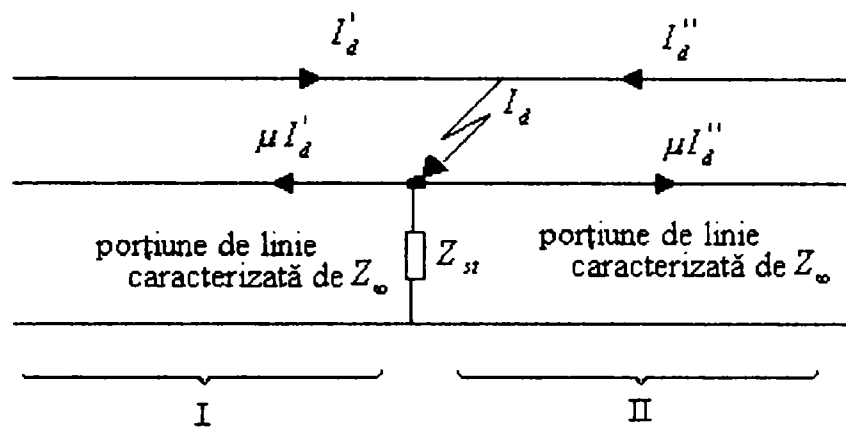


Figura 5.11 Determinarea impedanței liniei, în funcție de impedanțele celor două porțiuni de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei

Curentul total de defect I_d , va fi în această situație obținut prin însumarea celor 2 curenți I_d' și I_d'' , astfel încât:

$$I_d = I_d' + I_d'' \quad (5.120)$$

Dacă se consideră doar prezența curentului I_d' , căderea de tensiune pe stâlpul cu defect poate fi scrisă sub forma:

$$U_0' = (1 - \nu) I_d' Z_{\infty} \quad (5.121)$$

Dacă se consideră doar prezența curentului I_d'' , căderea de tensiune pe stâlpul cu defect va fi:

$$U_0'' = (1 - \nu) I_d'' Z_{\infty} \quad (5.122)$$

Dacă există ambii curenți, atunci se poate aplica principiul superpoziției și rezultă pentru căderea de tensiune pe stâlpul cu defect expresia:

$$U_0 = U_0' + U_0'' = (1 - \nu) I_d Z_{\infty} \quad (5.123)$$

Cu Z_{∞} s-a notat impedanța echivalentă a întregului circuit $Z_{\infty} = \frac{2Z_{st}Z_{\infty}'}{2Z_{st} + Z_{\infty}'}$, iar Z_{∞}' se

obține din relația (5.51), ținând cont că Z_{∞} poate fi scrisă sub forma: $Z_{\infty} = \frac{Z_{st}Z_{\infty}'}{Z_{st} + Z_{\infty}'}$.

5.4 Rezultate numerice

În continuare sunt prezentate rezultate numerice obținute pe baza modelelor analitice prezentate. Rezultatele au fost obținute cu ajutorul calculatorului, mai precis, relațiile au fost implementate în mediul de programare Matlab.

Pentru circuitul din figura 5.2, în care defectul apare la ultimul stâlp al liniei, s-a determinat distribuția curentului de defect de-a lungul liniei. Rezultatele numerice sunt prezentate în figura 5.12a). S-a considerat un curent de defect de 1000A, impedanța porțiunii de conductor de protecție dintr-o deschidere $Z_{cp_d} = 2\Omega$ și impedanța unui stâlp $Z_{st} = 1,5\Omega$. Rezultatele numerice prezentate în figura 5.12a), au fost obținute cu relațiile (5.24), (5.25) și (5.28), pentru cazul în care se neglijează cuplajul magnetic dintre conductorul fazei avariate și conductorul de protecție.

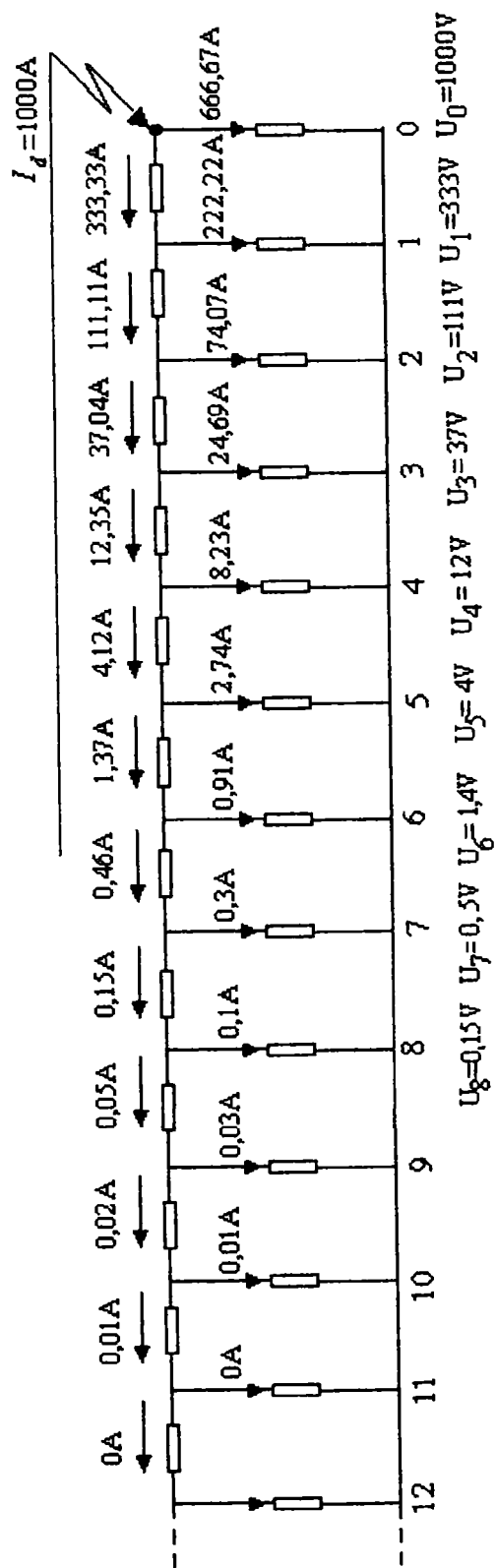
În [84] sunt prezentate valorile curenților calculate cu metode matriciale complexe. Pentru același curent de defect de 1000A și pentru aceleași valori ale impedanțelor $Z_{cp_d} = 2\Omega$ și $Z_{st} = 1,5\Omega$, pentru cazul în care se neglijează cuplajul magnetic, rezultatele din [84] sunt prezentate în figura 5.12b). Se poate observa că acestea sunt identice cu cele prezentate în figura 5.12a).

În figura 5.13 sunt prezentate valorile curenților obținuți pentru cazul în care se ține cont de existența cuplajului magnetic dintre conductorul fazei avariate și conductorul de

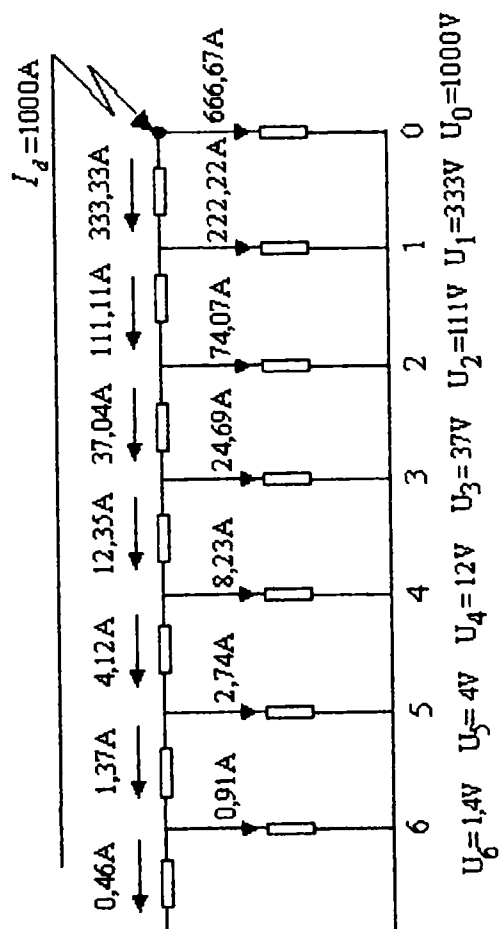
protecție. S-a considerat coeficientul de cuplaj $\nu = \frac{Z_{cp_m}}{Z_{cp_d}} = \frac{\log \frac{b}{a}}{\log \frac{2h}{r}} = 0,292$. Această valoare

corespunde unui conductor de protecție de oțel, cu secțiunea de $70mm^2$, cu raza $r=0,473cm$, înălțimea conductorului de protecție față de suprafața solului $h=24,4m$, distanța dintre conductorul de protecție și conductorul de fază avariat $a=3,05m$, iar b reprezintă distanța de la conductorul de fază avariat la imaginea conductorului de protecție $b=45,72m$. Aceste valori pentru care s-a determinat distribuția curentului de defect au fost preluate din [104]. Cu aceste valori, în [104] este dată valoarea calculată pentru curentul în stâlpul cu defect. Această valoare este identică cu cea obținută pe baza relației (5.28) din această lucrare.

Se poate observa că în absența cuplajului magnetic (figura 5.12a), curentul de defect se închide la pământ printr-un număr de stâlpi mai mic decât numărul stâlpilor din figura 5.13 în care s-a ținut cont de prezența cuplajului magnetic. Această observație este confirmată și de concluziile prezentate în [33].



a)



b)

Figura 5.12 Repartiția curentului de defect

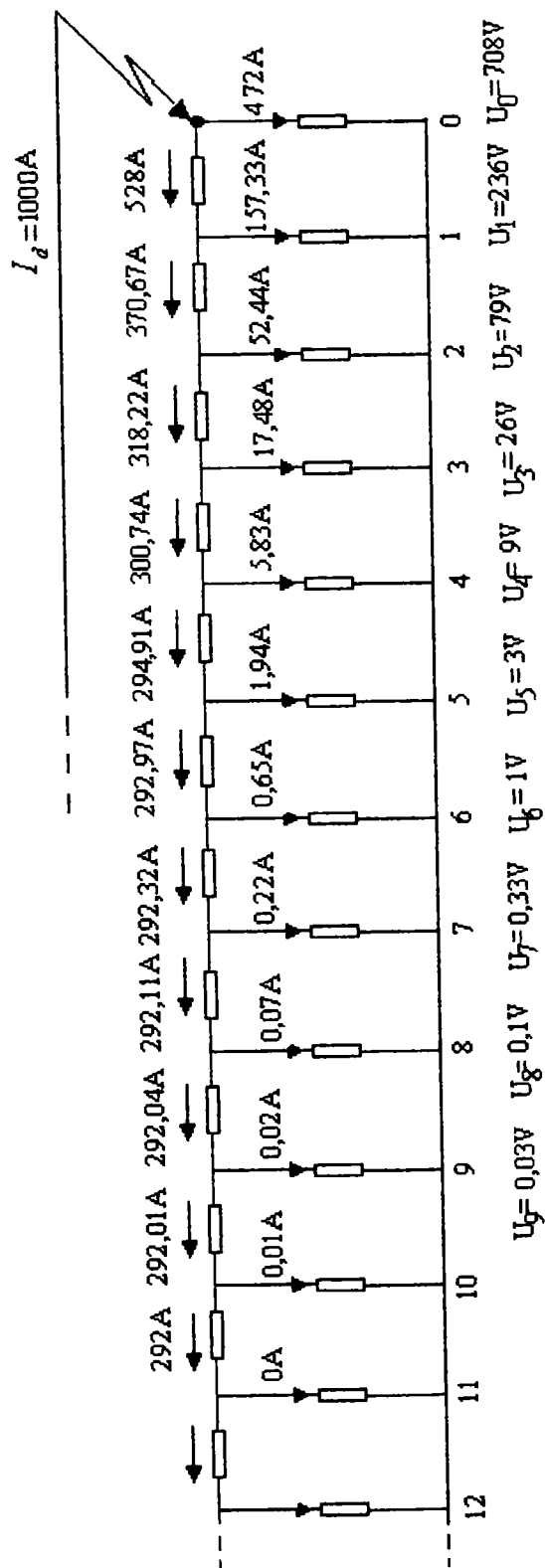


Figura 5.13 Repartiția curentului de defect

Pentru $\nu = 0,292$, $Z_{st} = 50\Omega$, considerând un curent de defect $I_d = 10000A$, valori preluate din [104], aplicând relația (5.32), pentru impedanța echivalentă a circuitului se obține valoarea $Z_\infty = 3,8\Omega$, iar pentru căderea de tensiune pe stâlpul cu defect, calculată cu expresia (5.31), se obține valoarea $U_0 = 4418,4V$. Pentru curentul I'_p care circulă prin stația care închide circuitul din figura 5.3, ținând cont de relația (5.36), dacă se consideră $R'_p = 0,5\Omega$, rezultă valoarea:

$$I'_p = I_d \frac{Z_\infty}{R'_p + Z_\infty} = 8837A \quad (5.124)$$

În aceste condiții, se poate determina valoarea curentului de defect I'_d care va înlocui curentul I_d în calculele efectuate.

Prin urmare, curentul de defect care se va închide la pământ, prin stâlpii succesivi, legați între ei prin conductorul de protecție, va fi:

$$I'_d = I_d - I'_p = 1163A \quad (5.125)$$

Curentul în stâlpul cu defect este $I_0 = 82,5A$, iar tensiunea pe stâlpul cu defect este $U_{st} = 4418,4\Omega$. Aceste valori sunt prezentate și în [104]. De remarcat că, aceeași valoare pentru imedanța Z_∞ se obține și cu expresia (5.57), dedusă în această lucrare.

Dacă se consideră pentru impedanța conductorului de protecție dintr-o deschidere, respectiv pentru impedanța stâlpului, valorile $Z_{cp_d} = 1,5\Omega$ și $Z_{st} = 50\Omega$, atunci valorile curenților și căderile de tensiune pe stâlpi sunt prezentate în Anexa A.3, figura A3.1. S-a considerat $\nu = 0.292$.

Dacă se consideră pentru coeficientul de cuplaj valoarea $\nu = \frac{Z_{cp_m}}{Z_{cp_d}} = 0.2613$, rezultatele sunt prezentate în Anexa A3, figura A3.2. Această valoare a coeficientului de cuplaj, corespunde cazului în care linia este prevăzută cu un conductor de protecție de AL-OL, cu secțiunea de $160/95mm^2$, cu raza de $0,96cm$, înălțimea conductorului de protecție față de suprafața solului $47,4m$, distanța dintre conductorul de protecție și conductorul de fază avariat $8,12m$. Se poate observa că la stâlpul cu numărul 26, valoarea curentului prin stâlp este $0,0131A$, care reprezintă o scădere cu 1% din valoarea curentului în stâlpul cu defect. Acest lucru confirmă relația (5.38).

Considerând coronamentul liniei electrice din figura 5.14 și considerând un curent de defect $I_d = 5000A$, s-au calculat valorile curenților pentru cazul în care defectul apare la ultimul stâlp al liniei, iar linia nu mai poate fi considerată de lungime mare (figura 5.4). S-a considerat că linia are un număr de 20 de stâlpi. Valorile obținute sunt prezentate în figura 5.15. Faza cu defect s-a considerat a fi cea mai îndepărtată de conductorul de protecție, deoarece cuplajul mutual mai slab, determină o tensiune pe stâlpul cu defect mai mare. S-a considerat pentru impedanța conductorului de protecție dintr-o deschidere, respectiv pentru impedanța stâlpului, valorile $Z_{cp_d} = 2,8825\Omega$ și $Z_{st} = 28,825\Omega$. Conductorul de protecție s-a considerat că este din oțel, cu secțiunea de $70mm^2$ și diametrul $d=10,5mm$, iar conductoarele de fază sunt din *AL-OL*, cu secțiunea de $240/40mm^2$. S-a obținut pentru coeficientul de cuplaj valoarea $\nu = \frac{Z_{cp_m}}{Z_{cp_d}} = 0,0808$.

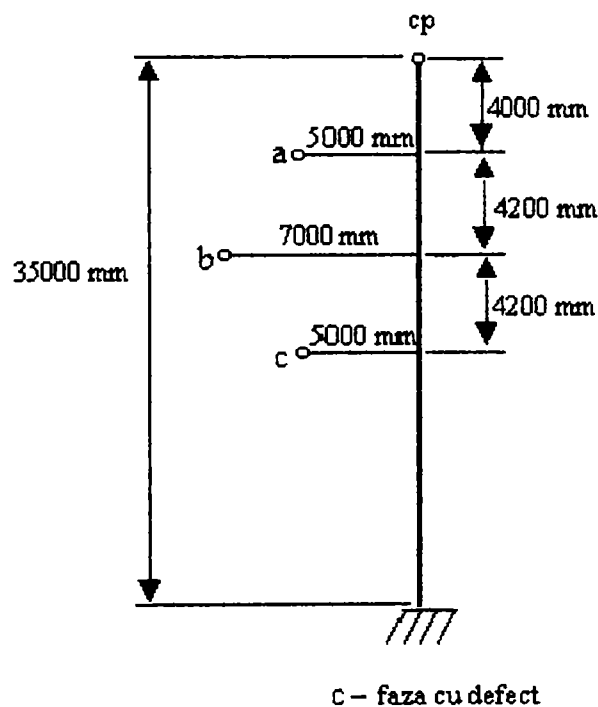
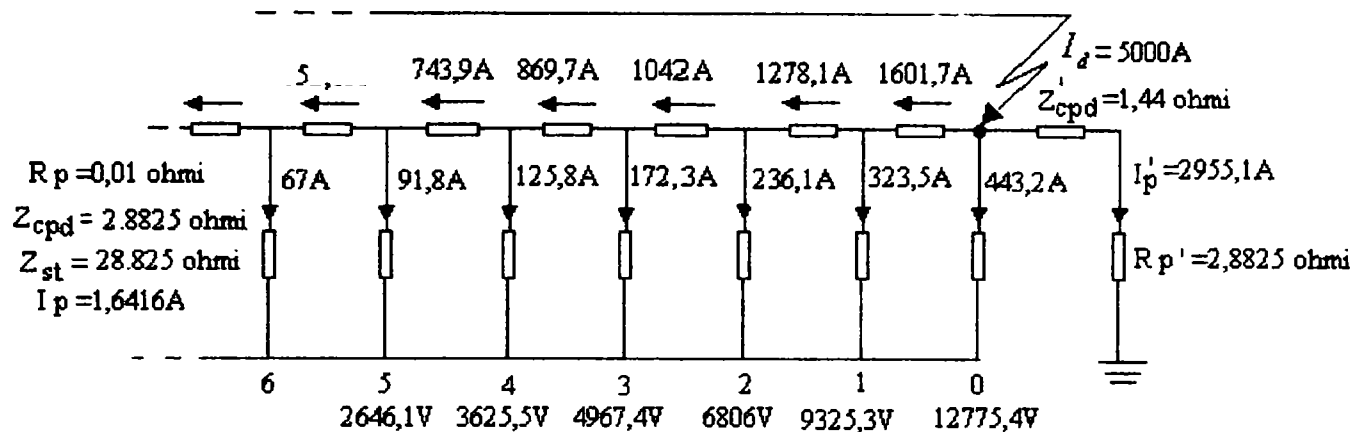


Figura 5.14 Coronamentul liniei

Dacă se consideră că linia este prevăzută cu un conductor de protecție de *AL-OL*, cu secțiunea de $160/95mm^2$, diametrul $d=18,13mm$, atunci pentru impedanța conductorului de protecție dintr-o deschidere se obține valoarea $Z_{cp_d} = 0,193\Omega$. Dacă se consideră pentru impedanța stâlpului valoarea $Z_{st} = 10\Omega$, atunci coeficientul de cuplaj este $\nu = \frac{Z_{cp_m}}{Z_{cp_d}} = 0,3553$.

