

## **Capitolul XX**

### **REGIMURI NESIMETRICE PERMANENTE**

#### **Introducere**

Ipoteza fundamentală care stă la baza calculului regimului permanent al sistemelor electroenergetice (SEE) este simetria perfectă a surselor de alimentare, rețelei și sarcinilor, la nivel structural, constructiv și al mărimilor de stare.

În exploatare, însă, intervin situații care se abat de la aceste ipoteze și conduc la așa-numitele regimuri nesimetrice, provocate de nesimetrii accidentale în structura sistemului.

Clasificarea nesimetriilor:

- După natură:
  - Nesimetrii accidentale, care apar accidental în structura sistemului și se manifestă sub forma unor scurtcircuite sau întreruperi
  - Nesimetrii de sarcină, generate de încărcarea inegală a celor trei faze, prin existența în rețea a unor consumatori trifazați nesimetrice sau de distribuirea neuniformă pe faze a consumatorilor monofazați sau bifazați.
- După tip:
  - Nesimetrii transversale, care se produc între faze și pământ și se numesc scurtcircuite
  - Nesimetrii longitudinale, care se manifestă prin apariția unor impedanțe inegale ale fazelor și se numesc întreruperi
- După modul de manifestare:
  - Nesimetrii simple
  - Nesimetrii multiple, care constau în apariția simultană a unor nesimetrii simple.

Acest curs studiază în detaliu nesimetriile accidentale simple și multiple de interes în exploatarea SEE, și anume:

- Nesimetrii transversale:
  - Scurtcircuitul monofazat (punerea la pământ monofazăată)
  - Scurtcircuitul bifazat
  - Scurtcircuitul bifazat cu punere la pământ
- Nesimetrii longitudinale
  - Întreruperea monofazăată
  - Întreruperea bifazăată

Scurtcircuitele reprezintă cele mai grave perturbații ce pot apărea în funcționarea SEE, provocând regimuri tranzitorii cu consecințe grave de ordin tehnic și economic. De aceea, un prim scop al studiului scurtcircuitelor nesimetrice, ca și în cazul scurtcircuitului trifazat, este dimensionarea corespunzătoare a unor elemente ale sistemului în faza de proiectare (întrerupătoare, relee, protecții). Alte obiective ale acestui studiu sunt verificarea la solicitările termice și electrodinamice, alegerea schemelor de funcționare ale stațiilor electrice, analiza stabilității tranzitorii ș.a.

### Teorema componentelor simetrice

Cea mai răspândită metodă de calcul folosită în studiul nesimetriilor SEE este teorema componentelor simetrice (a lui Fortescue) care afirmă că:

*Orice sistem trifazat nesimetric de mărimi electrice poate fi descompus în mod univoc în trei sisteme trifazate simetrice numite și de succesiune sau de secvență: direct(ă) invers(ă) și homopolar(ă).*

Prin convenție, se vor folosi în continuare următoarele notații:

- $a, b, c$  pentru fazorii sistemului nesimetric studiat
- $d, i, h$  pentru mărimile asociate sistemelor trifazate de secvență directă, inversă, respectiv homopolară.

Folosind aceste notații, pentru o mărime nesimetrică trifazată, de exemplu tensiunea, poate fi descompusă în componente de secvență astfel:

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{U}_{ah} + \underline{U}_{ad} + \underline{U}_{ai} \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{bh} + \underline{U}_{bd} + \underline{U}_{bi} \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{ch} + \underline{U}_{cd} + \underline{U}_{ci}\end{aligned}\quad (\text{XX.1})$$

Fiecare dintre cele trei sisteme simetrice de secvență este alcătuit din câte trei fazori de aceeași mărime (egali ca modul). În sistemul homopolar, toți trei sunt în fază

( $\underline{U}_{ah} = \underline{U}_{bh} = \underline{U}_{ch}$ ), iar în sistemele direct și invers, ei sunt defazați cu  $2\pi/3$  unul față de altul în sens direct (al acelor de ceas) cel direct și în sens invers, cel invers (Fig. XX.1)

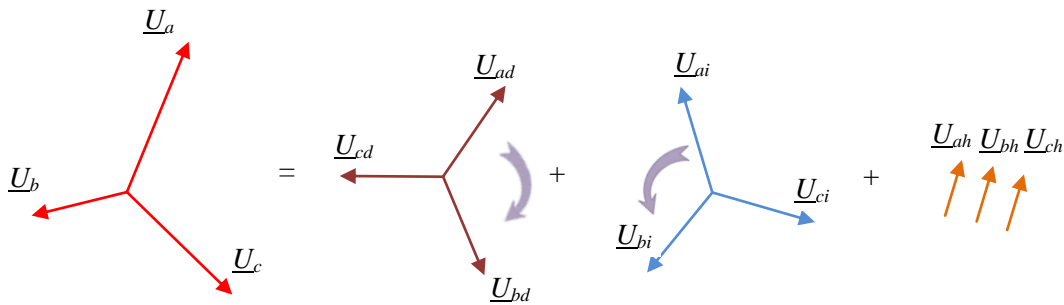


Fig. XX.1 Descompunerea unui sistem trifazat nesimetric în trei componente de secvență simetrice

Dacă, în vederea simplificării scrierii, se introduce operatorul de rotație:

$$a = e^{j \cdot 2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (\text{XX.2})$$

atunci fazorii de secvență directă și inversă de pe fazele  $b$  și  $c$  se pot exprima în funcție de cei ai fazei  $a$ :

$$\begin{aligned}\underline{U}_{bd} &= a^2 \cdot \underline{U}_{ad}, & \underline{U}_{cd} &= a \cdot \underline{U}_{ad} \\ \underline{U}_{bi} &= a \cdot \underline{U}_{ai}, & \underline{U}_{ci} &= a^2 \cdot \underline{U}_{ai}\end{aligned}\quad (\text{XX.3})$$

Rezultă că descrierea sistemului trifazat simetric din (XX.1) se poate face folosind doar componentele simetrice de secvență corespunzătoare fazei a. Acestea vor fi numite în continuare componente fundamentale și se vor nota mai simplu:  $\underline{U}_d$ ,  $\underline{U}_i$  și  $\underline{U}_h$

Astfel, sistemul (XX.1) se rescrie:

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_h + a^2 \cdot \underline{U}_d + a \cdot \underline{U}_i \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_h + a \cdot \underline{U}_d + a^2 \cdot \underline{U}_i\end{aligned}\quad (\text{XX.4})$$

care poate fi scrisă compact, în formă matriceală:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}\quad (\text{XX.5})$$

Relația inversă, de trecere de la mărimi de fază la mărimi simetrice de secvență este întotdeauna posibilă:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}\quad (\text{XX.6})$$

Din relațiile (XX.5) și (XX.6) rezultă că descompunerea unui sistem trifazat nesimetric după un sistem de componente simetrice de secvență este unică. Însă modulele și argumentele fazorilor simetrici și nesimetrici depind de cazul particular studiat, prin schema rețelei, parametrii electrici ai componentelor sale, locul și tipul nesimetrice etc.

Relațiile (XX.5) și (XX.6) sunt valabile formal pentru orice sistem trifazat nesimetric (de tensiuni, curenți, fluxuri magnetice etc.).

În regim permanent de funcționare, în orice punct al SEE, sistemele trifazate de tensiuni și curenți sunt sisteme de secvență directă. În cazul nesimetriilor, însă, suprapunerea celor trei sisteme simetrice de tensiuni și curenți determină reacții distincte din partea elementelor componente ale sistemului în raport cu fiecare secvență, parametrii schemelor echivalente de secvență având valori diferite. Prin urmare, se vor întocmi trei scheme echivalente monofazate independente, de secvență directă, inversă și homopolară, în fiecare regăsindu-se câte o componentă simetrică fundamentală de curent și de tensiune. În cadrul fiecărei scheme, sunt valabile toate legile fundamentale din electrotehnică (legea lui Ohm, teoremele lui Kirchhoff etc.), ele exprimând relații între curenți și tensiuni de aceeași secvență. Schema echivalentă monofazată construită în final se formează prin conectarea corespunzătoare a celor trei scheme de secvență, în funcție de tipul nesimetriei studiate.