Cu aceste valori, s-au obținut pentru curenții în conductorul de protecție și în stâlpi, valorile prezentate în Anexa A3, figura A3.3.



Stâlpul nr. 0	$I_0=443,2A$	$U_{st}=12775,4V$	-
Stâlpul nr. 1	$I_1=323,5A$	$U_{st}=9325,3V$	$i_1=1601,7A$
Stâlpul nr. 2	$I_2=236,1A$	$U_{st}=6806V$	$i_2=1278,1A$
Stâlpul nr. 3	$I_3=172,3A$	$U_{st}=4967,4V$	$i_3=1042A$
Stâlpul nr. 4	$I_4=125,8A$	$U_{st}=3625,5V$	$i_4=869,7A$
Stâlpul nr. 5	$I_5=91,8A$	$U_{st}=2646,1V$	$i_5=743,9A$
Stâlpul nr. 6	$I_6=67A$	$U_{st}=1931,4V$	$i_6=652,1A$
Stâlpul nr. 7	$I_7=48,9A$	$U_{st}=1409,8V$	$i_7=585,1A$
Stâlpul nr. 8	$I_8=25,7A$	$U_{st}=1029,2V$	$i_8=536,2A$
Stâlpul nr. 9	$I_9=26,1A$	$U_{st}=751,5V$	$i_9=500,5A$
Stâlpul nr. 10	$I_{10}=19A$	$U_{st}=548,9V$	$i_{10}=474,4A$
Stâlpul nr. 11	$I_{11}=13,9A$	$U_{st}=401,3V$	$i_{11}=455,4A$
Stâlpul nr. 12	$I_{12}=10,2A$	$U_{st}=293,8V$	$i_{12}=441,5A$
Stâlpul nr. 13	$I_{13}=7,5A$	$U_{st}=215,6V$	$i_{13}=431,3A$
Stâlpul nr. 14	$I_{14}=5,5A$	$U_{st}=159V$	$i_{14}=423,8A$
Stâlpul nr. 15	$I_{15}=4,1A$	$U_{st}=118,4V$	$i_{15}=418,3A$
Stâlpul nr. 16	$I_{16}=3,1A$	$U_{st}=89,5V$	$i_{16}=414,2A$
Stâlpul nr. 17	$I_{17}=2,4A$	$U_{st}=69,6V$	$i_{17}=411,1A$
Stâlpul nr. 18	$I_{18}=2A$	$U_{st}=56,7V$	$i_{18}=408,6A$
Stâlpul nr. 19	$I_{19}=1,7A$	$U_{st}=49,5V$	$i_{19}=406,7A$
Stâlpul nr. 20	$I_{20}=1,6A$	$U_{st}=47,2V$	$i_{20}=405A$

Figura 5.15 Repartiția curentului de defect

Ca o formă de verificare a acestor rezultate, se face referire la valoarea obținută pentru impedanța echivalentă a liniei. În tabelul 5.1 sunt prezentate valorile obținute pentru impedanța liniei, în cazul în care defectul apare la ultimul stâlp al liniei și linia nu poate fi

considerată de lungime mare (figura 5.4). Aceste valori au fost obținute cu relația (5.48) propusă în această lucrare și cu relația (5.72) preluată din [33]. Valorile prezentate sunt calculate pentru $Z_{cp_d} = 2,8825\Omega$, $Z_{st} = 28,825\Omega$, $R_p = 0,01\Omega$ și $R'_p = 2,8825\Omega$. Se observă că aceste valori coincid, confirmând corectitudinea relației propuse. Relația propusă este însă dedusă pornind de la expresiile curenților în stâlpi și conductoarele de protecție adiacente, lucru care confirmă acuratețea modelului propus.

Tabelul 5.1 Impedanța circuitului, pentru cazul în care defectul apare la ultimul stâlp al liniei și linia nu poate fi considerată de lungime mare

Numărul stâlpilor	Impedanța calculată cu relația (5.48) propusă	Impedanța calculată pe baza relației (5.72) preluată din [33]
N=25	10,6	10,6
N=20	10,6	10,6
N=15	10,5	10,5
N=10	10,5	10,5
N=5	9,9	9,9

Considerând că defectul apare la un stâlp oarecare al liniei electrice și că ambele porțiuni de linie de la locul de defect până la capetele liniei pot fi considerate de lungimi mari, pentru determinarea tensiunii pe stâlpul cu defect se aplică relația (5.49). Conform acestei relații, pe lângă curentul de defect și coeficientul de cuplaj, trebuie determinată impedanța echivalentă a circuitului, notată cu Z_{∞} . Această impedanță poate fi determinată din relația (5.50), în care apare impedanța Z'_{∞} . Dacă din relația (5.33), care reprezintă impedanța echivalentă a unei porțiuni de linie de lungime mare, care include și impedanța stâlpului cu defect, se reține doar impedanța porțiunii de linie, notată cu Z'_{∞} , atunci această impedanță este dată de relația (5.51).

Impedanța Z'_{∞} poate fi însă determinată și cu relația (5.57), care reprezintă impedanța porțiunii de linie determinată cu teoria fracțiilor continue, respectiv cu relația (5.66), care reprezintă impedanța porțiunii de linie exprimată în funcție de impedanța caracteristică, însă ținând cont de coeficientul de corecție introdus. În tabelul 5.2 sunt date valorile impedanței Z'_{∞} , calculate cu relația (5.51), respectiv cu relația (5.57). Se observă că cele două relații dau rezultate identice. Deci, în expresia impedanței Z_{∞} se poate folosi fie impedanța Z'_{∞} , calculată cu relația (5.51), fie impedanța $Z_{1\infty}$ calculată cu relația (5.57), fie impedanța

calculată cu relația $Z_{1\infty}$ (5.66). Tot în tabelul 5.2 sunt date și valorile curentului în stâlpul cu defect, respectiv valorile tensiunii stâlpului cu defect, pentru un curent de defect de $5000A$, pentru diferite valori ale raportului $K = \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}$. De remarcat că expresia impedanței echivalente stabilită cu teoria fracțiilor continue, dă rezultate identice cu rezultatele obținute cu expresia stabilită de [33].

Tabelul 5.2 Valorile impedanței liniei obținute cu diverse relații

$K = \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}$	$K = \frac{0,193}{19,3}$	$K = \frac{0,193}{3,86}$	$K = \frac{2,8825}{28,825}$	$K = \frac{2,8825}{2,8825}$	$K = \frac{2,8825}{1,9}$
Z'_{∞} rel. (5.51)	2,029	0,965	10,67	4,66	4,19
$Z_{1\infty}$ rel. (5.57)	2,029	0,965	10,67	4,66	4,19
Z_{∞} rel. (5.50)	0,964	0,429	4,50	1,29	0,99
U_o [V]rel.(5.49)	3107,4	1382,8	2068,9	5924,5	4579
I_o [A]	184,92	512,45	443,27	2011,6	2427,9

În figura 5.16 este reprezentată impedanța Z_{∞} din relația (5.50), în funcție de raportul $K = \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}$. Pentru impedanța $Z_{cp_d} = 0,193\Omega$, s-au considerat pentru impedanța Z_{st} valorile $Z_{st} = 19,3\Omega$, $Z_{st} = 3,86\Omega$, $Z_{st} = 0,193\Omega$ și $Z_{st} = 0,0386\Omega$, astfel încât s-au obținut pentru raportul K valorile prezentate.

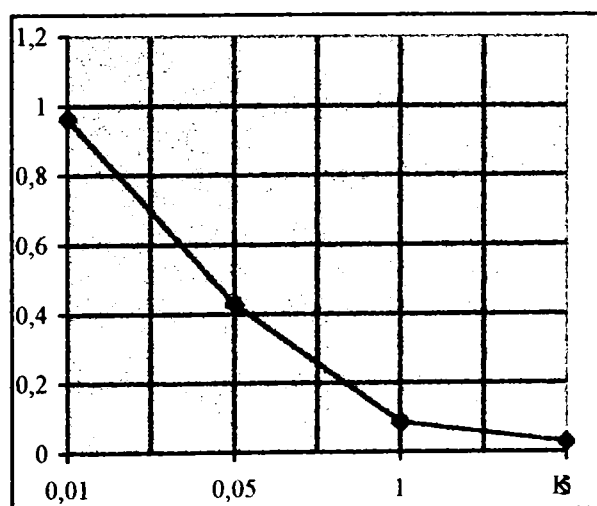


Figura 5.16 Impedanța echivalentă a liniei, compusă din două porțiuni de linie considerate de lungimi mari, în funcție de raportul K

În figura 5.17 este reprezentată impedanța Z_{∞} din relația (5.50), în funcție de același raport $K = \frac{Z_{cp_d}}{Z_{st}}$, dar pentru impedanța $Z_{cp_d} = 2,8825\Omega$.

S-au considerat pentru impedanța Z_{st} valorile $Z_{st} = 28,825\Omega$, $Z_{st} = 5,765\Omega$, $Z_{st} = 2,8825\Omega$, $Z_{st} = 1,9\Omega$, $Z_{st} = 0,5765\Omega$ și $Z_{st} = 0,28825\Omega$, astfel încât s-au obținut pentru raportul K valorile prezentate.

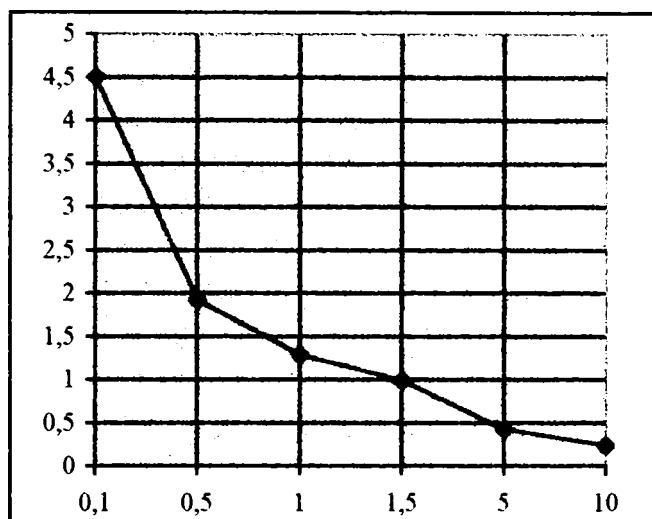


Figura 5.17 Impedanța echivalentă a liniei, compusă din două porțiuni de linie considerate de lungimi mari, în funcție de raportul K

În figura 5.18 este reprezentată impedanța Z_M a porțiunii de linie, considerată de lungime mică, cuprinsă între locul de defect și capătul liniei dinspre partea opusă sursei, calculată cu relația (5.72), în funcție de numărul de stâlpi $M = \frac{l_M}{l_d}$ ai porțiunii de linie respective, unde l_M reprezintă lungimea porțiunii de linie considerată. S-a considerat pentru rezistența din stația terminală valoarea $R_p' = 2,8825\Omega$.

În figura 5.19 este reprezentată impedanța Z_N a porțiunii de linie, considerată de lungime mică, cuprinsă între locul de defect și capătul liniei dinspre partea cu sursa, calculată cu relația (5.74), în funcție de numărul de stâlpi $N = \frac{l_N}{l_d}$ ai porțiunii de linie respective; l_N reprezintă lungimea porțiunii de linie considerată. S-a considerat pentru rezistența din stația terminală valoarea $R_p = 0,28825\Omega$.

Pentru ambele impedanțe, este de remarcat faptul că valorile lor tind spre valoarea impedanței caracteristice, calculată cu relația (5.66), adică cu termenul de corecție dedus.

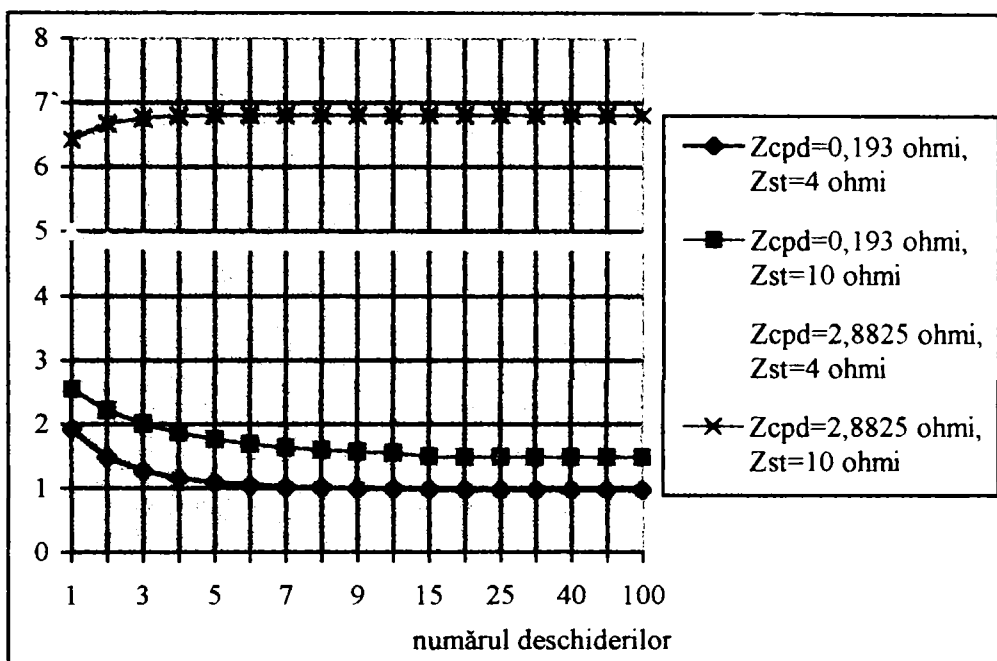


Figura 5.18 Impedanța Z_N a porțiunii de linie cuprinsă între locul de defect și capătul liniei dinspre partea opusă sursei

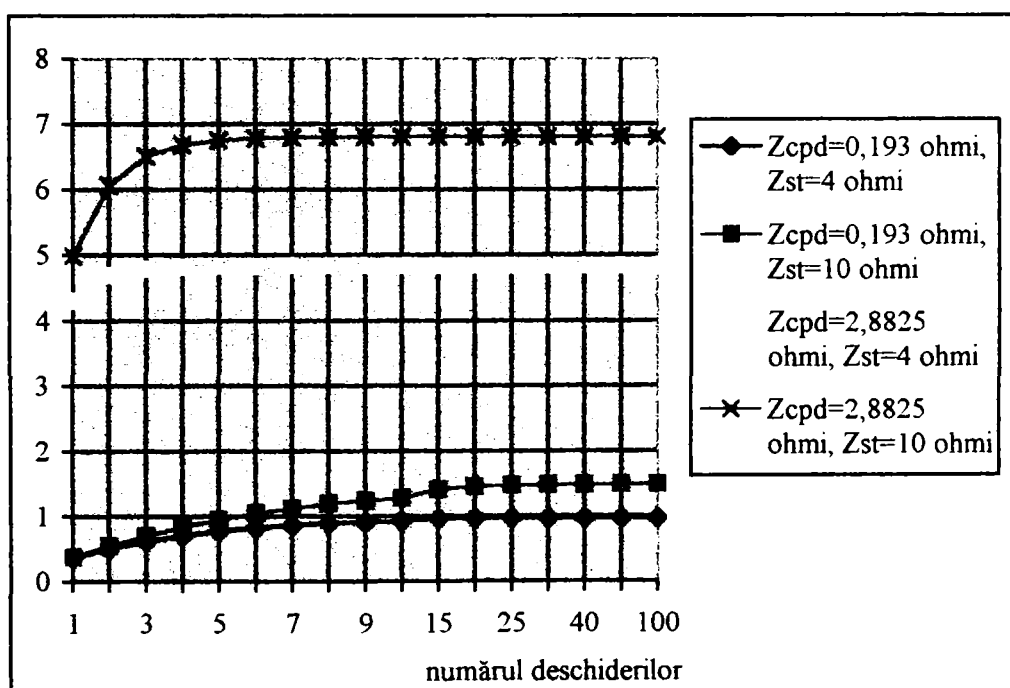


Figura 5.19 Impedanța Z_N a porțiunii de linie cuprinsă între locul de defect și capătul liniei dinspre partea cu sursa

În figurile 5.20 – 5.24, sunt date valorile curenților și ale tensiunilor stâlpilor pentru cazul în care defectul este alimentat din ambele părți.

S-a considerat mai întâi cazul în care conductorul de protecție este din *AL-OL* și apoi cazul în care conductorul de protecție este din *OL*.

Pentru cazul în care conductorul de protecție este din $AL-OL$, valorile considerate au fost $Z_{cp_d} = 0,193\Omega$, $Z_{st} = 10\Omega$ și $v = \frac{Z_{cp_m}}{Z_{cp_d}} = 0,3553$. Pentru curenții de defect s-au considerat, în toate cazurile, valorile $I_d = 5000A$ și $I_d' = I_d'' = 2500A$.

Pentru cazul în care conductorul de protecție este din $AL-OL$, s-a presupus mai întâi că defectul apare la stâlpul aflat la mijlocul liniei, astfel încât s-au considerat $(N-1) = 9$ stâlpi și $(M-1) = 9$ stâlpi, cuprinși între stâlpul cu defect și capetele liniei.

În figura 5.20 sunt date valorile curenților și ale tensiunilor pentru această situație, valori determinate pentru cazul în care s-au considerat $R_p = R_p' = 0$.

În figura 5.21 sunt date valorile curenților și ale tensiunilor stâlpilor pentru cazul în care defectul apare la al doilea stâlp al liniei, adică $(N-1) = 1$ stâlp și $(M-1) = 17$ stâlpi între stâlpul cu defect și capetele liniei.