Pentru întocmirea schemelor echivalente monofazate de secvență este necesară cunoașterea parametrilor acestor scheme pentru diversele elemente (generatoare, transformatoare, linii electrice etc.) care intră în componența lor. În general, se calculează impedanțe sau admitanțe de secvență.

### Parametrii schemelor de secvență directă, inversă și homopolară

Impedanțele opuse de către fiecare secvență sunt notate cu  $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i, \underline{Z}_h$ . În ceea ce privește legătura care există între aceste impedanțe, elementele unui SEE pot fi clasificate astfel:

- Elemente pentru care se poate considera inexistent cuplajul magnetic între circuitele de fază (grupe de către trei transformatoare monofazate care alcătuiesc un sistem trifazat, bobine de reactanță, unde se poate neglija influența mutuală între faze). În acest caz, impedanțele de secvență au aceeași valoare:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \underline{Z}_h$$

- Elemente la care circuitele de fază sunt cuplate între ele magnetic și în același timp imobile unul față de altul (linii electrice, transformatoare și autotransformatoare trifazate), la care impedanțele directă și inversă sunt egale și impedanța homopolară este diferită.

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i \neq \underline{Z}_h$$

- Elemente la care circuitele magnetice sunt cuplate magnetic și mobile unul față de celălalt (mașini electrice rotative), la care toate cele trei impedanțe de secvență diferă între ele.

$$\underline{Z}_d \neq \underline{Z}_i \neq \underline{Z}_h$$

Prin urmare, pentru linii și transformatoare, se impune analiza impedanțelor homopolare, iar pentru generatoare și consumatori, impedanțele inversă și homopolară, în condițiile în care impedanța de secvență directă este cunoscută.

### Parametrii de secvență homopolară ai liniilor electrice

În cazul liniilor electrice, impedanța longitudinală de secvență homopolară este mai mare decât impedanțele de secvență directă sau inversă, datorită fluxului magnetic de scăpări superior determinat, pe de o parte, de închiderea curentului homopolar și prin alte căi decât conductoarele active ale liniei (de exemplu, prin pământ) și, pe de altă parte, de cuplajul inductiv aditiv între conductoarele active.

#### *Impedanța homopolară a LEA fără conductor de protecție, simplu circuit*

Pentru calculul impedanței homopolare longitudinale se folosesc rezultatele cunoscute pentru o linie de tip conductor-pământ (LCP). Cercetările teoretice și experimentale arată că la calculul reactanței LCP trebuie să se țină seama de conductibilitatea pământului și de distribuția curenților prin pământ. S-a demonstrat că densitatea maximă a curentului prin pământ se obține în planul vertical al conductorului, la suprafața solului.

Linia conductor-pământ este asimilată cu o linie cu două conductoare identice, aflate la distanța  $D_p$  unul față de celălalt.

Distanța  $D_p$  se numește adâncime echivalentă de întoarcere și se calculează cu formula lui Carson

$$D_p = \frac{2,085 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \cdot \lambda \cdot 10^{-9}}} \quad [m] \quad (\text{SH.1})$$

unde  $f$  este frecvența curentului, în Hz și  $\lambda$ , conductivitatea pământului, considerată constantă și măsurată în  $1/(\Omega \cdot \text{cm})$ . În general,  $D_p \gg h$ . În lipsa unor date precise privind conductibilitatea pământului în zona prin care trece linia, se poate adopta o valoare medie  $D_p=1000$  m. În aceste condiții, reactanța inductivă lineică a liniei conductor-pământ se calculează cu expresia cunoscută din cazul liniei cu două conductoare:

$$x_0 = 0,1445 \cdot \log \frac{D_p}{r_e} \quad [\Omega / \text{km}] \quad (\text{SH.2})$$

unde  $r_e$  este raza echivalentă a conductorului, care permite considerarea reactanței interioare, nereprezentată în formula (SH.2) și indicată în literatura de specialitate pentru diverse tipuri de conductoare. Orientativ,  $r_e=0,8 \cdot r$ .