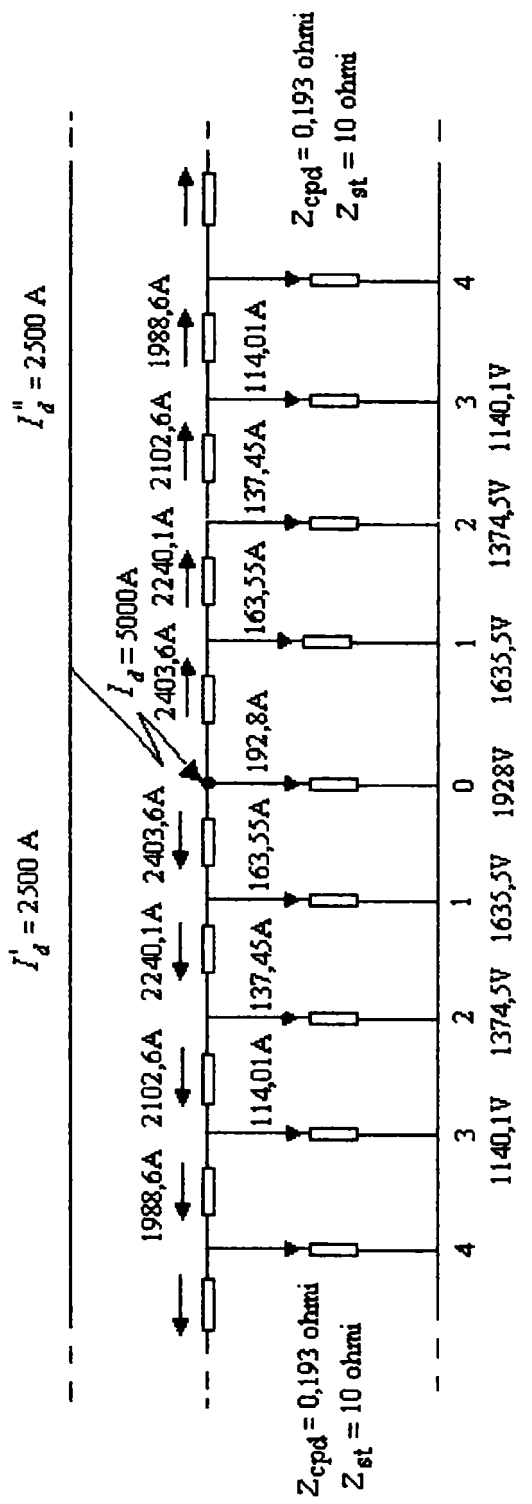
În figura 5.22 sunt prezentate valorile curenților și ale tensiunilor stâlpilor pentru cazul în care defectul apare la primul stâlp al liniei, adică $(N-1) = 0$ stâlpi cuprinși între stâlpul cu defect și stația electrică și $(M-1) = 18$ stâlpi cuprinși între stâlpul cu defect și celălalt capăt al liniei.

În figura 5.23 sunt date valorile curenților și ale tensiunilor stâlpilor pentru cazul în care conductorul de protecție este din OL .

S-au considerat valorile $Z_{cp_d} = 2,8825\Omega$, $Z_{st} = 10\Omega$, $v = \frac{Z_{cp_m}}{Z_{cp_d}} = 0,0808$,

$R_p = R_p' = 0$. S-a considerat că defectul apare la stâlpul aflat la mijlocul liniei, astfel încât s-au considerat $(N-1) = 9$ stâlpi și $(M-1) = 9$ stâlpi, cuprinși între stâlpul cu defect și capetele liniei.

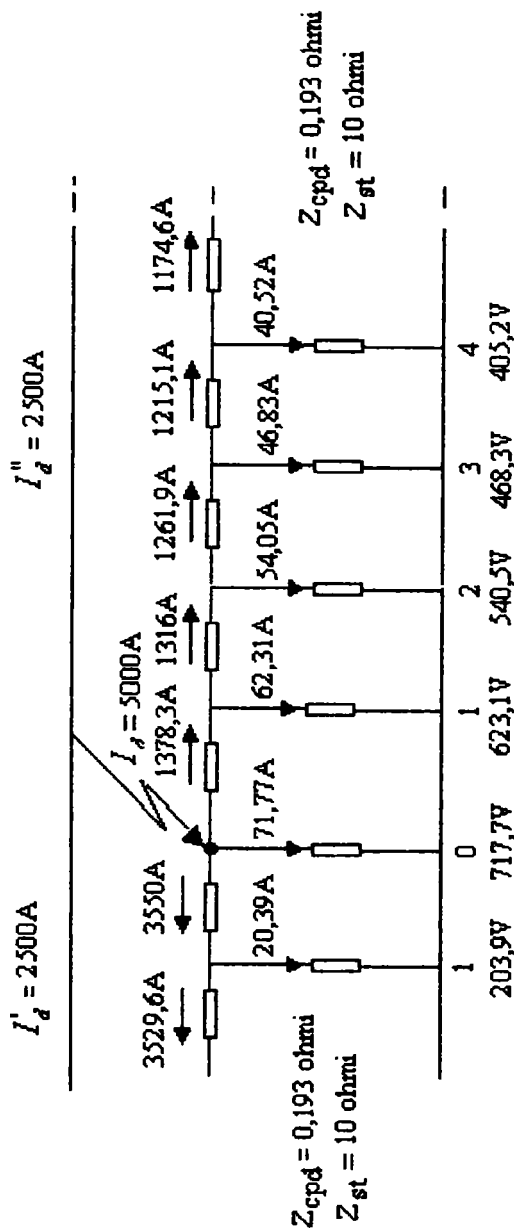
În figura 5.24 sunt date valorile curenților și ale tensiunilor stâlpilor pentru cazul în care defectul apare la al doilea stâlp al liniei, adică $(N-1) = 1$ stâlp și $(M-1) = 17$ stâlpi între stâlpul cu defect și capetele liniei.



Nr. stâlp	Ultima deschidere	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
I [A]	-	6,27	22,08	38,31	55,28	73,31	92,77	114,01	137,45	163,55	192,8
U_{st} [V]	-	62,7	220,8	383,1	552,8	733,1	927,7	1140,1	1374,5	1635,5	1928
i [A]	1700,6	1706,8	1728,9	1767,2	1822,5	1895,8	1988,6	2102,6	2240,1	2403,6	0

Nr. stâlp	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ultima deschidere
I [A]	192,8	163,55	137,45	114,01	92,77	73,31	55,28	38,31	22,08	6,27	-
U_{st} [V]	1928	1635,5	1374,5	1140,1	927,7	733,1	552,8	383,1	220,8	62,7	-
i [A]	-	2403,6	2240,1	2102,6	1988,6	1895,8	1822,5	1767,2	1728,9	1706,8	1700,6

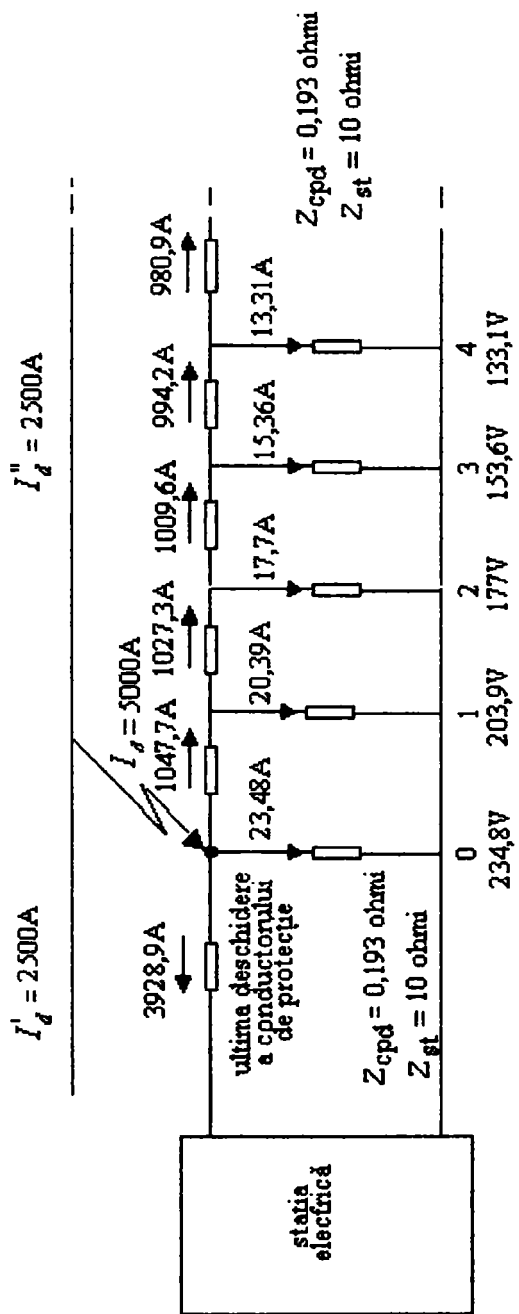
Figura 5.20 Distribuția curentului de defect



Nr. stâlp	Ultima deschidere	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
I [A]	-	20,393	71,77	62,31	54,05	46,83	40,52	34,98	30,13	25,85	22,08
U _{st} [V]	-	203,93	717,7	623,1	540,5	468,3	405,2	349,8	301,3	258,5	220,8
i [A]	3529,6	3550	-	1378,3	1316	1261,9	1215,1	1174,6	1139,6	1109,4	1083,6

Nr. stâlp	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Ultima deschidere
I [A]	18,73	15,74	13,06	10,62	8,4	6,3	4,39	2,53	0,72	-
U _{st} [V]	187,3	157,4	130,6	106,2	84	63	43,9	25,3	7,2	-
i [A]	1061,5	1042,8	1027	1014	1003,4	995	988,6	984,3	981,7	981

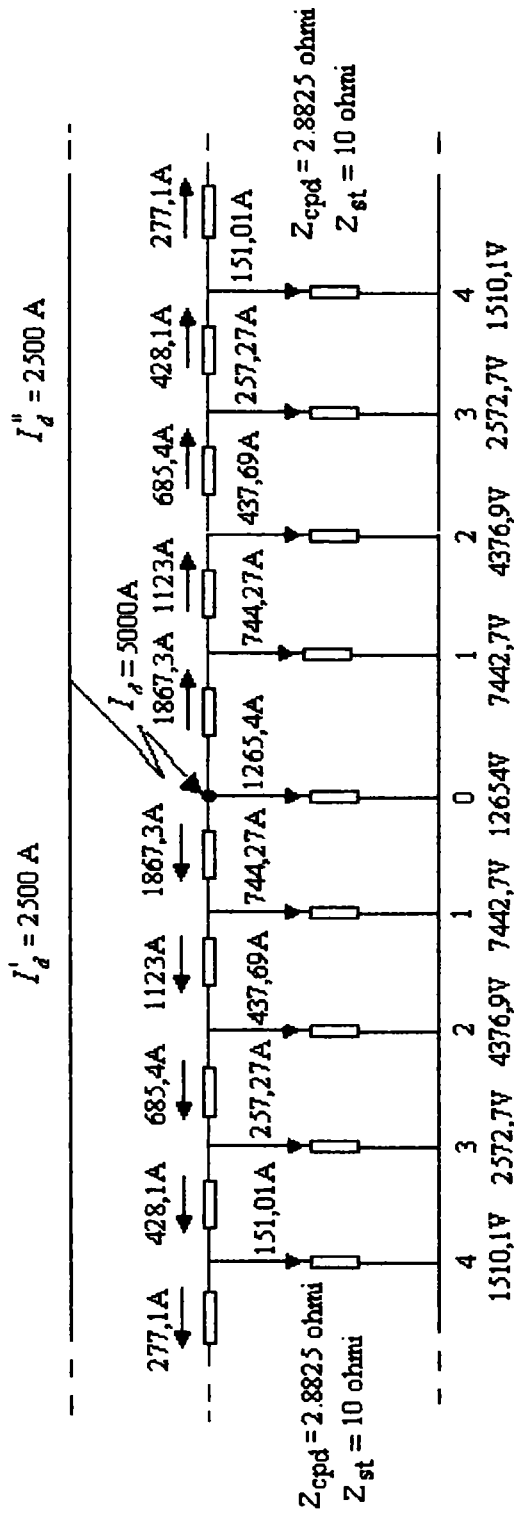
Figura 5.21 Distribuția curentului de defect



Nr. stâlp	Ultima deschidere	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I [A]	-	23,48	20,39	17,7	15,36	13,31	11,51	9,94	8,56	7,35	6,27
U_{st} [V]	-	234,8	203,9	177	153,6	133,1	115,1	99,4	85,6	73,5	62,7
i [A]	3928,9	-	1047,7	1027,3	994,2	944,2	980,9	969,4	959,5	950,9	943,5

Nr. stâlp	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Ultima deschidere
I [A]	5,32	4,47	3,71	3,02	2,38	1,8	1,25	0,72	0,	-
U_{st} [V]	53,2	44,7	37,1	30,2	23,8	18	12,5	7,2	^	-
i [A]	937,3	931,9	927,5	923,8	920,7	918,4	916,6	915,3	914,6	914,4

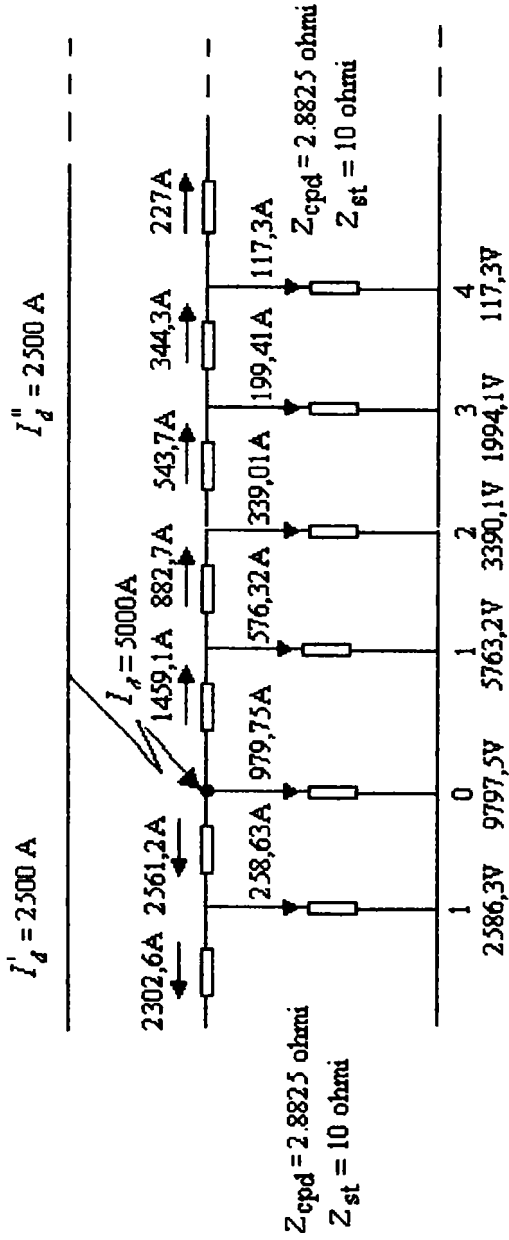
Figura 5.22 Distribuția curentului de defect



Nr. stâlp	Ultima deschidere	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4
I [A]	-	3,71	14,04	28,43	51	88,28	151,01	257,27	437,69	744,27	1265,4	1867,3	257,27	437,69	744,27
U_{st} [V]	-	37,1	140,4	284,3	510	882,8	1510,1	2572,7	4376,9	7442,7	12654	1510,1	2572,7	4376,9	7442,7
i [A]	91,6	95,3	109,4	137,8	188,9	277,1	428,1	685,4	1123	1867,3	-	1867,3	1123	437,69	744,27

Nr. stâlp	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ultima deschidere
I [A]	1265,4	744,27	437,69	257,27	151,01	88,28	51	28,43	14,04	3,71	-
U_{st} [V]	12654	7442,7	4376,9	2572,7	1510,1	882,8	510	284,3	140,4	37,1	-
i [A]	-	1867,3	1123	685,4	428,1	277,1	188,9	137,8	109,4	95,3	91,6

Figura 5.23 Distribuția curentului de defect



Nr. stâlp	Ultima deschidere	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
I [A]	-	258,63	979,75	339,01	199,41	117,3	69	40,59	23,87	14,04	
U_{st} [V]	-	2586,3	9797,5	3390,1	1994,1	1173	690	405,9	238,7	140,4	
i [A]	2302,6	2561,2	-	1459,1	882,7	543,7	344,3	227	158	117,4	93,6

Nr. stâlp	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Ultima deschidere
I [A]	8,26	4,86	2,85	1,67	0,98	0,57	0,31	0,15	0,04	-
U_{st} [V]	82,6	48,6	28,5	16,7	9,8	5,7	3,1	1,5	0,4	-
i [A]	79,5	71,3	66,4	63,5	61,9	60,9	60,3	60	59,9	59,8

Figura 5.24 Distribuția curentului de defect

Pentru a verifica relațiile (5.82), (5.83) și (5.104), propuse în această lucrare pentru calculul curenților în conductoarele de protecție și stâlpi, s-au folosit datele prezentate în [37]. Astfel, pentru $Z_{cp_d} = 0,62\Omega$, $Z_{st} = 10\Omega$, respectiv $Z_m = 0,2166\Omega$ și pentru $I_{\bar{d}} = 45531A$, $I_{\bar{d}}' = 38701A$, $I_{\bar{d}}'' = 6830A$, $R_p = R_p' = 0$, $N=30$ stâlpi și $M=170$ stâlpi, rezultatele comparative sunt prezentate în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3 Comparații între valorile obținute cu relațiile propuse și cu relațiile prezentate în [37]

Partea stângă		
Deschiderea	Relațiile (5.82), (5.83), (5.104)	Relațiile prezentate în [37]
3	25119A	25118
15	14040	14039
27	14639	14637

Partea dreaptă		
Deschiderea	Relațiile (5.82), (5.83), (5.104)	Relațiile prezentate în [37]
3	13173	13172
85	2578	2595

De asemenea, tot pentru a verifica relațiile propuse în această lucrare, în tabelul 5.4 se prezintă valorile obținute pentru impedanța echivalentă a circuitului, folosind pentru calculul

acesteia relația (5.112) propusă, respectiv relația $\frac{1}{Z_{NM}} = \frac{1}{Z_N} + \frac{1}{Z_{st}} + \frac{1}{Z_M}$, în care Z_N și Z_M ,

reprezentând impedanțele porțiunilor de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei, se determină cu relația (5.74) preluată din [33]. S-au considerat $Z_{cp_d} = 0,193\Omega$, $Z_{st} = 4\Omega$,

$I_{\bar{d}} = 5000A$, $\frac{I_{\bar{d}}'}{I_{\bar{d}}} = 0,25$ și $R_p = R_p' = 0$. N , reprezintă numărul de stâlpi cuprinși între stâlpul

cu defect și capătul din dreapta al liniei, iar M reprezintă numărul de stâlpi cuprinși între stâlpul cu defect și capătul din stânga al liniei.

Tabelul 5.4 Impedanța circuitului, pentru cazul în care defectul apare la un stâlp oarecare al liniei, este alimentat de la ambele capete și se ține cont de stațiile electrice de la capetele liniei

Pozitia defectului	Z_{NM} calculată din relația (5.112) propusă	Z_{NM} calculată pe baza relației (5.74) preluată din [33]
N=15, M=15	0,43	0,43
N=10, M=20	0,43	0,43
N=5, M=25	0,40	0,40
N=2, M=28	0,3	0,3

Din tabelul 5.4 se poate observa faptul că se obțin aceleași valori pentru impedanța liniei, fapt care dovedește acuratețea modelului prezentat.

5.5 Concluzii

Modelele analitice prezentate în acest capitol, permit estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat în rețelele electrice trifazate de înaltă tensiune. Au fost stabilite expresii ce permit determinarea impedanței echivalente a porțiunilor de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei, în funcție de lungimea fiecărei porțiuni de linie. Cu ajutorul acestor expresii, cunoscând valoarea curentului de scurtcircuit și numărul de stâlpi cuprinși între stâlpul la care a apărut defectul și capetele liniei, se poate determina valoarea curentului de defect care se închide la pământ prin stâlpul cu defect și tensiunea pe stâlpul cu defect.

În [80] este prezentat modul în care poate fi determinată distribuția curentului de scurtcircuit monofazat, atunci când defectul apare la ultimul stâlp al unei linii electrice aeriene, respectiv la un stâlp oarecare al unei linii electrice aeriene, dar este alimentat de la un singur capăt, iar linia respectivă e considerată suficient de lungă pentru a putea neglija condițiile de la capetele liniei analizate. Pornind de la acest model analitic, și ținând cont de cele prezentate în [104], s-a dezvoltat un alt model analitic care să țină cont de existența cuplajului magnetic care există între conductorul de protecție al liniilor de înaltă tensiune și conductorul fazei avariate. S-a îmbunătățit apoi acest model analitic prin considerarea și a cazului în care numărul de stâlpi ai unei linii, cuprinși între locul de defect și capetele liniei, este mai mic decât cel stabilit de relația (5.38), situație în care trebuie să se țină cont de condițiile de la capetele liniei analizate. S-au obținut astfel pentru constantele A și B din expresiile curenților, relațiile originale (5.45).

Au fost apoi stabilite expresii ce permit determinarea impedanței echivalente a porțiunilor de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei, în funcție de lungimea fiecărei porțiuni de linie. Cu ajutorul acestor expresii, cunoscând valoarea curentului de scurtcircuit și numărul de stâlpi cuprinși între stâlpul la care a apărut defectul și capetele liniei, se poate determina valoarea curentului de defect care se închide la pământ prin stâlpul cu defect și tensiunea pe stâlpul cu defect.

S-au determinat apoi, pornind de la modelul analitic prezentat în [25], relații originale ce permit estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat pentru situația prezentată în figura 5.1b), adică pentru cazul în care defectul este alimentat din ambele părți și numărul de stâlpi cuprinși între locul de defect și capetele liniei este mai mic decât cel stabilit de relația (5.38) și deci e necesar să se țină cont de condițiile de la capetele liniei analizate. Și în acest caz, au fost stabilite expresii originale pentru impedanța echivalentă a porțiunilor de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei analizate, în funcție de lungimea acestora.

Cele mai importante concluzii care au apărut din analiza rezultatelor numerice obținute cu expresiile prezentate, sunt:

1. Impedanța mutuală dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate, reduce impedanța totală a circuitului. În aceste condiții, valoarea curentului total de defect va fi mai mare dacă se neglijează prezența impedanței mutuale. Din cele prezentate, se poate observa că termenul cu care se reduce curentul de defect datorită prezenței cuplajului mutual este $(1 - \nu)$, unde ν reprezintă coeficientul de cuplaj dintre conductorul fazei avariate și conductorul de protecție al liniei. De asemenea, s-a arătat că datorită cuplajului magnetic, curentul de defect se va închide la pământ printr-un număr mai mare de stâlpi față de cazul în care se neglijează cuplajul magnetic.
2. S-a putut observa influența puternică pe care o au valorile impedanțelor conductorului de protecție și stâlpilor asupra modului de distribuție a curentului de defect.
3. Rezultatele numerice obținute cu expresiile stabilite pentru determinarea impedanței echivalente a liniei, în cazul în care aceasta are un număr de stâlpi mai mare decât cel dat de relația (5.38), au fost comparate cu rezultate numerice obținute cu expresiile date în [33] și [71]. Aceste rezultate sunt identice.
4. Analizând rezultatele numerice obținute cu expresiile impedanțelor echivalente (5.72) și (5.74), se pot stabili anumite concluzii legate de tensiunea pe stâlpul cu defect. Atunci când defectul apare la un stâlp oarecare al unei linii electrice aeriene, iar numărul de stâlpi cuprinși între locul de defect și capetele liniei este mai mare decât cel dat de relația (5.38),

tensiunea pe stâlpul cu defect depinde doar de valoarea curentului de defect și de valorile impedanțelor conductorului de protecție și ale stâlpilor și nu depinde de valorile impedanțelor de la capetele liniei. Deoarece impedanțele conductorului de protecție și ale stâlpilor nu variază, se poate spune că, în acest caz, tensiunea pe stâlpul cu defect depinde doar de valoarea curentului de defect. Astfel, cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect apare atunci când curentul de defect are valoarea cea mai mare, iar defectul apare pe faza aflată la distanța cea mai mare de conductorul de protecție, ținând cont de faptul că un cuplaj mutual mai slab între faza cu defect și conductorul de protecție, determină o cădere de tensiune mai mare pe stâlp. De exemplu, pentru o dispunere verticală a fazelor, trebuie considerată faza situată pe poziția cea mai de jos.

5. În cazul în care una din cele două porțiuni de linie cuprinsă între locul de defect și capetele liniei nu poate fi considerată lungă, pentru a stabili locul de defect ce va determina cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect, numit locul cel mai dezavantajos, e necesar să se țină cont de impedanța de la capătul respectivei porțiuni de linie Z_p . În aceste condiții, pe baza rezultatelor obținute, se poate spune că, atunci când $Z_p < Z_c$, impedanța echivalentă a porțiunii de linie scade pe măsură ce defectul se apropie de capătul liniei, pe când dacă $Z_p > Z_c$, impedanța respectivă crește. Impedanța echivalentă a celeilalte porțiuni de linie, va fi întotdeauna mai mică, pe măsură ce defectul se apropie de capătul liniei. În aceste condiții, locul de defect ce va determina cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect, poate fi la stâlpul liniei aflat la aproximativ

$$N = \frac{4}{\sqrt{K}}, \text{ dacă } Z_p < Z_c; \text{ dacă } Z_p > Z_c, \text{ atunci cel mai dezavantajos loc de defect poate}$$

fi, fie pe linie, la aproximativ $N = \frac{4}{\sqrt{K}}$, fie la capătul liniei, depinzând de raportul valorilor celor două componente ale curentului de defect. Pentru întreaga linie, se poate trage concluzia că dacă $Z_p < Z_c$ și $Z_p' < Z_c$, atunci cel mai dezavantajos loc de defect va fi la mijlocul liniei. Dacă pentru oricare din capete $Z_p > Z_c$, cele spuse rămân valabile, dar trebuie verificat și primul stâlp al liniei.

6. În ceea ce privește cazul în care ambele porțiuni de linie au un număr de stâlpi mai mic decât cel dat de relația (5.38), locul de defect cel mai dezavantajos din punct de vedere al tensiunii pe stâlpul cu defect, depinde de mai mulți factori: de lungimea liniei, de raportul

celor două componente ale curentului de defect $\frac{I_d}{I_d'}$, de rapoartele $\frac{Z_p}{Z_c}$ și $\frac{Z_p'}{Z_c}$. Cea mai

simplă metodă de poziționare a locului de defect ce va determina cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect, constă în a compara tensiunile pentru cazurile în care defectul apare la primul stâlp, de la ambele capete, cu cazul în care defectul apare la mijlocul liniei. În acest sens, se poate urmări figura 5.25, în care sunt date valorile tensiunilor obținute considerând un curent de defect constant și $\frac{I'_d}{I_d} = 0.25$ și $R_p = R'_p$.

CAP.6 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

Consecință a cerinței justificate de continuitate și siguranță în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor, apare necesitatea tot mai mare de îmbunătățire a fiabilității și siguranței în funcționare a rețelelor electrice. Cauza discontinuității serviciului de alimentare cu energie electrică o constituie incidentele. Ponderea cea mai mare a defectelor în rețelele electrice cu neutrul legat direct la pământ, o reprezintă scurtcircuiturile monofazate. Elementele cel mai des expuse defectelor, sunt liniile electrice aeriene. Determinarea curentului de scurtcircuit cu tehnica prezentată în capitolul 1 al acestei lucrări, conduce la determinarea curentului la locul de scurtcircuit și nu a curenților prin elementele longitudinale de rețea, pentru determinarea acestora fiind necesară parcurgerea altei etape, care presupune determinarea repartiției curentului de defect, apelând la teoremele lui Kirchoff.

Din aceste motive, în lucrarea de față s-a abordat problema estimării repartiției curentului de scurtcircuit monofazat în rețelele electrice cu linii aeriene de înaltă tensiune. Această distribuție este condiționată de structura rețelei, de particularitățile funcționale și constructive ale elementelor componente și de parametrii schemelor echivalente. Defectul nu interesează sub aspectul regimului tranzitoriu, ci staționar, de aceea intervin parametrii rețelei și nu cei tranzitorii ai liniei. Dintre parametrii schemei echivalente, se remarcă impedanța de secvență homopolară, care diferă substanțial de impedanțele corespunzătoare celorlalte secvențe. Ținând cont de acest lucru, în această lucrare s-a acordat o atenție deosebită impedanței de secvență homopolară a elementelor de rețea.

S-a prezentat mai întâi o sinteză a parametrilor de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor. Au fost prezentate schemele echivalente și parametrii de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor trifazate și s-a evidențiat rolul conexiunii înfășurărilor și al construcției circuitului magnetic.

Au fost apoi furnizate, într-un mod sintetizat, formulele aproximative de calcul al impedanțelor proprii și mutuale ale buclelor monofazate conductor-pământ, prezentate în literatura de specialitate. S-au efectuat comparații între rezultatele numerice oferite de aceste aproximări și s-a prezentat influența diverșilor factori asupra acestor impedanțe: influența înălțimii conductoarelor față de suprafața solului, influența diametrului conductorului și influența rezistivității electrice a solului.

S-a prezentat modul de calcul al impedanței de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene trifazate, cu simplu și dublu circuit.. Ținând cont că această impedanță depinde de mai mulți factori, printre care prezența conductoarelor de protecție, înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, diametrul conductorului, rezistivitatea electrică a solului, s-a prezentat o analiză a influenței acestor factori asupra impedanței de secvență homopolară a liniilor electrice aeriene.

Scurtcircuitul monofazat este un defect transversal, iar prin calcul se determină curentul de scurtcircuit transversal, la locul de defect, utile fiind însă și valorile curenților prin elementele longitudinale ale liniei. În acest sens, au fost dezvoltate modele analitice pentru estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat în rețelele electrice trifazate de înaltă tensiune. Pe baza acestor modele analitice dezvoltate în capitolul 5 al acestei lucrări, se poate determina distribuția curentului de defect datorat unei puneri la pământ prin arc sau unui trăsnet, când curentul de defect se închide la pământ prin baza stâlpului defect, dar și prin conductoarele de protecție și prin ceilalți stâlpi. Se pot astfel determina curenții în stâlpii liniei electrice, în porțiunile de conductor de protecție adiacente, tensiunile pe stâlpii liniei electrice, respectiv curenții care se întorc spre neutrul surselor. În cazul în care interesează doar tensiunea pe stâlpul cu defect, aceasta poate fi determinată direct, dacă se cunoaște impedanța echivalentă a circuitului corespunzător, valoarea curentului de defect și impedanța mutuală dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate. În acest sens, au fost deduse expresii pentru calculul impedanțelor echivalente. De impedanța mutuală dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate s-a ținut cont prin coeficientul de cuplaj, care reprezintă raportul dintre impedanța mutuală dintre cele două conductoare și impedanța conductorului de protecție.

Dintre concluziile cele mai importante ale lucrării, se pot enumera:

S-a pus în evidență faptul că rezistența căii de întoarcere prin pământ nu depinde practic de rezistivitatea electrică a solului. Această concluzie, cunoscută (Carson, Uliyanov, Edith etc), poate fi explicată ținând cont de distribuția curentului prin pământ. Pe baza unor cercetări teoretice și experimentale ([3], [36], [46]), s-a stabilit că densitatea curentului în sol variază direct proporțional cu conductibilitatea solului, adică invers proporțional cu rezistivitatea electrică a solului. Astfel, la variația conductibilității solului variază și densitatea curentului prin pământ; în aceste condiții, pierderile de putere activă, la o frecvență dată a curentului, rămân aproape constante.

Existența conductoarelor de protecție legate la pământ, poate modifica substanțial valorile parametrilor de secvență homopolară ai liniei electrice aeriene trifazate. Dacă conductorul de protecție este realizat din materiale cu rezistență scăzută (cupru, aluminiiu, oțel-aluminiiu), influența lui este foarte puternică și trebuie luată în considerare la determinarea reactanței de secvență homopolară a LEA trifazate.

În ceea ce privește valoarea rezistenței de secvență homopolară a liniei, în cazul conductoarelor de protecție cu rezistențe mici, cum este cazul conductorului de protecție din *AL-OL*, această valoare scade. Valoarea rezistenței de secvență homopolară scade cu maximum 10% și cu cât rezistivitatea electrică a solului este mai mare, cu atât prezența conductorului de protecție influențează mai puțin valoarea rezistenței de secvență homopolară. S-a arătat că în cazul în care LEA sunt prevăzute cu conductoare de protecție din aluminiiu-oțel, acestea conduc la scăderea reactanței de secvență homopolară cu până la 50%.

Conductorul de protecție din oțel, având o rezistență mare, reduce impedanța homopolară a liniei cu aproximativ (5-8)%. În majoritatea calculelor practice ale curenților de scurtcircuit, se neglijează rezistența conductoarelor liniilor. Pentru linii cu conductoare de protecție din oțel, această ipoteză în evaluarea impedanței de secvență a liniei poate conduce la o eroare însemnată, deoarece valoarea reactanței de succesiune homopolară a liniei depinde de rezistența conductorului de protecție. Astfel, în analiza efectuată s-a arătat că neglijarea rezistenței conductorului de protecție din oțel conduce la valori ale reactanței de secvență homopolară mai mici cu aproximativ (15-20)%. Dacă se neglijează cu totul prezența conductorului de protecție din oțel, se obțin valori ale reactanței de secvență homopolară mai mari cu până la 15% față de valorile calculate în prezența conductorului de protecție. Trebuie de asemenea precizat că, datorită faptului că rezistența și reactanța interioară a conductoarelor de oțel depind de permeabilitatea magnetică a materialului, care depinde de intensitatea câmpului magnetic - dependentă de intensitatea curentului electric din conductor, pentru calcule de precizie trebuie ca valorile rezistenței și reactanței interioare a conductorului din oțel să se considere după tabelele obținute pe cale experimentală, pentru fiecare marcă a materialului dat. Pentru cazul de față, valorile prezentate au fost calculate pentru un conductor de protecție din oțel marca *TK-70*. Pentru aceste conductoare, se poate spune că ele conduc la o mărire a valorii rezistenței homopolare a liniei cu peste 50% și la o scădere a valorii reactanței homopolare a liniei cu până la 15%. Aceste rezultate sunt în concordanță cu rezultatele prezentate în literatura de specialitate ([13], [101]).

Din analiza prezentată, s-a putut observa, de asemenea, influența rezistivității electrice a solului asupra rezistenței și reactanței de secvență homopolară a liniei electrice. Astfel, dacă

la o rezistivitate a solului de $100 \Omega m$, reactanța liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel, este $0,995 \Omega/km$, la o rezistivitate a solului de $500 \Omega m$, valoarea acesteia crește cu aproximativ 13%, fiind $1,125 \Omega/km$. Dacă conductorul de protecție este din *AL-OL*, atunci creșterea e de 8%. În ceea ce privește rezistența homopolară a liniei prevăzută cu conductor de protecție din oțel, la o rezistivitate a solului de $100 \Omega m$ aceasta este de $0,158 \Omega/km$, iar la o rezistivitate a solului de $500 \Omega m$, aceasta este $0,167 \Omega/km$, adică o creștere de 5%.

S-a putut observa influența impedanței mutuale dintre cele două circuite ale liniei. S-a arătat că valorile rezistenței și reactanței de succesiune homopolară ale liniei sunt mai mari în cazul în care se ține cont de cuplajul magnetic dintre cele două circuite. Ca urmare, impedanța de succesiune homopolară a fiecărui circuit al unei linii electrice aeriene cu dublu circuit se mărește (la trecerea curenților prin ambele circuite în aceeași direcție), datorită inducției mutuale dintre conductoarele circuitelor paralele. Valorile rezistenței și reactanței homopolare ale liniei electrice, conform valorilor obținute, sunt mai mari cu aproximativ 10%. Calculele efectuale au arătat faptul că prezența conductorului de protecție influențează impedanța mutuală de secvență homopolară dintre circuitele de transport paralele. Cu conductor de protecție, reactanța mutuală este 47% din reactanța proprie a fiecărui circuit; fără conductor de protecție, ea este aproximativ 60% din reactanța proprie.

În ceea ce privește influența înălțimii conductoarelor față de suprafața solului, s-a arătat că eroarea făcută prin neglijarea termenilor care conțin înălțimea conductoarelor față de suprafața solului, atât în expresiile rezistențelor proprii și mutuale, cât și în expresiile reactanțelor proprii și mutuale, este sub 2%. S-a arătat, de asemenea, că rezistența de secvență homopolară a liniei electrice este independentă de distanța orizontală dintre conductoarele celor două circuite, iar în ceea ce privește valoarea reactanței de secvență homopolară, s-a arătat că aceasta depinde de distanța dintre conductoarele celor două circuite, deci reactanța mutuală dintre cele două circuite influențează valoarea reactanței homopolare a liniei.

În urma analizei efectuate în capitolul 5, s-a arătat că impedanța mutuală dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate reduce impedanța totală a circuitului. În aceste condiții, valoarea curentului total de defect va fi mai mare dacă se neglijează prezența impedanței mutuale. Din cele prezentate, se poate observa că termenul cu care se reduce curentul de defect datorită cuplajului mutual este $(1 - \nu)$, unde ν reprezintă coeficientul de cuplaj dintre conductorul de protecție și conductorul fazei avariate. De asemenea, s-a arătat că datorită cuplajului magnetic dintre conductorul fazei avariate și conductorul de protecție al liniei, curentul de defect se va închide la pământ printr-un număr mai mare de stâlpi decât în cazul în care se neglijează cuplajul magnetic.

A fost pusă în evidență, pe baza rezultatelor numerice, influența puternică pe care o au valorile impedanțelor conductorului de protecție și stâlpilor asupra modului de distribuție a curentului de defect.

Analizând rezultatele numerice obținute cu expresiile impedanțelor echivalente (5.72) și (5.74), se pot stabili anumite concluzii legate de tensiunea pe stâlpul cu defect. Atunci când defectul apare la un stâlp oarecare al unei linii electrice aeriene, iar numărul de stâlpi cuprinși între locul de defect și capetele liniei este mai mare decât cel dat de relația (5.38), tensiunea pe stâlpul cu defect depinde doar de valoarea curentului de defect și de valorile impedanțelor conductorului de protecție și ale stâlpilor și nu depinde de valorile impedanțelor de la capetele liniei. Deoarece impedanțele conductorului de protecție și ale stâlpilor nu variază, se poate spune că, în acest caz, tensiunea pe stâlpul cu defect depinde doar de valoarea curentului de defect. Astfel, cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect apare atunci când curentul de defect are valoarea cea mai mare, iar defectul apare pe faza aflată la distanța cea mai mare de conductorul de protecție, ținând cont de faptul că un cuplaj mutual mai slab între faza cu defect și conductorul de protecție, determină o cădere de tensiune mai mare pe stâlp. De exemplu, pentru o dispunere verticală a fazelor, trebuie considerată faza situată pe poziția cea mai de jos.