La determinarea rezistenței LCP trebuie să se țină seama, pe lângă rezistența lineică  $r_0$ , de rezistența suplimentară  $r_{p0}$ , datorată pierderilor de putere activă care au loc din cauza trecerii curentului electric prin pământ. Pentru  $f=50$  Hz, se consideră valoarea aproximativă constantă  $r_{p0}=0,05$   $\Omega/\text{km}$ . Rezultă că impedanța lineică a LCP se calculează cu expresia:

$$\underline{z}_0 = r_0 + r_{p0} + j \cdot x_0 = r_0 + r_{p0} + 0,1445 \cdot \log \frac{D_p}{r_e} \quad [\Omega / \text{km}] \quad (\text{SH.3})$$

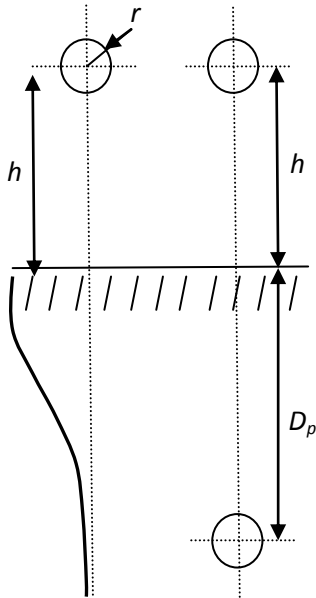


Fig. SH.1  
– Linia conductor-pământ

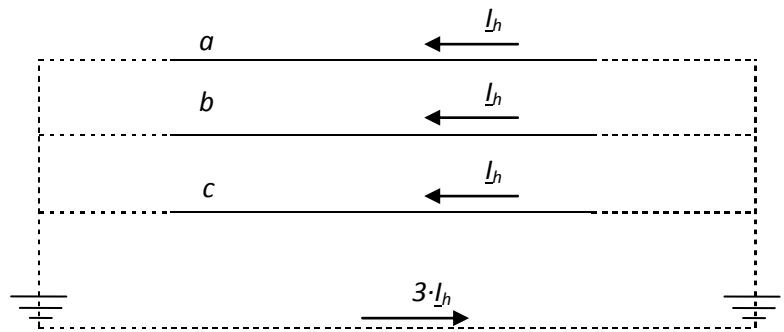


Fig. SH.2  
Circulația curentilor homopolari în  
LEA cu un singur circuit

*Impedanța de secvență homopolară a liniei trifazate cu un singur circuit*

În calculul impedanței de secvență homopolară trebuie ținut seama de faptul că o linie trifazată prin care circulă curenți homopolari se compune din trei linii monofazate de tip conductor-pământ cuplate între ele atât galvanic, prin pământ, cât și magnetic, prin cuplajul circuitelor de fază (Fig. SH.2), iar impedanța lineică homopolară se calculează cu relația:

$$\underline{z}_{h0} = \underline{z}_0 + 2 \cdot \underline{z}_{m0} \quad (\text{SH.4})$$

În care  $\underline{z}_{m0} = r_{p0} + 0,1445 \cdot \log \frac{D_p}{D_m} \quad [\Omega / km]$  - impedanța mutuală lineică între oricare două linii monofazate din Fig. SH.2

Ținând cont de (SH.3), relația (SH.4) se rescrie

$$\underline{z}_{h0} = r_0 + 3 \cdot r_{p0} + 0,1445 \cdot \log \frac{D_p}{\sqrt[3]{r_e \cdot D_m^2}} \quad [\Omega / km] \quad (\text{SH.5})$$

unde  $r_m = \sqrt[3]{r_e \cdot D_m^2}$  - raza medie geometrică a celor trei conductoare de fază și  $D_m = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{ac} \cdot d_{bc}}$  - distanța medie geometrică dintre conductoarele de fază  $a, b$  și  $c$ .

Valoarea rezistenței de secvență homopolară rezultă cu mult mai mare decât valoarea impedanței de secvență directă, din cauza cuplajului aditiv între circuitele de fază în cazul sistemului de curenți homopolari, spre deosebire de sistemele direct și invers, când fiecare circuit de fază se află în cuplaj rezultat diferențial cu celelalte două.