În cazul în care una din cele două porțiuni de linie cuprinsă între locul de defect și capetele liniei nu poate fi considerată lungă, pentru a stabili locul de defect ce va determina cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect, numit locul cel mai dezavantajos, e necesar să se țină cont de impedanța de la capătul respectivei porțiuni de linie Z_p . În aceste condiții, pe baza rezultatelor obținute, se poate spune că, atunci când $Z_p < Z_c$, impedanța echivalentă a porțiunii de linie scade pe măsură ce defectul se apropie de capătul liniei, pe când dacă $Z_p > Z_c$, impedanța respectivă crește. Impedanța echivalentă a celeilalte porțiuni de linie, va fi întotdeauna mai mică, pe măsură ce defectul se apropie de capătul liniei. În aceste condiții, locul de defect ce va determina cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect, poate fi la stâlpul N al liniei aflat la aproximativ $N = \frac{4}{\sqrt{K}}$, dacă $Z_p < Z_c$; dacă $Z_p > Z_c$, atunci cel mai dezavantajos loc de defect poate fi, fie pe linie, la aproximativ $N = \frac{4}{\sqrt{K}}$, fie la capătul liniei, depinzând de raportul valorilor celor două componente ale curentului de defect. Pentru întreaga linie, se poate trage concluzia că dacă $Z_p < Z_c$ și $Z_p' <$

Z_c , atunci cel mai dezavantajos loc de defect va fi la mijlocul liniei. Dacă pentru oricare din capete $Z_p > Z_c$, cele spuse rămân valabile, dar trebuie verificat și primul stâlp al liniei.

În ceea ce privește cazul în care ambele porțiuni de linie au un număr de stâlpi mai mic decât cel dat de relația (5.38), locul de defect cel mai dezavantajos din punct de vedere al tensiunii pe stâlpul cu defect, depinde de mai mulți factori: de lungimea liniei, de raportul celor două componente ale curentului de defect $\frac{I_d'}{I_d''}$, de rapoartele $\frac{Z_p}{Z_c}$ și $\frac{Z_{p'}}{Z_c}$. Cea mai simplă metodă de poziționare a locului de defect ce va determina cea mai mare valoare a tensiunii pe stâlpul cu defect, constă în a compara tensiunile pentru cazurile în care defectul apare la primul stâlp, de la ambele capete, cu cazul în care defectul apare la mijlocul liniei.

Contribuții ale autoarei:

S-a prezentat un studiu complet, documentat și cu contribuții originale, asupra parametrilor de secvență homopolară ai buclelor monofazate conductor-pământ și ai liniilor electrice aeriene. În acest sens, s-a făcut mai întâi o sinteză a formulelor aproximative de calcul al parametrilor buclelor monofazate conductor-pământ, stabilite de diferiți autori și s-au prezentat rezultatele numerice obținute cu acestea, rezultate ce pot permite comparații, atât calitative cât și cantitative. S-a evidențiat faptul că, la frecvența de 50Hz, valorile obținute cu aceste formule, date de diferiți autori, nu diferă foarte mult, ceea ce înseamnă că la această frecvență pot fi folosite oricare dintre ele, diferența fiind dată de timpul necesar implementării acestora pe calculator. Din acest punct de vedere, relațiile lui Sunde au fost cel mai ușor de implementat. Au fost prezentate apoi rezultate numerice, reprezentate grafic, care să scoată în evidență influența diverșilor factori asupra parametrilor buclelor monofazate conductor-pământ. Pentru o mai bună punere în evidență a acestei influențe, rezultatele numerice au fost prezentate atât pentru impedanța de secvență homopolară, cât și pentru componentele rezistivă și reactivă ale acesteia.

S-a făcut o sinteză a modului de determinare a impedanței de secvență homopolară a LEA trifazate, cu simplu circuit, cu dublu circuit, prevăzute cu unul, respectiv cu mai multe conductoare de protecție. Prin exemplificare pe un caz concret, s-au prezentat multe exemple numerice, deficitare în literatura de specialitate, ce permit o analiză completă a influenței diverșilor factori asupra impedanței de secvență homopolară a LEA trifazate. S-a insistat pe influența conductorului de protecție și a rezistivității electrice a solului, asupra acestei impedanțe. Au fost confirmate în acest sens valori cunoscute, dar s-a făcut o prezentare mai amplă, ținând cont că, în general, în literatura de specialitate valorile impedanțelor liniilor

sunt date pentru o rezistivitate electrică a solului de $100 \Omega m$. Astfel, s-au prezentat valorile impedanței homopolare ale liniei pentru o gamă largă de valori ale rezistivității, pornind de la câțiva zeci de ohmi și până la mii de ohmi. În acest sens, pe baza rezultatelor numerice și din reprezentarea lor grafică, se poate urmări, atât calitativ cât și cantitativ, influența conductorului de protecție al LEA și a rezistivității electrice a solului, asupra impedanței de secvență homopolară a LEA, dar și asupra componentelor rezistivă și reactivă ale acesteia.

S-au dezvoltat modele analitice pentru estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat în rețelele electrice trifazate de înaltă tensiune. Astfel, pornind de la modelul analitic prezentat în [80], cu ajutorul căruia se poate determina repartiția curentului de scurtcircuit monofazat ce apare pe o linie electrică aeriană considerată de lungime mare, când defectul este alimentat de la un singur capăt, și ținând cont de cele prezentate în [104], s-a dezvoltat un model analitic care să țină cont și de existența cuplajului magnetic care există între conductorul de protecție al liniilor de înaltă tensiune și conductorul fazei avariate. Prin rezultatele numerice prezentate s-a evidențiat faptul că datorită acestui cuplaj magnetic, curentul se închide la pământ printr-un număr de stâlpi mai mare decât în cazul în care nu se ține cont de el. De asemenea, s-a completat modelul dezvoltat de [80], pentru cazul în care defectul apare la ultimul stâlp, ținând cont și de instalația de legare la pământ a stației electrice. S-a îmbunătățit apoi acest model analitic prin considerarea și a cazului în care numărul de stâlpi ai unei linii, cuprinși între locul de defect și capetele liniei, este mai mic decât cel stabilit de relația (5.38), situație în care trebuie să se țină cont de condițiile de la capetele liniei analizate. S-au stabilit astfel relații originale, ce permit estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat în această situație. Pe baza acestor relații, a fost dedusă apoi o expresia originală pentru determinarea impedanței echivalente a porțiunii de linie cuprinsă între locul de defect și capătul liniei.

S-au determinat apoi relații originale ce permit estimarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat, pentru cazul în care defectul apare la un stâlp oarecare al liniei și este alimentat de la ambele capete, iar numărul de stâlpi cuprinși între locul de defect și capetele liniei este mai mic decât cel stabilit de relația (5.38) și deci e necesar să se țină cont de condițiile de la capetele liniei analizate. Și în acest caz s-au stabilit expresii originale pentru impedanța echivalentă a liniilor, în funcție de lungimea acestora.

S-a făcut o sinteză a diferitelor expresii ce permit determinarea impedanței echivalente a porțiunilor de linie cuprinse între locul de defect și capetele liniei, în funcție de lungimea fiecărei porțiuni de linie, date în literatura de specialitate. Cu ajutorul acestor expresii, cunoscând valoarea curentului de scurtcircuit și numărul de stâlpi cuprinși între stâlpul la care

a apărut defectul și capetele liniei, se poate determina valoarea curentului de defect care se închide la pământ prin stâlpul cu defect și tensiunea pe stâlpul cu defect. Pentru a verifica acuratețea modelelor propuse, s-au prezentat comparații între rezultatele obținute folosind aceste expresii din literatura de specialitate și rezultatele obținute cu relațiile propuse.

Pentru toate situațiile descrise au fost prezentate rezultate numerice, ce permit analize cantitative. Modelele propuse permit o mai ușoară implementare în software și necesită timp de procesare aferent algoritmilor mai redus.

Anexa A1. Parametrii buclelor monofazate conductor - pământ

Tabelul A1.1

Rezistența căii de întoarcere prin sol - în $[\Omega/\text{km}]$ - dacă se consideră un singur conductor ce face parte dintr-o buclă având solul drept cale de întoarcere, în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, la frecvența de 50 Hz.
Valori obținute cu seriile lui Carson.

h [m]	1	5	10	15	20	25	30	35	40
ρ [Ωm]									
1	0,0485	0,0447	0,0408	0,0376	0,0349	0,0325	0,0304	0,0285	0,0266
10	0,0493	0,0479	0,0464	0,0449	0,0436	0,0424	0,0412	0,0401	0,0391
50	0,0495	0,0488	0,0481	0,0474	0,0467	0,046	0,0454	0,0447	0,0442
100	0,0495	0,0491	0,0485	0,048	0,0475	0,047	0,0465	0,046	0,0456
150	0,0495	0,0492	0,0487	0,0483	0,0479	0,0474	0,047	0,0466	0,0463
200	0,0496	0,0492	0,0488	0,0485	0,0481	0,0477	0,0474	0,047	0,0467
300	0,0496	0,0493	0,049	0,0487	0,0484	0,0481	0,0478	0,0475	0,0472
500	0,0496	0,0494	0,0491	0,0489	0,0486	0,0484	0,0482	0,0479	0,0477
750	0,0496	0,0494	0,0492	0,049	0,0488	0,0486	0,0484	0,0482	0,048
1000	0,0496	0,0495	0,0495	0,0491	0,0489	0,0487	0,0486	0,0484	0,0482
10000	0,0496	0,0496	0,0495	0,0495	0,0494	0,0493	0,0493	0,0492	0,0492

Notă:

- h [m] – reprezintă înălțimea conductorului față de suprafața solului;
- ρ [Ωm] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului.

Anexa A1. (continuare)

Tabelul A1.2

Rezistența căii de întoarcere prin sol - în [Ω/km] - dacă se consideră un singur conductor ce face parte dintr-o buclă având solul drept cale de întoarcere, în funcție de înălțimea conductorului față de suprafața solului și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, la frecvența de 50 Hz.

Valori obținute cu relațiile lui Sunde.

h [m]	0,1	5	10	15	20	25	30	35	40
ρ [Ωm]									
1	0,0493	0,0452	0,0416	0,0385	0,0358	0,0334	0,0312	0,0293	0,0276
10	0,0493	0,048	0,0467	0,0454	0,0442	0,0431	0,042	0,0409	0,0399
50	0,0493	0,0487	0,0481	0,0475	0,0469	0,0464	0,0458	0,0453	0,0447
100	0,0493	0,0489	0,0485	0,0481	0,0476	0,0472	0,0468	0,0464	0,046
150	0,0493	0,049	0,0486	0,0483	0,0479	0,0476	0,0473	0,0469	0,0466
200	0,0493	0,049	0,0487	0,0484	0,0481	0,0478	0,0475	0,0472	0,0469
300	0,0493	0,0491	0,0488	0,0486	0,0483	0,0481	0,0479	0,0476	0,0474
500	0,0493	0,0492	0,049	0,0488	0,0486	0,0484	0,0482	0,048	0,0478
1000	0,0493	0,0492	0,0491	0,0489	0,0488	0,0487	0,0485	0,0484	0,0483
10000	0,0493	0,0493	0,0493	0,0492	0,0492	0,0491	0,0491	0,049	0,049

Notă:

- h [m] – reprezintă înălțimea conductorului față de suprafața solului;
- ρ [Ωm] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului.

Anexa A1 (continuare)

Tabelul A1.3

Reactanța proprie a unei bucle monofazate conductor-pământ, în [Ω/km].

Valori obținute cu seriile lui Carson

h	d [cm]		0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	h	ρ [Ωm]											
h=5m	1	0,7101	0,6666	0,6231	0,5976	0,5796	0,5656	0,5541	0,5444	0,5361	0,5287	0,5221	
	10	0,7786	0,7351	0,6916	0,6661	0,6481	0,6341	0,6226	0,6129	0,6045	0,5971	0,5905	
	100	0,8497	0,9062	0,7626	0,7372	0,7191	0,7051	0,6936	0,684	0,6756	0,6682	0,6616	
	1000	0,9216	0,878	0,9345	0,8091	0,791	0,777	0,7655	0,7559	0,7475	0,7401	0,7335	
h=10m	1	0,7154	0,6719	0,6283	0,6029	0,5848	0,5708	0,5594	0,5497	0,5413	0,5339	0,5273	
	10	0,7804	0,7369	0,6934	0,6679	0,6499	0,6358	0,6244	0,6147	0,6063	0,5989	0,5923	
	100	0,8503	0,8067	0,7632	0,7378	0,7197	0,7057	0,6942	0,6845	0,6762	0,6688	0,6622	
	1000	0,9217	0,8782	0,8347	0,8092	0,7912	0,7772	0,7657	0,756	0,7477	0,7403	0,7336	
h=15m	1	0,7202	0,6767	0,6332	0,6077	0,5897	0,5757	0,5642	0,5545	0,5462	0,5388	0,5321	
	10	0,7822	0,7386	0,6951	0,6697	0,6516	0,6376	0,6261	0,6165	0,6081	0,6007	0,5941	
	100	0,8508	0,8073	0,7638	0,7383	0,7203	0,7063	0,6948	0,6851	0,6767	0,6693	0,6627	
	1000	0,9219	0,8784	0,8349	0,8094	0,7914	0,7774	0,7659	0,7562	0,7478	0,7404	0,7338	
h=20m	1	0,7248	0,6813	0,6378	0,6123	0,5943	0,5802	0,5688	0,5591	0,5507	0,5433	0,5367	
	10	0,7839	0,7403	0,6968	0,6714	0,6533	0,6393	0,6278	0,6182	0,6098	0,6024	0,5958	
	100	0,8514	0,8079	0,7644	0,7389	0,7208	0,7068	0,6954	0,6857	0,6773	0,6699	0,6633	
	1000	0,9221	0,8786	0,8351	0,8096	0,7916	0,7775	0,7661	0,7564	0,748	0,7406	0,734	
h=25m	1	0,7291	0,6856	0,6421	0,6166	0,5986	0,5846	0,5731	0,5634	0,5551	0,5477	0,541	
	10	0,7855	0,742	0,6985	0,673	0,655	0,6409	0,6295	0,6198	0,6114	0,604	0,5974	
	100	0,852	0,8084	0,7649	0,7395	0,7214	0,7074	0,6959	0,6863	0,6779	0,6705	0,6639	
	1000	0,9223	0,8788	0,8353	0,8098	0,7917	0,7777	0,7663	0,7566	0,7482	0,7408	0,7342	
h=30m	1	0,7332	0,6897	0,6462	0,6207	0,6027	0,5887	0,5772	0,5675	0,5592	0,5518	0,5452	
	10	0,7871	0,7436	0,7001	0,6746	0,6566	0,6426	0,6311	0,6214	0,6131	0,6057	0,599	
	100	0,8525	0,809	0,7655	0,74	0,722	0,7079	0,6965	0,6868	0,6784	0,671	0,6644	
	1000	0,9225	0,879	0,8354	0,81	0,7919	0,7779	0,7665	0,7568	0,7484	0,741	0,7344	

h	d [cm]		0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
		ρ [Ω m]											
h=35m	1		0,7372	0,6937	0,6502	0,6247	0,6066	0,5926	0,5812	0,5715	0,5631	0,5557	0,5491
	10		0,7887	0,7452	0,7017	0,6762	0,6582	0,6442	0,6327	0,623	0,6146	0,6072	0,6006
	100		0,8531	0,8096	0,766	0,7406	0,7225	0,7085	0,6971	0,6874	0,679	0,6716	0,665
	1000		0,9227	0,8791	0,8356	0,8102	0,7921	0,7781	0,7666	0,757	0,7486	0,7412	0,7346
h=40m	1		0,7411	0,6975	0,654	0,6286	0,6105	0,5965	0,585	0,5754	0,567	0,5596	0,553
	10		0,7903	0,7468	0,7032	0,6778	0,6597	0,6457	0,6343	0,6246	0,6162	0,6088	0,6022
	100		0,8536	0,8101	0,7666	0,7411	0,7231	0,7091	0,6976	0,6879	0,6795	0,6722	0,6655
	1000		0,9228	0,8793	0,8358	0,8103	0,7923	0,7783	0,7668	0,7571	0,7488	0,7414	0,7347

Notă:

- d [cm] – reprezintă diametrul conductorului;
- h [m] – reprezintă înălțimea conductorului față de suprafața solului;
- ρ [Ω m] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului.

Anexa A1 (continuare)

Tabelul A1.4

Reactanța proprie a unei bucle monofazate conductor-pământ în [Ω/km].
Valori obținute cu formulele lui Sunde.

h	d [cm]		0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	h	ρ [Ωm]											
h=5m	1	1	0,7142	0,6706	0,6271	0,6016	0,5835	0,5695	0,558	0,5484	0,54	0,5326	0,5259
	10	10	0,7835	0,74	0,6964	0,6709	0,6528	0,6388	0,6274	0,6177	0,6093	0,6019	0,5953
	100	100	0,8549	0,8113	0,7678	0,7423	0,7242	0,7102	0,6988	0,6891	0,6807	0,6733	0,6667
	1000	1000	0,9269	0,8834	0,8398	0,8143	0,7963	0,7822	0,7708	0,7611	0,7527	0,7453	0,7387
h=10m	1	1	0,7185	0,675	0,6314	0,6059	0,5878	0,5738	0,5624	0,5527	0,5443	0,5369	0,5303
	10	10	0,7849	0,7413	0,6978	0,6723	0,6542	0,6402	0,6288	0,6191	0,6107	0,6033	0,5967
	100	100	0,8553	0,8118	0,7682	0,7427	0,7247	0,7107	0,6992	0,6895	0,6811	0,6737	0,6671
	1000	1000	0,9271	0,8835	0,84	0,8145	0,7964	0,7824	0,7709	0,7612	0,7529	0,7455	0,7388
h=15m	1	1	0,7227	0,6792	0,6356	0,6101	0,5921	0,578	0,5666	0,5569	0,5485	0,5411	0,5345
	10	10	0,7863	0,7427	0,6992	0,6737	0,6556	0,6416	0,6302	0,6205	0,6121	0,6047	0,5981
	100	100	0,8558	0,8122	0,7687	0,7432	0,7251	0,7111	0,6996	0,69	0,6816	0,6742	0,6675
	1000	1000	0,9272	0,8837	0,8401	0,8146	0,7965	0,7825	0,7711	0,7614	0,753	0,7456	0,739
h=20m	1	1	0,7268	0,6833	0,6397	0,6142	0,5962	0,5821	0,5707	0,561	0,5526	0,5452	0,5386
	10	10	0,7877	0,7441	0,7006	0,6751	0,657	0,643	0,6315	0,6218	0,6135	0,6061	0,5994
	100	100	0,8562	0,8127	0,7691	0,7436	0,7256	0,7115	0,7001	0,6904	0,682	0,6746	0,668
	1000	1000	0,9273	0,8838	0,8402	0,8148	0,7967	0,7827	0,7712	0,7615	0,7531	0,7457	0,7391
h=25m	1	1	0,7307	0,6872	0,6436	0,6182	0,6001	0,5861	0,5746	0,5649	0,5565	0,5491	0,5425
	10	10	0,789	0,7455	0,7019	0,6765	0,6584	0,6444	0,6329	0,6232	0,6148	0,6074	0,6008
	100	100	0,8567	0,8131	0,7695	0,7441	0,726	0,712	0,7005	0,6908	0,6824	0,675	0,6684
	1000	1000	0,9275	0,8839	0,8404	0,8149	0,7968	0,7828	0,7714	0,7617	0,7533	0,7459	0,7393
h=30m	1	1	0,7345	0,691	0,6474	0,6219	0,6039	0,5898	0,5784	0,5687	0,5603	0,5529	0,5463
	10	10	0,7904	0,7468	0,7033	0,6778	0,6597	0,6457	0,6343	0,6246	0,6162	0,6088	0,6022
	100	100	0,8571	0,8135	0,77	0,7445	0,7264	0,7124	0,701	0,6913	0,6829	0,6755	0,6689
	1000	1000	0,9276	0,8841	0,8405	0,815	0,797	0,7829	0,7715	0,7618	0,7534	0,746	0,7394

d [cm]		0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
h	ρ [Ω m]											
h=35m	1	0,7381	0,6946	0,651	0,6256	0,6075	0,5935	0,582	0,5723	0,5639	0,5565	0,5499
	10	0,7918	0,7482	0,7046	0,6792	0,6611	0,6471	0,6356	0,6259	0,6175	0,6101	0,6035
	100	0,8575	0,814	0,7704	0,745	0,7269	0,7129	0,7014	0,6917	0,6833	0,6759	0,6693
	1000	0,9278	0,8842	0,8407	0,8152	0,7971	0,7831	0,7716	0,7619	0,7536	0,7462	0,7395
h=40m	1	0,7416	0,6981	0,6545	0,629	0,611	0,5969	0,5855	0,5758	0,5674	0,56	0,5534
	10	0,7931	0,7495	0,706	0,6805	0,6624	0,6484	0,637	0,6273	0,6189	0,6115	0,6049
	100	0,858	0,8144	0,7709	0,7454	0,7273	0,7133	0,7018	0,6922	0,6838	0,6764	0,6697
	1000	0,9279	0,8843	0,8408	0,8153	0,7972	0,7832	0,7718	0,7621	0,7537	0,7463	0,7397

Notă:

- d [cm] – reprezintă diametrul conductorului;
- h [m] – reprezintă înălțimea conductorului față de suprafața solului;
- ρ [Ω m] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului.