Dacă linia are lungimea  $l$  (km), impedanța ei de secvență homopolară rezultă

$$\underline{Z}_h = \underline{z}_{h0} \cdot l \quad [\Omega] \quad (\text{SH.6})$$

*Impedanța de secvență homopolară a LEA cu dublu circuit fără conductor de protecție*

Dacă se consideră cazul general în care cele două circuite ale liniei nu sunt identice, la întocmirea schemei electrice de secvență homopolară trebuie să se țină seama atât de impedanțele proprii de secvență homopolară ale fiecărui circuit,  $Z_{11,h}$  și  $Z_{22,h}$ , calculate cu relațiile (SH.5) și (SH.6), cât și de impedanța mutuală de secvență homopolară dintre circuite,  $Z_{12,h}$ . Fiecare conductor de fază al unui circuit se află în cuplaj cu cele trei conductoare de fază ale celui de-al doilea circuit, astfel încât valoarea impedanței mutuale se va determina cu relația:

$$\underline{z}_{12,h} = 3 \cdot \left( r_{p0} + 0,1445 \cdot \log \frac{D_p}{D_{12}} \right) \cdot l \quad [\Omega] \quad (\text{SH.7})$$

unde  $D_m = \sqrt[9]{d_{a1a2} \cdot d_{a1b2} \cdot d_{a1c2} \cdot d_{b1a2} \cdot d_{b1b2} \cdot d_{b1c2} \cdot d_{c1a2} \cdot d_{c1b2} \cdot d_{c1c2}}$  - distanța medie geometrică dintre conductoarele celor două circuite.

Mai jos sunt indicate schemele echivalente monofazate de secvență homopolară și relațiile de calcul pentru trei moduri diferite de conectare a circuitelor la cele două capete ale liniei.

Schema monofilară	Schema echivalentă de secvență homopolară	Parametrii de secvență
Circuite conectate la aceleași bare la ambele capete ale liniei		
		$\underline{Z}_{1,h} = \frac{\underline{Z}_{11,h} \cdot \underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}^2}{\underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}}$ $\underline{Z}_{2,h} = \frac{\underline{Z}_{11,h} \cdot \underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}^2}{\underline{Z}_{11,h} - \underline{Z}_{12,h}}$
Circuite conectate la aceeași bară la un capăt al liniei		
		$\underline{Z}_{1,h} = \underline{Z}_{11,h} - \underline{Z}_{12,h}$ $\underline{Z}_{2,h} = \underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}$
Circuite conectate la bare diferite la ambele capete ale liniei		
		$\underline{Z}_{1,h} = \frac{\underline{Z}_{11,h} \cdot \underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}^2}{\underline{Z}_{22,h}}$ $\underline{Z}_{2,h} = \frac{\underline{Z}_{11,h} \cdot \underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}^2}{\underline{Z}_{11,h}}$ $\underline{Z}_{m,h} = \frac{\underline{Z}_{11,h} \cdot \underline{Z}_{22,h} - \underline{Z}_{12,h}^2}{\underline{Z}_{12,h}}$

În funcție de soluția constructivă adoptată, conductoarele de protecție ale LEA pot influența în bună măsură valoarea reactanței de secvență homopolară. LEA de IT folosesc soluția constructivă pentru care conductoarele de protecție sunt legate direct la pământ, astfel încât prezența lor trebuie luată în considerare la evaluarea reactanței de secvență homopolară.

Astfel, în regimurile nesimetrice, curenții de secvență homopolară care circulă prin conductoarele active ale liniei (toți în același sens) produc un flux magnetic important care induce în conductoarele de protecție t.e.m. cu valori semnificative. Conductoarele de protecție fiind legate la pământ, aceste t.e.m. produc curenți de reacție, care circulă în sens invers curenților homopolari care i-au creat. Pe ansamblu, câmpul magnetic rezultat scade și în același sens variază și reactanța de secvență homopolară.

Măsura în care se produce această variație depinde de numeroși factori, cum ar fi natura materialului din care sunt realizate conductoarele de protecție, numărul acestora, geometria coronamentului stâlpului ș.a. În literatura de specialitate sunt recomandate o serie de formule de calcul care țin seama de influența conductoarelor de protecție asupra reactanței de secvență homopolară a LEA. Orientativ, se pot folosi următoarele valori:

	$x_{h0}/x_0$
LEA simplu circuit fără conductor de protecție	3,5
LEA simplu circuit cu conductor de protecție din oțel	3
LEA simplu circuit cu conductor de protecție din oțel-aluminiu	2
LEA dublu circuit fără conductor de protecție	5,5
LEA simplu circuit cu conductor de protecție din oțel	4,7
LEA simplu circuit cu conductor de protecție din oțel-aluminiu	3

Impedanțele homopolare ale LEC sunt mai dificil de calculat. Dacă linia este formată din cablu trifazat fără manta metalică, la punerea la pământ simplă sau dublă se păstrează formulele de calcul de la LEA.

Dacă există manta metalică de protecție, ea se comportă precum conductorul de protecție de la LEA și prin ea vor circula curenți induși care vor scădea valoarea impedanței homopolare. Mantaua este pusă la pământ atât la capetele LEC, cât și pe traseu, la îmbinări, astfel încât nu există o regulă generală.

Experiența practică a arătat două cazuri extreme: reactanță homopolară maximă pentru manta pusă perfect la pământ ( $X_{hM}$ ) și reactanță minimă pentru manta izolată perfect ( $X_{hm}$ ), iar raportul lor este:

$$\frac{X_{hM}}{X_{hm}} = 10 \div 12 \quad (\text{SH.8})$$

De obicei, impedanțele homopolare ale LEC se determină direct, prin măsurători.

Pentru unele studii ale regimurilor nesimetrice, cum ar fi cele legate de problema tratării neutrului în rețelele de MT, în schemele echivalente de secvență homopolară trebuie inclusă și susceptanța capacitivă corespunzătoare a liniilor electrice. Una din formulele de calcul recomandate în literatura de specialitate, care poate fi aplicată cu suficientă precizie atât în cazul liniilor simplu circuit, cât și în cazul liniilor dublu circuit este următoarea:

$$X_{LEA,h} = \omega \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot L}{3} \cdot \frac{1}{\ln \frac{2 \cdot h_{mg}}{\sqrt[3]{r \cdot D_{mg}^2}}} \approx \frac{5.815 \cdot 10^{-3} \cdot L}{\ln \frac{2 \cdot h_{mg}}{\sqrt[3]{r \cdot D_{mg}^2}}} \quad [\text{S}] \quad (\text{SH.9})$$

unde:  $h_{mg}$  – înălțimea medie geometrică de suspendare a conductoarelor față de pământ [m];  $D_{mg}$  – distanța medie geometrică între conductoarele active [m];  $r$  – raza conductorului sau raza medie echivalentă în cazul utilizării fazelor scindate ( $r_m = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$ ) [m].

### **Parametrii de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor**

În schema echivalentă de secvență homopolară prezența transformatoarelor și autotransformatoarelor se manifestă în mod diferit, în funcție de conexiunile înfășurărilor,

Pe de o parte, tipul conexiunii înfășurărilor pe partea cărora se produce nesimetria, considerată ca sursă de curenți homopolari, determină posibilitatea sau imposibilitatea circulației curenților de secvență homopolară. Deoarece prin natura lor curenții de secvență homopolară sunt curenți care se închid prin pământ, rezultă că atunci când înfășurarea transformatorului pe partea pe care se produce nesimetria folosește conexiunea în triunghi sau stea cu neutrul izolat, impedanța longitudinală de secvență homopolară a transformatorului va avea o valoare *infinită*, reprezentând un punct de întrerupere în schema echivalentă de secvență homopolară. Dimpotrivă, dacă înfășurarea pe partea căreia se produce nesimetria folosește conexiunea în stea cu neutrul legat la pământ direct sau printr-o impedanță, curenții homopolari se închid la pământ prin neutrul steli. În acest caz, impedanța longitudinală de secvență homopolară a transformatorului va avea o valoare finită.