Anexa A1 (continuare)

Tabelul A1.5

Componentele rezistivă și reactivă ale impedanței mutuale dintre două bucle monofazate conductor-pământ în funcție de distanța orizontală dintre conductoare și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, valori obținute cu relațiile lui Carson.

H [m]	ρ [Ωm]													
	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	R _{abp}	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464	0,0464
	ΔX _{abp}	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036
	X _{abp}	0,5045	0,447	0,4034	0,378	0,3599	0,3164	0,2909	0,2729	0,2589	0,2474	0,2378	0,2294	0,222
50	R _{abp}	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481
	ΔX _{abp}	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
	X _{abp}	0,5531	0,4955	0,452	0,4265	0,4085	0,365	0,3395	0,3214	0,3074	0,296	0,2863	0,2779	0,2705
100	R _{abp}	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485
	ΔX _{abp}	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
	X _{abp}	0,5743	0,5168	0,4733	0,4478	0,4298	0,3862	0,3608	0,3427	0,3287	0,3173	0,3076	0,2992	0,2918
150	R _{abp}	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487
	ΔX _{abp}	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁵
	X _{abp}	0,5869	0,5293	0,4858	0,4603	0,4423	0,3988	0,3733	0,3552	0,3412	0,3298	0,3201	0,3117	0,3043
200	R _{abp}	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488	0,0488
	ΔX _{abp}	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵
	X _{abp}	0,5958	0,5382	0,4947	0,4692	0,4512	0,4077	0,3822	0,3641	0,3501	0,3387	0,329	0,3206	0,3132
500	R _{abp}	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491
	ΔX _{abp}	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵
	X _{abp}	0,6242	0,5667	0,5232	0,4977	0,4796	0,4361	0,4107	0,3926	0,3786	0,3671	0,3575	0,3491	0,3417
10 ³	R _{abp}	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493	0,0493
	ΔX _{abp}	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁵
	X _{abp}	0,6458	0,5883	0,5448	0,5193	0,5013	0,4577	0,4323	0,4142	0,4002	0,3888	0,3791	0,3707	0,3633

Notă:

- cele două conductoare se află situate la aceeași înălțime $h=10\text{m}$ față de suprafața solului;

R_{ab-p} [Ω/km] – reprezintă componenta rezistivă a impedanței mutuale;

ΔX_{ab-p} [Ω/km] – reprezintă corecțiile (relația (30) din Cap. 2) ce se adună la expresia reactanței mutuale în expresiile lui Carson;

X_{ab-p} [Ω/km] - reprezintă componenta reactivă a impedanței mutuale;

Anexa A.1 (continuare)

Tabelul A1.6

Componentele rezistivă și reactivă ale impedanței mutuale dintre două bucle monofazate conductor-pământ în funcție de distanța orizontală dintre conductoare și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, valori obținute cu relațiile lui Sunde.

H [m]	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	R_{abp}	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467	0,0467
	X_{abp}	0,5096	0,452	0,4084	0,383	0,3649	0,3213	0,2778	0,2638	0,2523	0,2426	0,2342	0,2268	0,2202
50	R_{abp}	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481
	X_{abp}	0,5586	0,501	0,4575	0,432	0,4139	0,3704	0,3268	0,3128	0,3013	0,2916	0,2833	0,2759	0,2692
100	R_{abp}	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485
	X_{abp}	0,58	0,5224	0,4789	0,4534	0,4353	0,3918	0,3482	0,3342	0,3227	0,3131	0,3047	0,2973	0,2906
150	R_{abp}	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486	0,0486
	X_{abp}	0,5926	0,535	0,4914	0,466	0,4479	0,4043	0,3608	0,3468	0,3353	0,3256	0,3172	0,3098	0,3032
200	R_{abp}	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487	0,0487
	X_{abp}	0,6015	0,5439	0,5004	0,4749	0,4568	0,4133	0,3697	0,3557	0,3443	0,3346	0,3262	0,3188	0,3122
500	R_{abp}	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
	X_{abp}	0,6301	0,5725	0,5289	0,5035	0,4854	0,4418	0,3983	0,3843	0,3728	0,3631	0,3547	0,3473	0,3407
1000	R_{abp}	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491	0,0491
	X_{abp}	0,6517	0,5942	0,5506	0,5251	0,5071	0,4635	0,42	0,4059	0,3945	0,3848	0,3764	0,369	0,3624

Notă:

- cele două conductoare se află situate la aceeași înălțime $h=10m$ față de suprafața solului;

R_{ab-p} [Ω/km] – reprezentă componenta rezistivă a impedanței mutuale;

X_{ab-p} [Ω/km] - reprezentă componenta reactivă a impedanței mutuale;

Anexa A1 (continuare)

Tabelul A1.7

Componentele rezistivă și reactivă ale impedanței mutuale dintre două bucle monofazate conductor-pământ în funcție de distanța verticală dintre conductoare și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, valori obținute cu seriile lui Carson.

h2 [m]	h [m]											
	0,1	2	4	6	8	9,5	12	14	16	18	20	
10	R_{abp}	0,0479	0,0476	0,0473	0,047	0,0467	0,0464	0,0461	0,0458	0,0455	0,0452	0,0449
	ΔX_{abp}	0,0018	0,0022	0,0026	0,0029	0,0033	0,0035	0,004	0,0043	0,0047	0,005	0,0054
	X_{abp}	0,2142	0,2279	0,2464	0,2722	0,3161	0,4034	0,3168	0,2736	0,2485	0,2306	0,2171
50	R_{abp}	0,0488	0,0487	0,0485	0,0484	0,0482	0,0481	0,0479	0,0478	0,0476	0,0475	0,0474
	ΔX_{abp}	0,0008	0,0009	0,0012	0,0013	0,0015	0,0016	0,0018	0,002	0,0021	0,0023	0,0024
	X_{abp}	0,2637	0,2773	0,2955	0,3211	0,3648	0,452	0,3651	0,3218	0,2965	0,2786	0,2647
100	R_{abp}	0,0491	0,049	0,048	0,0487	0,0486	0,0485	0,0484	0,0483	0,0482	0,0481	0,048
	ΔX_{abp}	0,0005	0,0007	0,0008	0,0009	0,001	0,0011	0,0013	0,0014	0,0015	0,0016	0,0017
	X_{abp}	0,2852	0,2987	0,3169	0,3425	0,3861	0,4733	0,3864	0,3429	0,3176	0,2997	0,2858
150	R_{abp}	0,0492	0,0491	0,049	0,0489	0,0488	0,0487	0,0486	0,0485	0,0485	0,0484	0,0483
	ΔX_{abp}	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009	0,001	0,0011	0,0012	0,0013	0,0014
	X_{abp}	0,2979	0,3113	0,3295	0,355	0,3987	0,4858	0,3989	0,3554	0,3301	0,3121	0,2982
200	R_{abp}	0,0492	0,0492	0,0491	0,049	0,0489	0,0489	0,0488	0,0487	0,0486	0,0485	0,0485
	ΔX_{abp}	0,0004	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009	0,0009	0,0011	0,0012	0,0012
	X_{abp}	0,3068	0,3203	0,3384	0,364	0,4076	0,4947	0,4077	0,3643	0,3389	0,3209	0,307
500	R_{abp}	0,0494	0,0493	0,0493	0,0492	0,0492	0,0491	0,0491	0,049	0,049	0,0489	0,0489
	ΔX_{abp}	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007
	X_{abp}	0,3354	0,3489	0,367	0,3925	0,4361	0,5232	0,4362	0,3927	0,3673	0,3493	0,3353
1000	R_{abp}	0,0495	0,0494	0,0494	0,0493	0,0493	0,0493	0,0492	0,0492	0,0492	0,0491	0,0491
	ΔX_{abp}	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005
	X_{abp}	0,3571	0,3705	0,3886	0,4141	0,4577	0,5448	0,4578	0,4143	0,3889	0,3708	0,3569

Notă:

-distanța orizontală dintre conductoare $H=0$;

-conductorul "a" se află la înălțimea $h_1=10$ m față de suprafața solului, iar înălțimea celui de-al doilea conductor variază între (0 – 20) m.

R_{ab-p} [Ω/km] – reprezintă componenta rezistivă a impedanței mutuale;

ΔX_{ab-p} [Ω/km] – reprezintă corecțiile (relația (30) din Cap. 2) ce se adună la expresia reacțanței mutuale în expresiile lui Carson;

X_{ab-p} [Ω/km] - reprezintă componenta reactivă a impedanței mutuale;

Anexa A1 (continuare)

Tabelul A1.8

Componentele rezistivă și reactivă ale impedanței mutuale dintre bucle monofazate conductor-pământ în funcție de distanța verticală dintre conductoare și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, valori obținute cu relațiile lui Sunde.

h2 [m]	p [Ωm]										
	0,1	2	4	6	8	9,5	12	14	16	18	20
10	R _{abp}	0,0477	0,0475	0,0472	0,0469	0,0467	0,0464	0,0462	0,0459	0,0457	0,0454
	X _{abp}	0,2195	0,2331	0,2515	0,2772	0,3211	0,4084	0,3216	0,2783	0,2531	0,2216
50	R _{abp}	0,0487	0,0486	0,0485	0,0484	0,0482	0,0481	0,048	0,0479	0,0478	0,0475
	X _{abp}	0,2692	0,2828	0,301	0,3266	0,3702	0,4574	0,3705	0,3271	0,3017	0,2838
100	R _{abp}	0,0489	0,0488	0,0487	0,0486	0,0486	0,0485	0,0484	0,0483	0,0482	0,0481
	X _{abp}	0,2908	0,3043	0,3225	0,348	0,3917	0,4789	0,3919	0,3484	0,323	0,305
150	R _{abp}	0,049	0,0489	0,0488	0,0488	0,0487	0,0487	0,0486	0,0485	0,0484	0,0483
	X _{abp}	0,3035	0,317	0,3351	0,3607	0,4043	0,4914	0,4044	0,3609	0,3355	0,3175
200	R _{abp}	0,049	0,049	0,0489	0,0489	0,0488	0,0487	0,0487	0,0486	0,0485	0,0484
	X _{abp}	0,3125	0,3259	0,3441	0,3696	0,4132	0,5004	0,4134	0,3699	0,3444	0,3264
500	R _{abp}	0,0491	0,0491	0,0491	0,049	0,049	0,049	0,0489	0,0489	0,0488	0,0488
	X _{abp}	0,3412	0,3546	0,3727	0,3982	0,4418	0,5289	0,4419	0,3894	0,3729	0,3549
1000	R _{abp}	0,0492	0,0492	0,0492	0,0491	0,0491	0,0491	0,049	0,049	0,049	0,0489
	X _{abp}	0,3629	0,3763	0,3944	0,4199	0,4635	0,5506	0,4635	0,42	0,3946	0,3765

Notă:

-distanța orizontală dintre conductoare H=0;

-conductorul "a" se află la înălțimea h l =10 m față de suprafața solului, iar înălțimea celui de-al doilea conductor variază între (0 – 20) m.

R_{ab-p} [Ω/km] – reprezintă componenta rezistivă a impedanței mutuale;

X_{ab-p} [Ω/km] - reprezintă componenta reactivă a impedanței mutuale;

Anexa A2. Parametrii de secvență homopolară ai unei LEA de 220 kV, dublu circuit

Tabelul A2.1 (referitor la fig. 4.7, 4.8)

Rezistența de secvență homopolară a liniei de 220 kV dublu circuit, în $[\Omega/\text{km}]$, în funcție de înălțimea conductoarelor față de suprafața solului și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, la frecvența de 50 Hz.

ρ $[\Omega\text{m}]$		50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
h=35.4m	c.p. AL-OL	0,1542	0,1582	0,1621	0,1644	0,166	0,1673	0,1683	0,1692	0,1699	0,1706	0,1712
	c.p.OL	0,2135	0,2236	0,2338	0,2398	0,2442	0,2476	0,2504	0,2528	0,2549	0,2568	0,2584
	Fără Rcp OL	0,1296	0,1286	0,1271	0,1261	0,1254	0,1248	0,1242	0,1238	0,1234	0,1231	0,1228
	Fără c.p.	0,1726	0,1753	0,1773	0,1782	0,1788	0,1792	0,1794	0,1794	0,1797	0,1798	0,18
h=41.4m	c.p. AL-OL	0,1533	0,1575	0,1616	0,164	0,1657	0,167	0,168	0,1689	0,1697	0,1704	0,171
	c.p.OL	0,2118	0,2223	0,2328	0,239	0,2435	0,247	0,2498	0,2523	0,2544	0,2563	0,258
	Fără Rcp OL	0,1279	0,1273	0,1262	0,1254	0,1247	0,1242	0,1237	0,1233	0,123	0,1226	0,1224
	Fără c.p.	0,1703	0,1736	0,176	0,1771	0,1778	0,1783	0,1787	0,1787	0,1789	0,1792	0,1793
h=47.4m	c.p. AL-OL	0,1524	0,1569	0,1612	0,1637	0,1654	0,1667	0,1678	0,1687	0,1695	0,1702	0,1708
	c.p.OL	0,2101	0,2211	0,2319	0,2383	0,2428	0,2464	0,2493	0,2518	0,2539	0,2559	0,2576
	Fără Rcp OL	0,1262	0,1261	0,1253	0,1247	0,1241	0,1236	0,1232	0,1228	0,1225	0,1222	0,122
	Fără c.p.	0,1681	0,1719	0,1748	0,1761	0,1769	0,1775	0,1779	0,1782	0,1785	0,1787	0,1789

Notă:

- h [m] – reprezintă înălțimea stâlpului, care coincide cu înălțimea conductorului de protecție față de suprafața solului;
- ρ [Ωm] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului;
- c.p. AL-OL – conductor de protecție din aluminiu-oțel;
- c.p. OL – conductor de protecție din oțel;
- $R_{h_cp\ d.c.}$ – reprezintă rezistența de secvență homopolară a liniei –dublu circuit- prevăzută cu un conductor de protecție
- $R_{cp\ OL}$ – rezistența conductorului de protecție din oțel.

Anexa A2 (continuare)

Tabelul A2.2 (referitor la fig. 4.7, 4.8)

Reactanța de secvență homopolară a liniei de 220 kV dublu circuit, în $[\Omega/\text{km}]$, în funcție de înălțimea conductoarelor față de suprafața solului și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, la frecvența de 50 Hz.

ρ [Ωm]		50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
h=35.4m	c.p. AL-OL	0,7317	0,7586	0,7845	0,7991	0,8092	0,8169	0,8231	0,8283	0,8328	0,8367	0,8401
	c.p.OL	0,9399	0,9952	1,0508	1,0834	1,1065	1,1245	1,1391	1,1515	1,1622	1,1717	1,1802
	Fără Rep OL	0,8611	0,9034	0,945	0,969	0,9858	0,9987	1,0093	1,0181	1,0257	1,0324	1,0384
	Fără c.p.	0,9862	1,0484	1,1114	1,1486	1,1751	1,1957	1,2126	1,2268	1,2392	1,2502	1,26
h=41.4m	c.p. AL-OL	0,7331	0,7596	0,7851	0,7996	0,8096	0,8173	0,8235	0,8286	0,8331	0,837	0,8404
	c.p.OL	0,9427	0,9972	1,0522	1,0846	1,1076	1,1254	1,14	1,1523	1,163	1,1724	1,1808
	Fără Rep OL	0,8629	0,9047	0,9459	0,9697	0,9864	0,9993	1,0097	1,0185	1,0261	1,0328	1,0387
	Fără c.p.	0,9891	1,0504	1,1129	1,1498	1,1761	1,1966	1,2134	1,2276	1,24	1,2509	1,2606
h=47.4m	c.p. AL-OL	0,7344	0,7605	0,7858	0,8001	0,8101	0,8177	0,8238	0,829	0,8334	0,8372	0,8407
	c.p.OL	0,9455	0,9992	1,0537	1,0858	1,1086	1,1263	1,1408	1,1531	1,1637	0,1731	1,1815
	Fără Rep OL	0,8647	0,9059	0,9468	0,9704	0,987	0,9998	1,0102	1,019	1,0266	1,0332	1,0391
	Fără c.p.	0,9918	1,0524	1,1143	1,151	1,1771	1,1975	1,2143	1,2284	1,2407	1,2515	1,2613

Notă:

- ρ [Ωm] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului;
- h [m] – reprezintă înălțimea stâlpului, care coincide cu înălțimea conductorului de protecție față de suprafața solului;
- c.p. AL-OL – conductor de protecție din aluminiu-oțel;
- c.p. OL – conductor de protecție din oțel;
- X_{h_cp} d.c. – reprezintă reactanța de secvență homopolară a liniei –dublu circuit- prevăzută cu un conductor de protecție;
- R_{cp} OL – rezistența conductorului de protecție din oțel.

Anexa A2 (continuare)

Tabelul A2.3

Rezistența de secvență homopolară a liniei de 220 kV dublu circuit, în $[\Omega/\text{km}]$, în funcție de înălțimea conductoarelor față de suprafața solului și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, la frecvența de 50 Hz.