Pe de altă parte, dacă transformatorul apare în schema echivalentă de secvență homopolară cu o impedanță de valoare finită, valoarea propriu-zisă a aceste impedanțe este determinată, printre altele, de tipul conexiunii celeilalte înfășurări, pe partea pe care nu apare



nesimetria. Cele trei cazuri posibile sunt prezentate sintetic, sub forma schemelor monofazate și a celor echivalente în Fig. SH.3 –SH.5. În aceste figuri se consideră că nesimetria se produce pe partea înfășurării notate cu 1, iar curenții homopolari în cele două înfășurări se notează cu  $I_{1,h}$  și  $I_{2,h}$ . De asemenea, în scheme echivalente în T ale transformatorului,  $Z_1$  și  $Z_2$  reprezintă impedanțele longitudinale de secvență directă ale celor două înfășurări, iar  $Z_{m,h}$  reprezintă impedanța de magnetizare de secvență homopolară (toate impedanțele sunt raportate la înfășurarea notată cu 2).

În cazul conexiunii  $Y_0d$  (Fig. SH.3), conexiunea în triunghi de pe partea înfășurării 2 acționează ca o capcană pentru curenții de secvență homopolară: aceștia circulă în cele trei înfășurări în buclă, fără a produce curenți homopolari pe cele trei faze. În consecință, în schema echivalentă de secvență homopolară borna de ieșire a înfășurării 2 este legată direct la pământ, iar legătura cu rețeaua de pe această parte dispare. Impedanța homopolară echivalentă a transformatorului are expresia:

$$Z_{T,h} = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_{m,h}}{Z_2 + Z_{m,h}} \quad (\text{SH.10})$$

În cazul conexiunii  $Y_0y$  (Fig. SH.4), absența legăturii la pământ a neutrului înfășurării 2 nu permite circulația curenților de secvență homopolară. Ca urmare, în schema echivalentă de secvență homopolară, înfășurarea 2 rămâne în gol, iar impedanța homopolară a transformatorului va fi:

$$Z_{T,h} = Z_1 + Z_{m,h} \quad (\text{SH.11})$$

În cazul conexiunii  $Y_0y_0$  (Fig. SH.5), curenții homopolari circulă prin ambele înfășurări și pătrund și în rețeaua conectată la bornele înfășurării 2 a transformatorului, în măsura în care în această rețea mai există cel puțin un punct neutru legat la pământ. Dacă un asemenea punct neutru nu există, situația este identică cu cea din Fig. D.4. În acest caz, schema echivalentă de secvență homopolară va conține atât transformatorul (prin impedanțele  $Z_1$ ,  $Z_2$  și  $Z_{m,h}$ ), cât și rețeaua, prin schema echivalentă a acesteia. De această dată, nu se mai poate defini o impedanță homopolară echivalentă a transformatorului.

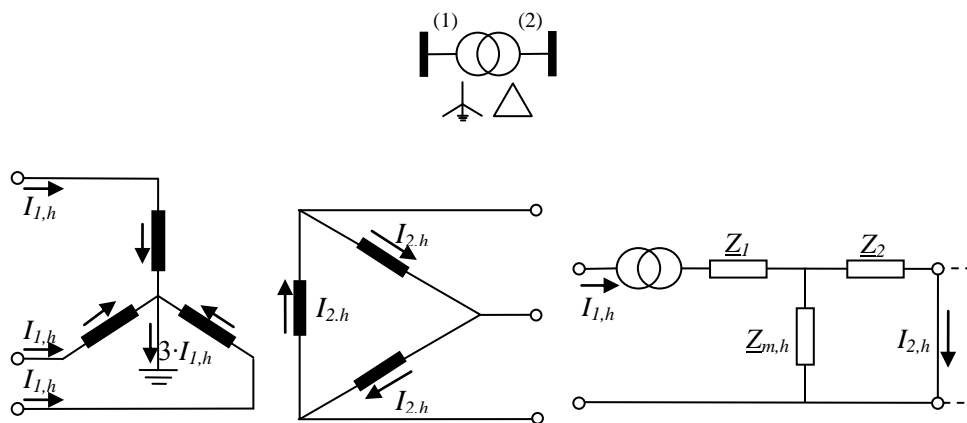


Fig. SH.3 – Tratarea schemei de secvență homopolară în cazul conexiunii  $Y_0d$ .