ρ $[\Omega\text{m}]$		50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
h=10m	c.p. AL-OL	0,159	0,1614	0,1642	0,166	0,1674	0,1685	0,1694	0,1702	0,1709	0,1715	0,172	
	c.p.OL	0,2223	0,2298	0,2382	0,2434	0,2473	0,2503	0,2529	0,2551	0,2571	0,2588	0,2603	
	Fără Rep OL	0,1381	0,1346	0,1313	0,1295	0,1283	0,1273	0,1266	0,126	0,1254	0,125	0,1245	
	Fără c.p.	0,1839	0,1835	0,1832	0,1831	0,183	0,183	0,183	0,1829	0,1829	0,1829	0,1829	0,1828
	c.p. AL-OL	0,1569	0,16	0,1633	0,1654	0,1668	0,168	0,1689	0,1698	0,1705	0,1711	0,1717	
	c.p.OL	0,2185	0,2272	0,2364	0,2419	0,246	0,2492	0,2519	0,2542	0,2562	0,2562	0,258	0,2596
h=20m	Fără Rep OL	0,1345	0,1321	0,1296	0,1281	0,1271	0,1263	0,1256	0,1251	0,1246	0,1242	0,1238	
	Fără c.p.	0,1792	0,1801	0,1808	0,1811	0,1813	0,1814	0,1815	0,1816	0,1817	0,1817	0,1817	
	c.p. AL-OL	0,1551	0,1588	0,1625	0,1647	0,1663	0,1675	0,1685	0,1694	0,1701	0,1708	0,1714	
	c.p.OL	0,2152	0,2248	0,2347	0,2405	0,2448	0,2481	0,2509	0,2533	0,2553	0,2572	0,2588	
	Fără Rep OL	0,1312	0,1298	0,128	0,1268	0,126	0,1253	0,1247	0,1242	0,1238	0,1235	0,1231	
	Fără c.p.	0,1748	0,1769	0,1785	0,1792	0,1796	0,1799	0,1802	0,1803	0,1805	0,1806	0,1807	
h=30m	c.p. AL-OL	0,1535	0,1577	0,1618	0,1641	0,1658	0,167	0,1681	0,169	0,1698	0,1704	0,171	
	c.p.OL	0,2122	0,2226	0,2331	0,2392	0,2437	0,2471	0,25	0,2524	0,2545	0,2564	0,2581	
	Fără Rep OL	0,1283	0,1276	0,1264	0,1256	0,1249	0,1243	0,1238	0,1234	0,1231	0,1227	0,1224	
	Fără c.p.	0,1708	0,174	0,1763	0,1774	0,1781	0,1785	0,1788	0,1791	0,1793	0,1795	0,1796	

Notă:

- h [m] – reprezintă înălțimea stâlpului, care coincide cu înălțimea conductorului de protecție față de suprafața solului;
- ρ [Ωm] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului;
- c.p. AL-OL – conductor de protecție din aluminiu-oțel;
- c.p. OL – conductor de protecție din oțel;
- $R_{h_cp\ d.c.}$ – reprezintă rezistența de secvență homopolară a liniei –dublu circuit- prevăzută cu un conductor de protecție
- $R_{cp\ OL}$ – rezistența conductorului de protecție din oțel.

Anexa A.2 (continuare)

Tabelul A2.4

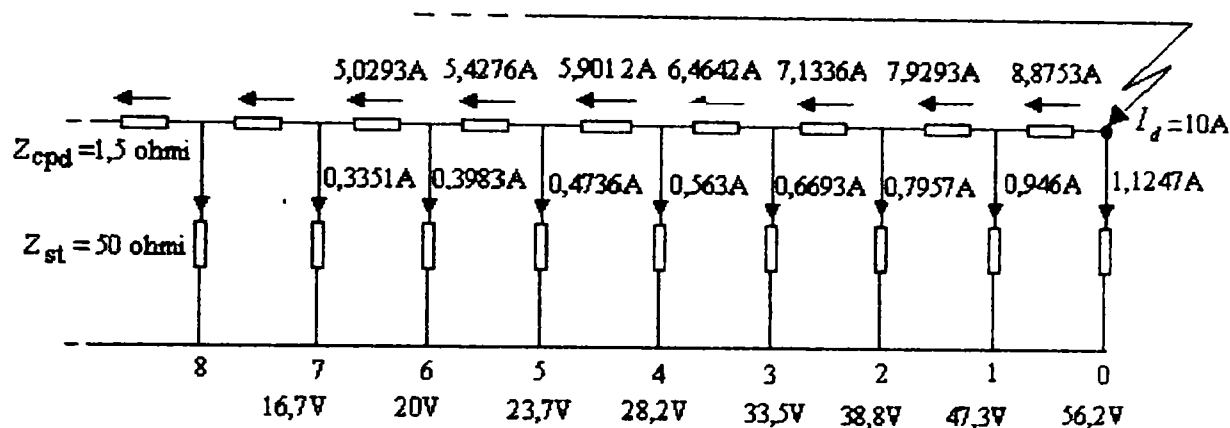
Reactanța de secvență homopolară a liniei de 220 kV dublu circuit, în $[\Omega/\text{km}]$, în funcție de înălțimea conductoarelor față de suprafața solului și în funcție de rezistivitatea electrică a solului, la frecvența de 50 Hz.

ρ $[\Omega\text{m}]$		50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
h=10m	c.p. AL-OL	0,7256	0,7545	0,7817	0,7968	0,8073	0,8152	0,8216	0,8269	0,8315	0,8354	0,839	
	c.p.OL	0,9275	0,9863	1,0445	1,0782	1,102	1,1204	1,1355	1,1481	1,159	1,1687	1,1773	
	Fără Rep OL	0,853	0,8978	0,9412	0,9659	0,9832	0,9964	1,0071	1,0161	1,0239	1,0307	1,0368	
	Fără c.p.	0,9739	1,0396	1,1052	1,1435	1,1707	1,1917	1,2089	1,2235	1,2361	1,2472	1,2571	
	c.p. AL-OL	0,7281	0,7562	0,7828	0,7977	0,808	0,8159	0,8222	0,8275	0,832	0,8359	0,8394	
	c.p.OL	0,9325	0,9898	1,047	1,0803	1,1038	1,122	1,1369	1,1495	1,1603	1,1699	1,1784	
h=20m	Fără Rep OL	0,8562	0,9	0,9427	0,9671	0,9842	0,9973	1,008	1,0169	1,0246	1,0314	1,0374	
	Fără c.p.	0,9778	1,0431	1,1076	1,1455	1,1724	1,1933	1,2104	1,2248	1,2373	1,2484	1,2583	
	c.p. AL-OL	0,7304	0,7578	0,7839	0,7986	0,8088	0,8165	0,8228	0,828	0,8325	0,8364	0,8399	
	c.p.OL	0,9374	0,9933	1,0495	1,0823	1,1056	1,1236	1,1384	1,1508	1,1616	1,1711	1,1795	
	Fără Rep OL	0,8594	0,9022	0,9442	0,9683	0,9852	0,9983	1,0088	1,0177	1,0253	1,032	1,038	
	Fără c.p.	0,9837	1,0465	1,1101	1,1475	1,1742	1,1949	1,2118	1,2261	1,2386	1,2495	1,2594	
h=30m	c.p. AL-OL	0,7327	0,7594	0,785	0,7995	0,8095	0,8172	0,8234	0,8286	0,833	0,8369	0,8403	
	c.p.OL	0,9421	0,9967	1,0519	1,0843	1,1073	1,1252	1,1398	1,1521	1,1628	1,1722	1,1807	
	Fără Rep OL	0,8625	0,9044	0,9457	0,9695	0,9863	0,9992	1,0096	1,0184	1,026	1,0327	1,0386	
	Fără c.p.	0,9884	1,0499	1,1125	1,1495	1,1759	1,1964	1,2132	1,2274	1,2398	1,2507	1,2605	

Notă:

- ρ [Ωm] - reprezintă rezistivitatea electrică a solului;
- h [m] – reprezintă înălțimea stâlpului, care coincide cu înălțimea conductorului de protecție față de suprafața solului;
- c.p. AL-OL – conductor de protecție din aluminiu-oțel;
- c.p. OL – conductor de protecție din oțel;
- X_{h_cp} d.c. – reprezintă reacțanța de secvență homopolară a liniei –dublu circuit- prevăzută cu un conductor de protecție;
- R_{cp} OL – rezistența conductorului de protecție din oțel.

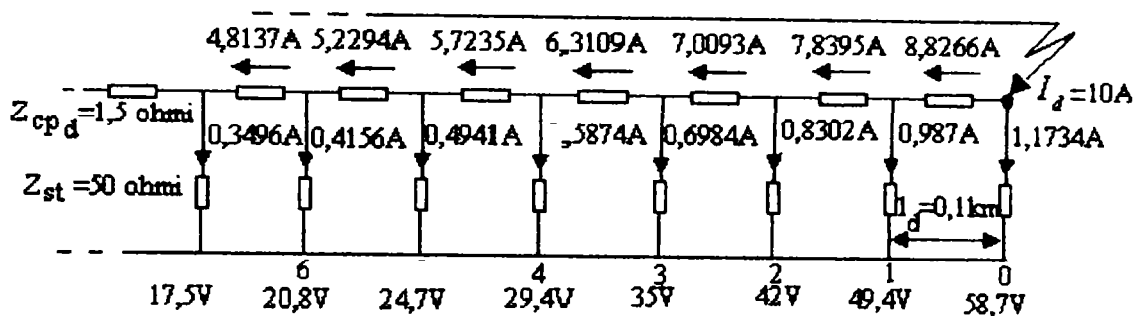
Figura A3.1 Defect la ultimul stâlp al liniei. Linia considerată de lungime mare



Stâlpul nr. 0	$I_0=1,12A$	$U_{st}=56,2V$	-
Stâlpul nr. 1	$I_1=0,95A$	$U_{st}=47,3V$	$i_1=8,88A$
Stâlpul nr. 2	$I_2=0,8A$	$U_{st}=39,8V$	$i_2=7,93A$
Stâlpul nr. 3	$I_3=0,67A$	$U_{st}=33,5V$	$i_3=7,13A$
Stâlpul nr. 4	$I_4=0,56A$	$U_{st}=28,2V$	$i_4=6,46A$
Stâlpul nr. 5	$I_5=0,47A$	$U_{st}=23,7V$	$i_5=5,90A$
Stâlpul nr. 6	$I_6=0,4A$	$U_{st}=20V$	$i_6=5,43A$
Stâlpul nr. 7	$I_7=0,3A$	$U_{st}=16,7V$	$i_7=5,09A$
Stâlpul nr. 8	$I_8=0,28A$	$U_{st}=14,1V$	$i_8=4,69A$
Stâlpul nr. 9	$I_9=0,24A$	$U_{st}=11,9V$	$i_9=4,41A$
Stâlpul nr. 10	$I_{10}=0,2A$	$U_{st}=10V$	$i_{10}=4,18A$
Stâlpul nr. 11	$I_{11}=0,17A$	$U_{st}=8,4V$	$i_{11}=3,98A$
Stâlpul nr. 12	$I_{12}=0,14A$	$U_{st}=7,1V$	$i_{12}=3,81A$
Stâlpul nr. 13	$I_{13}=0,12A$	$U_{st}=5,9V$	$i_{13}=3,67A$
Stâlpul nr. 14	$I_{14}=0,1A$	$U_{st}=5V$	$i_{14}=3,55A$
Stâlpul nr. 15	$I_{15}=0,08A$	$U_{st}=4,2V$	$i_{15}=3,45A$
Stâlpul nr. 16	$I_{16}=0,07A$	$U_{st}=3,5V$	$i_{16}=3,36A$
Stâlpul nr. 17	$I_{17}=0,06A$	$U_{st}=3V$	$i_{17}=3,29A$
Stâlpul nr. 18	$I_{18}=0,05A$	$U_{st}=2,5V$	$i_{18}=3,23A$
Stâlpul nr. 19	$I_{19}=0,04A$	$U_{st}=2,1V$	$i_{19}=3,18A$
Stâlpul nr. 20	$I_{20}=0,03A$	$U_{st}=1,7V$	$i_{20}=3,14A$

Figura A3.2 Defect la ultimul stâlp ai liniei

Linia considerată de lungime mică (referitor la relația (5.38))

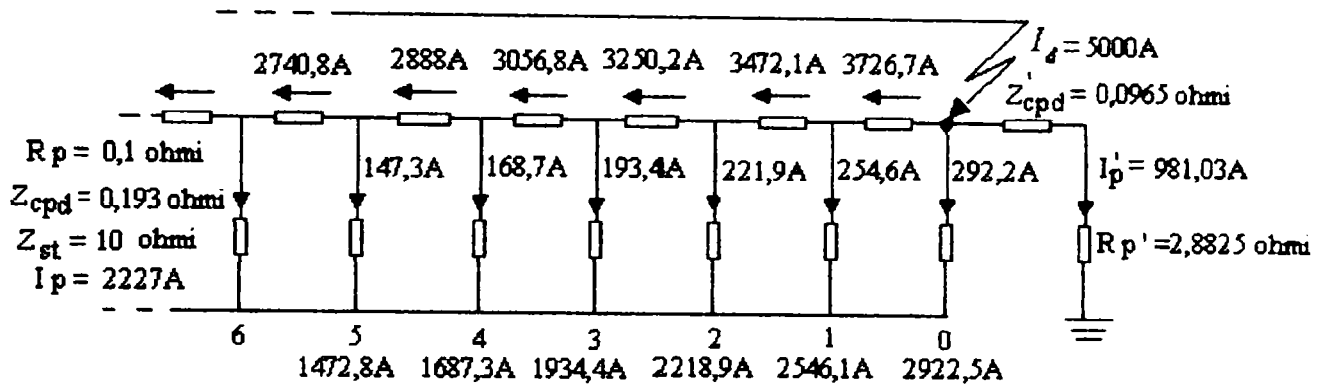


Stâlpul nr. 0	$I_0=1,17A$	$U_{st}=58,7V$	-
Stâlpul nr. 1	$I_1=0,99A$	$U_{st}=49,4V$	$i_1=8,83A$
Stâlpul nr. 2	$I_2=0,83A$	$U_{st}=42V$	$i_2=7,84A$
Stâlpul nr. 3	$I_3=0,7A$	$U_{st}=35V$	$i_3=7,01A$
Stâlpul nr. 4	$I_4=0,59A$	$U_{st}=29,4V$	$i_4=6,31A$
Stâlpul nr. 5	$I_5=0,49A$	$U_{st}=24,7V$	$i_5=5,72A$
Stâlpul nr. 6	$I_6=0,42A$	$U_{st}=20,8V$	$i_6=5,23A$
Stâlpul nr. 7	$I_7=0,35A$	$U_{st}=17,5V$	$i_7=4,81A$
Stâlpul nr. 8	$I_8=0,29A$	$U_{st}=14,7V$	$i_8=4,46A$
Stâlpul nr. 9	$I_9=0,25A$	$U_{st}=12,4V$	$i_9=4,17A$
Stâlpul nr. 10	$I_{10}=0,21A$	$U_{st}=10,4V$	$i_{10}=3,92A$
Stâlpul nr. 11	$I_{11}=0,18A$	$U_{st}=8,8V$	$i_{11}=3,71A$
Stâlpul nr. 12	$I_{12}=0,15A$	$U_{st}=7,4V$	$i_{12}=3,54A$
Stâlpul nr. 13	$I_{13}=0,12A$	$U_{st}=6,2V$	$i_{13}=3,39A$
Stâlpul nr. 14	$I_{14}=0,10A$	$U_{st}=5,2V$	$i_{14}=3,27A$
Stâlpul nr. 15	$I_{15}=0,09A$	$U_{st}=4,4V$	$i_{15}=3,16A$
Stâlpul nr. 16	$I_{16}=0,07A$	$U_{st}=3,7V$	$i_{16}=3,08A$
Stâlpul nr. 17	$I_{17}=0,06A$	$U_{st}=3,1V$	$i_{17}=3,0A$
Stâlpul nr. 18	$I_{18}=0,05A$	$U_{st}=2,6V$	$i_{18}=2,94A$
Stâlpul nr. 19	$I_{19}=0,04A$	$U_{st}=2,2V$	$i_{19}=2,89A$
Stâlpul nr. 20	$I_{20}=0,03A$	$U_{st}=1,8V$	$i_{20}=2,85A$
Stâlpul nr. 21	$I_{21}=0,03A$	$U_{st}=1,6V$	$i_{21}=2,81A$
Stâlpul nr. 22	$I_{22}=0,03A$	$U_{st}=1,3V$	$i_{22}=2,78A$
Stâlpul nr. 23	$I_{23}=0,02A$	$U_{st}=1,1V$	$i_{23}=2,75A$

Stâlpul nr. 24	$I_{24}=0,02A$	$U_{st}=0,9V$	$i_{24}=2,73A$
Stâlpul nr. 25	$I_{25}=0,02A$	$U_{st}=0,8V$	$i_{25}=2,71A$
Stâlpul nr. 26	$I_{26}=0,01A$	$U_{st}=0,7V$	$i_{26}=2,7A$
Stâlpul nr. 27	$I_{27}=0,01A$	$U_{st}=0,6V$	$i_{27}=2,68A$
Stâlpul nr. 28	$I_{28}=0,009A$	$U_{st}=0,5V$	$i_{28}=2,67A$
Stâlpul nr. 29	$I_{29}=0,008A$	$U_{st}=0,4V$	$i_{29}=2,66A$
Stâlpul nr. 30	$I_{30}=0,007A$	$U_{st}=0,3V$	$i_{30}=2,65A$

Figura A3.3 Defect la ultimul stâlp al liniei

Repartiția curentului de defect



Stâlpul nr. 0	$I_0=292,2A$	$U_{st}=2922,5V$	-
Stâlpul nr. 1	$I_1=254,6A$	$U_{st}=2546,1V$	$i_1=3726,7A$
Stâlpul nr. 2	$I_2=221,9A$	$U_{st}=2218,9V$	$i_2=3472,1A$
Stâlpul nr. 3	$I_3=193,4A$	$U_{st}=1934,4V$	$i_3=3250,2A$
Stâlpul nr. 4	$I_4=168,7A$	$U_{st}=1687,3V$	$i_4=3056,8A$
Stâlpul nr. 5	$I_5=147,3A$	$U_{st}=1472,8V$	$i_5=2888A$
Stâlpul nr. 6	$I_6=128,7A$	$U_{st}=1286,7V$	$i_6=2740,8A$
Stâlpul nr. 7	$I_7=112,5A$	$U_{st}=1125,4V$	$i_7=2612,1A$
Stâlpul nr. 8	$I_8=98,6A$	$U_{st}=985,9V$	$i_8=2499,6A$
Stâlpul nr. 9	$I_9=86,5A$	$U_{st}=865,4V$	$i_9=2401A$
Stâlpul nr. 10	$I_{10}=76,2A$	$U_{st}=761,5V$	$i_{10}=2314,4A$
Stâlpul nr. 11	$I_{11}=67,2A$	$U_{st}=672,4V$	$i_{11}=2238,3A$
Stâlpul nr. 12	$I_{12}=59,6A$	$U_{st}=596,3V$	$i_{12}=2171A$
Stâlpul nr. 13	$I_{13}=53,2A$	$U_{st}=531,6V$	$i_{13}=2111,4A$
Stâlpul nr. 14	$I_{14}=47,7A$	$U_{st}=477,3V$	$i_{14}=2058,2A$
Stâlpul nr. 15	$I_{15}=43,2A$	$U_{st}=432,1V$	$i_{15}=2010,5A$
Stâlpul nr. 16	$I_{16}=39,5A$	$U_{st}=395,3V$	$i_{16}=1967,3A$
Stâlpul nr. 17	$I_{17}=36,6A$	$U_{st}=366,1V$	$i_{17}=1927,8A$
Stâlpul nr. 18	$I_{18}=34,4A$	$U_{st}=344V$	$i_{18}=1891,2A$
Stâlpul nr. 19	$I_{19}=32,8A$	$U_{st}=328,5V$	$i_{19}=1856,8A$
Stâlpul nr. 20	$I_{20}=31,9A$	$U_{st}=319,3V$	$i_{20}=1823,9A$

BIBLIOGRAFIE

1. **Antoniou I. S.** – *Bazele electrotehnicii*, Editura didactică și pedagogică, București, 1974
2. **Bălan Gh., ș.a.** – *Influența instalațiilor electrice de înaltă tensiune de curent alternativ asupra cablurilor de telecomunicații pe teritoriul orașelor mari*, revista Energetica, vol. 25, nr. 3-4, 1977
3. **Bercovici M., Arie A., Poată A.** – *Rețele electrice. Calculul electric*, Editura tehnică, București, 1974
4. **Buta A.** - *Transportul și distribuția energiei electrice*, Timișoara, 1991
5. **Buta A., Milea L., Pană A.** – *Impedanța armonică a rețelelor electrice*, Editura Tehnică, București, 2000
6. **Buta A., Pană A., Milea L.** – *Calitatea energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2001
7. **Buta A., Stoian A., Bucătariu I., Pană A., Borduz G.** – *Forecasting of Hourly Powers by Load Curve de Composition in Fourier Series*, Proceedings of The Fourth International Power Systems Conference, Timișoara, November 8-9, 2001
8. **Buta A., Titihăzan V., Pană A., Titihăzan M., Stoian C., Batâr Ghe.** – *Experimental Protection Against Overvoltages at the 20 kV Overhead Lines with OAC2X Covered Conductor*, Proceedings of The Fourth International Power Systems Conference, Timișoara, November 8-9, 2001
9. **Carson J. R.** - *Wave propagation in Overhead Wires with Ground Return*, Bell System Techn. 1, vol. 5, 1926
10. **Chow Y. L., Yang J. J., Srivastava K. D.** – *Grounding Resistance of Buried Electrodes in Multi-Layer Earth Predicted by Simple Voltage Measurements along Earth Surface – a Theoretical Discussion*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995
11. **Chow Y. L., Elsherbiny M. M., Salama M. M. A.** – *Resistance Formulas of Grounding Systems in Two-Layer Earth*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No.3, July 1996
12. **Chow Y. L., Elsherbiny M. M., Salama M. M. A.** – *Surface Voltages and Resistance of Grounding Systems of Grid and Rods in Two-Layer Earth by the Rapid Galerkin's Moment Method*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997
13. **Clarke E.** – *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice*, Editura tehnică, București, 1979, Traducere selectivă din limba engleză

14. **Crișan O.** – *Sisteme electroenergetice*, Editura didactică și pedagogică, București, 1979
15. **Curelaru A.** – *Probleme de stații și rețele electrice*, Scrisul Românesc, Craiova, 1979
16. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *Ground Electrode Resistance Measurements in Non Uniform Soils*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No.11, 1974
17. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part I - Analytical Study*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 2, March/April, 1975
18. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part II – Comparison Between Theoretical and Experimental Results*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, No. 2, March/April, 1975
19. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part III – Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, No. 2, March/April 1975
20. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *MultiStep Analysis of Interconnected Grounding Electrodes*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 95, No. 1, 1976
21. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *Resistance Calculation of Interconnected grounding Electrodes*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 96, No. 1, January/February 1977
22. **Dawalibi F., Mukhedkar D.**– *Transferred Earth Potentials in Power Systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 97, No. 1, January/February 1978
23. **Dawalibi F., Mukhedkar D.** – *Parametric Analysis of Grounding Grids*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 98, No. 5, Sept./Oct. 1979
24. **Dawalibi F., Bensted D., Mukhedkar D.** – *Soil Effects on Ground Fault Currents*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, July 1981
25. **Dawalibi F., Niles G. B.** – *Measurements and Computations of Fault Current Distribution on Overhead Transmission Lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 3, March 1984

26. **Dawalibi F., Barbeito N.** – *Measurements and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilayer Soils*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, 1991
27. **Dawalibi F., Donoso F.** – *Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI*, ISSN 0895-0156/93, IEEE Computer Applications in Power, April 1993
28. **Dawalibi F., Ma J.** - *Behaviour of Grounding Systems in Multilayer Soils: A Parametric Analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, 1994
29. **Deri A., ș.a.** – *The Complex Ground Return Plane. A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, August 1981
30. **Dimo P., ș.a** – *Calculul și proiectarea sistemelor electroenergetice*, Editura Tehnică, București, 1971
31. **Dommel H. W.** – *Overhead Line Parameters from Handbook Formulas and Computer Programs*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 104, No. 2, February 1985
32. **Edelmann H.** – *Calculul electric al rețelelor interconectate*, Editura tehnică, București, 1966
33. **Endrenyi J.** – *Analysis of Transmission Tower Potentials during Ground Faults*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86, No.10, October 1967
34. **Garret D., Myers J., Patel S.** – *Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current using Graphical Analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, No. 3, July 1987
35. **Geri A.** – *Behaviour of Grounding System Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
36. **Ghinea M., Firețeanu V.** – *Matlab - Calcul numeric. Grafică. Aplicații*, Seria Calculatoare personale Nr. 74, Editura Teora, 1995
37. **Goci H. B., Sebo S. A.** – *Distribution of Ground Fault Currents along Transmission Lines - an Improved Algorithm*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-104, No.3, March 1985
38. **Goia . M. L.** - *Cercetări teoretice și experimentale asupra prizelor de pământ, cu referire specială la prizele de pământ naturale*, Teză de doctorat, 1974
39. **Heimbach M., ș.a.** – *Grounding System Analysis in Transient Programs Applying Electromagnetic Field Approach*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997

40. **Iacobescu Gh., Iordănescu I. ș.a.** – *Rețele electrice. Probleme*, Editura didactică și pedagogică, București, 1977
41. **Iacobescu Gh., Iordănescu I. ș.a.** – *Rețele electrice*, Editura didactică și pedagogică, București, 1981
42. **Ionescu T. G., Baciuc A.** – *Rețele electrice de distribuție*, Editura tehnică, București, 1981
43. **Iordănescu I., Iacobescu Gh.** – *Alimentarea cu energie electrică a întreprinderilor*, Editura didactică și pedagogică, București, 1979
44. *** - *Îndreptar de proiectare și execuție a ILP- indicativ IRE – Ip 30 90*
45. *** - *Îndreptar de proiectare pentru rețelele de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistență, Instalații de legare la pământ IRE – Ip- 35 2- 92*
46. **Kostic M. B.** – *Analysis of Complex Grounding Systems Consisting of Foundation Grounding Systems with External Grids*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No.3, July 1998
47. **Lagace P. J., Houle J. L., Gervais Y., Mukhedkar D.** – *Evaluation of the Voltage Distribution around Toroidal HVDC Ground Electrodes in N-Layer Soils*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988
48. **Lagace P. J., Fortin J., Crainic E. D.** – *Interpretation of Resistivity Sounding Measurements in N-Layer Soil using Electrostatic Images*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
49. **Lazzara J., Barbeito N.** – *Simplified Two Layer Model Substation Ground Grid Design Methodology*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990
50. **Lee H., Kim J., Dawalibi F., Ma J.**– *Efficient Ground Grid Designs in Layered Soils*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998
51. **Ma J., Dawalibi F.** - *Study of Influence of Buried Metallic Structures on Soil Resistivity Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998
52. **Ma J., Dawalibi F.** – *Influence of Inductive Coupling Between Leads on Resistivity Measurements in Multilayer Soils*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998
53. **Ma J., Dawalibi F.** – *Analysis of Grounding Systems in Soils with Cylindrical Soil Volumes*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000
54. **Mader D. L., Zaffanella L. E.**– *Network Analysis of Ground Currents in a Residential Distribution System*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, 1993

55. **Meliopoulus A. P., Webb R. P., Joy E. B.** – *Computation of Maximum Earth current in Substation Switchyards*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.9, September 1983
56. **Meliopoulus A. P., Cokkinides G., Abdallah H., Duong S., Patel S.** – *A PC Based Impedance Measurement Instrument*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993
57. **Meng Q., He J., Dawalibi F. P., Ma J.** – *A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
58. **Menter F., ș.a.** – *EMTP-Based Model for Grounding System Analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994
59. **Mocanu C.** – *Teoria circuitelor electrice*, Editura didactică și pedagogică, București, 1979
60. **Nahman J. M., Djordjevic V. B.** – *Maximum Step Voltages of Combined Grid – Multiple Rods Ground Electrodes*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998
61. **Nemeș M.** – *Sisteme Electroenergetice*, Institutul Politehnic “Traian Vuia” Timișoara, Facultatea de Electrotehnică, 1990
62. ******* - *Normativ privind metodologia de calcul a curenților de scurtcircuit în instalațiile electrice, PE 134/1984 - reeditare*, Institutul de Cercetări și Modernizări energetice - ICEMENERG, București 1993
63. **Nucci C. A., ș.a.** – *On the Contribution of the Electromagnetic Field Components in Field-to-Transmission Line Interaction*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 37, No. 4, November 1995
64. **Orzan D.** – *Time-Domain Low Frequency Approximation for the Off-Diagonal Terms of the Ground Impedance Matrix*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 39, No. 1, February 1997
65. **Otero A. F., Cidras J., del Alamo J. L.** – *Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
66. **Poeată A., Arie A., Crișan O., Eremia M., Alexandrescu V., Buta A.** – *Transportul și distribuția energiei electrice*, Editura didactică și pedagogică, București, 1981
67. **Popovic L. M.** – *Dissipating of the partial Ground Fault Current Across the Shield Wires of Transmission Lines* –, Electronic Power Systems Research, Vol. 11, No.1, August 1986

68. **Popovic L. M.** – *General Equations of the Line Represented by Discrete Parameters Part I – Steady State*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.1, January 1991
69. **Popovic L. M.** – *General Equations of the Line Represented by Discrete Parameters Part II – Resonant Phenomena*, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.6, No.1, January 1991
70. **Popovic L. M.** – *Practical Method for Evaluating Ground Fault Current Distribution in Station Supplied by an Unhomogeneous Line*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.2, April 1997
71. **Popovic L. M.** – *Practical Method for Evaluating Ground Fault Current Distribution in Station, Towers and Ground Wire*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.1, January 1998
72. **Popovic L. M.** – *A Practical Method for Evaluating Ground Fault Current Distribution on Double Circuit Parallel Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.1, January 2000
73. **Popovic L. M.** – *Efficient Reduction of Fault Current through the Grounding Grid of Substation Supplied by a Cable Line*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.2, April 2000
74. **Potolea E.** – *Calculul regimurilor de funcționare ale sistemelor electroenergetice*, Editura tehnică, București, 1977
75. **Prelipcean I, Sfichi R.** – *Considerații privind calculul factorului de reducere introdus de conductorul de protecție al LEA 110kV simplu circuit aflate în paralelism cu liniile de telecomunicații*, revista Energetica, vol. 25, nr. 8, 1977
76. **Rachidi F., ș.a.** – *Formulation of the Field-to-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 35, No. 3, August 1993
77. **Rachidi F., ș.a.** – *Influence of a Lossy Ground on Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines*, IEEE Transactions. on Electromagnetic Compatibility, Vol.38, No.3, August 1996
78. **Rachidi F.** – *Transient Analysis of Multiconductor Lines Above a Lossy Ground*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999
79. **Rucăreanu C., Militaru P., ș.a.** – *Linii electrice aeriene și subterane. Îndreptar*, Editura tehnică, București, 1989
80. **Rudenberg R.** - *Fenomene tranzitorii în sistemele electroenergetice*, Editura tehnică, București, 1959, Traducere din limba engleză

81. **Saad O.** – *A Closed-Form Approximation for Ground Return Impedance of Underground Cables*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
82. **Sebo S. A.** – *Zero Sequence Current Distribution Along Transmission Lines*, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-88, No. 6, June 1969
83. **Semlyen A., ș.a.** – *Time Domain of Frequency Dependent Three-Phase Transmission Line Impedance*, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985
84. **Sobral S. T., ș.a.** – *Dimensioning of Nearby Substations Interconnected Ground System*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988
85. **Stein M., Sufrim M.** – *Metodă nouă de protecție împotriva influențelor prin cuplaj rezistiv și inductiv, în cazul cablurilor-pilot de lungimi mari și curenți mari de punere la pământ*, revista Energetica, vol. 22, nr. 5, 1974
86. **Sufrim M., ș.a.** - *Construcția și exploatarea instalațiilor de legare la pământ*, Editura tehnică, București, 1970
87. **Sufrim M., Goia M.** - *Instalații de legare la pământ*, Editura tehnică, București, 1987
88. **Șora C.** - *Bazele Electrotehnicii*, Editura didactică și pedagogică, București, 1982
89. **Șora C., Toader D., Hărăguș Șt.** – *Modelarea și simularea unor subsisteme energetice neliniare în regim de avarie*, Grant nr. 7004/1997
90. **Takahashi T., Kawase T.** – *Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990
91. **Tănăsescu A., Mărieș H.** – *Scurtcircuite nesimetrice în rețelele de medie tensiune cu neutrul legat la pământ prin rezistență*, Revista Energetica, nr. 9, 1981
92. **Thapar B., Madan S. K.** – *Current for Design of Grounding Systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.9, September 1984
93. **Thapar B., Ferrer O., Blank D. A.** – *Ground Resistance of Concrete Foundations in Substation Yards*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990
94. **Thapar B., Gerez V., Emmanuel P.** – *Ground resistance of the Foot in Substation Yards*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993
95. **Timotin A., Hortopan V., Ifrim A., Preda M.** – *Lecții de bazele electrotehnicii*, Editura didactică și pedagogică, București, 1970
96. **Toader D., Hristea V.** – *Calculul curentului de scurtcircuit monofazat prin rezistență de trecere foarte mare, în rețelele de medie tensiune cu nulul tratat prin rezistor*, Revista Energetica, Nr. 5, 1986
97. **Toader D.** – *Contribuții privind studiul defectelor de tipul conductor întrerupt și căzut la pământ în rețelele electrice de medie tensiune*, Teză de doctorat, 1986

98. **Toader D.** – *Distribuția curenților la o simplă punere la pământ într-o rețea de 20 kV*, Buletinul Științific al U. P. Timișoara, 1995
99. **Toader D., Hărăguș Șt.** – *The calculation of capacitive currents on the functional phases in the condition of a simple grounding*, Analele Univ. Oradea, 1997
100. **Toader D., Hărăguș Șt., Toaxen V.** – *An Improved Method for the Neutral Point Grounding in a Distribution Network*, Proceedings of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems, Spain, 2000
101. **Ulianov S. A.** – *Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice*, Editura tehnică, București, 1967
102. **Vatră E., Cristovici A.** – *Considerații privind soluțiile de tratare a conductoarelor de protecție ale unei LEA, Partea I*, revista Energetica, vol. 30, nr. 3, 1982
103. **Velicescu C.** – *Contribuții la calculul regimurilor tranzitorii ale liniilor electrice lungi cu parametri variabili*, Teză de doctorat, 1985
104. **Verma R., Mukhedkar D.** - *Ground Fault Current Distribution in Sub-Station, Towers and Ground Wire*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.3, May/June 1979
105. **Popescu L., Vințan M.** - *The Determination of the Characteristics of a D.C.Electromagnet*, Buletinul Sesiunii de Comunicari Științifice, Sibiu, 17-18 noiembrie, 1995
106. **Popescu L., Vințan M.** - *The dynamic inductivity approximation of a d.c.electromagnet*, Acta Universitatis Cibiniensis, ISSN 1221-4930, vol. XIV (2), Editura Universității "L. Blaga", Sibiu, 1995
107. **Vințan M.**- *Asupra unor metode de calcul a prizelor de pământ*, Buletinul Sesiunii de Comunicari Științifice, Vol. 2, Electrotehnica. Electronica, Hunedoara, 31 Octombrie - 1 Noiembrie, 1997
108. **Vințan M.** - *Asupra calculului rezistenței de trecere la pământ a piciorului unui om aflat în perimetrul unei stații electrice*, Revista "Energetica", pg.389-392, ISSN: 1220-5133, August, 1998
109. **Vințan M.** - *Problematica generală a instalațiilor de legare la pământ*, Referat de doctorat nr. 1, Universitatea "Politehnica" Timisoara, Septembrie, 1999
110. **Vințan M.** – *Analysis of Grounding Electrodes*, Acta Universitatis Cibiniensis, Technical Series. Electrical Engineering and Electronics, Vol. XXXII, ISSN 1221-4930, pg.21-24, Editura Universității "L. Blaga", Sibiu, 1999

111. **Vințan M., Popa M.** – *Grounding Systems: A Present-Day Approach*, Acta Universitatis Cibiniensis, Technical Series. Electrical Engineering and Electronics, Vol. XXXII, ISSN 1221-4930, pg. 25-28, Editura Universității "L. Blaga", Sibiu, 1999
112. **Vințan M.** – *Some Analysis of Earth's Apparent Resistivity*, Acta Universitatis Cibiniensis, Technical Series. Electrical Engineering and Electronics, Vol. XLI, ISSN 1221-4930, pg. 225-228 (issued for Beyond 2000, International Conference), Editura Universității "L. Blaga", Sibiu, 1999
113. **Vințan M.** - *Influența solului asupra parametrilor de secvență homopolară ai rețelelor electrice*, Universitatea "Politehnica" Timisoara, Referat de doctorat nr. 2, octombrie, 2000
114. **Vințan M., Bogdan M.** – *Frequency Domain Ground Impedance Approximate Expressions*, Proceedings of the 10th International Symposium on Electronics and Instrumentation SINTES – 10, ISBN 973-98836-6-4, 25-26 May 2000, Craiova
115. **Vințan M.** – *Metode de optimizare a funcționării instalațiilor electrice*, ISBN 973-651-170-7, Ed. Universității "L. Blaga", Sibiu, 2000
116. **Vințan M** – *A Simulation Program for Teaching Power System Operations*, Proceedings of the Second Symposium "Extra Skills for Young Engineers ESYE 2001", ISBN 86-435-0440-8, Maribor, Slovenia, October 17-19, 2001 (organized by IEEE Slovenia Section)
117. **Vințan M** – *Different Factors Influence on the Self and Mutual Impedances of the Overhead Wires with Ground Return*, Proceedings of The Fourth International Power Systems Conference, Timișoara, November 8-9, 2001
118. **Vințan M** – *The zero sequence parameters of overhead wires, Part I - Analytical study*, Acta Universitatis Cibiniensis, Technical Series. H. Electrical Engineering and Electronics, Special Issue dedicated to the 25 Years Anniversary of the Engineering School (1976 - 2001), Vol. XLVI, ISSN 1221-4949, pg. 81-86, Editura Universității "L. Blaga", Sibiu 2001
119. **Vințan M** – *The zero sequence parameters of overhead wires, Part II - Comparison between different approximation expressions*, Acta Universitatis Cibiniensis, Technical Series. Electrical Engineering and Electronics, Special Issue dedicated to the 25 Years Anniversary of the Engineering School (1976 - 2001), Vol. XLVI, ISSN 1221-4949, pg. 87-92, Editura Universității "L. Blaga", Sibiu 2001