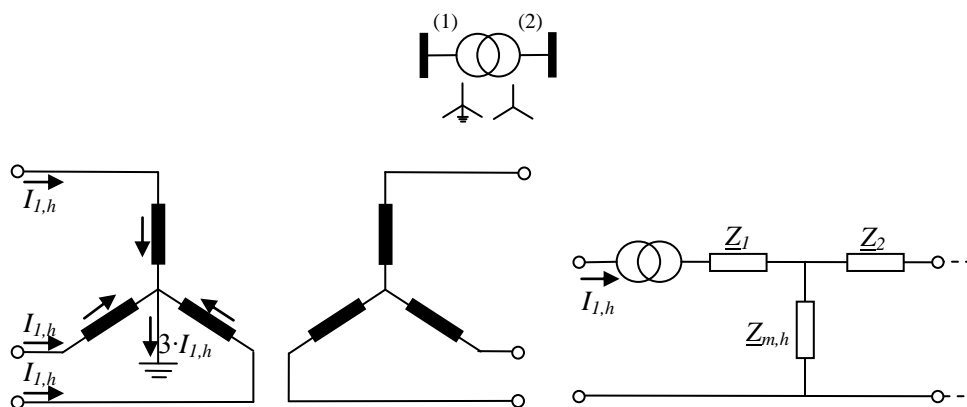


Fig. SH.4 – Tratarea schemei de secvență homopolară în cazul conexiunii Y0y.

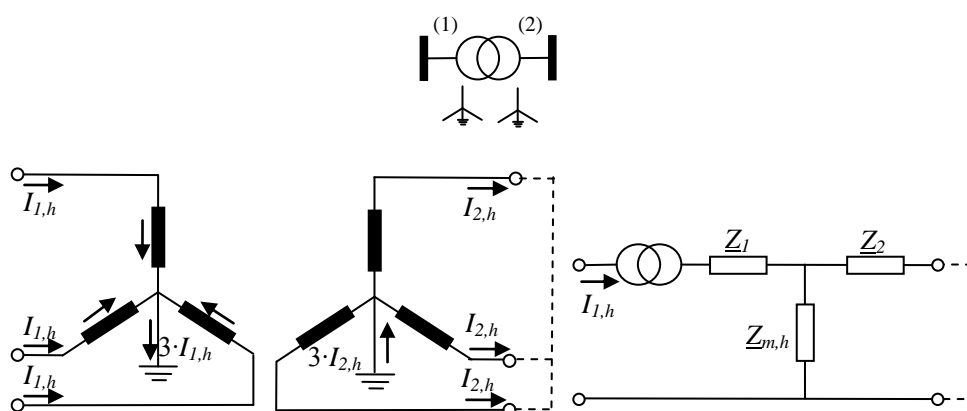


Fig. SH.5 – Tratarea schemei de secvență homopolară în cazul conexiunii Y0y0.

Valoarea impedanței de magnetizare de secvență homopolară  $Z_{m,h}$  este determinată cu prioritate de tipul constructiv al transformatorului. Astfel, pentru transformatoarele trifazate cu 4 sau 5 coloane sau pentru grupele de câte 3 transformatoare monofazate, impedanța  $Z_{m,h}$  este foarte mare, teoretic infinită, iar în schemele echivalente din Fig. SH.3 – 5 se neglijează.

Pentru transformatoarele trifazate cu 3 coloane (cazul majorității transformatoarelor de putere), valoarea reactanței de magnetizare de secvență homopolară este mult mai mică și trebuie luată în considerare. Cu titlu orientativ, atunci când reactanța de magnetizare de secvență homopolară nu poate fi măsurată, pentru ea se pot alege valori de ordinul  $X_{m,h} = (0.3 - 1.0) \cdot Z_T$ , unde  $Z_T$  este impedanța nominală a transformatorului.

În cazul în care neutrul unei înfășurări este legat la pământ printr-o impedanță nenulă, în schemele echivalente impedanța longitudinală a înfășurării respective se înseriază cu o impedanță de valoare triplă față de cea din neutru, pentru a ține seama de faptul că prin această din urmă impedanță circulă, la pământ, suma curenților homopolari de pe cele trei faze. Astfel, în cazul în care se consideră legarea neutrului la pământ printr-o impedanță, cele trei scheme echivalente din Fig. SH.3 – 5 capătă formele din Fig. SH.6.

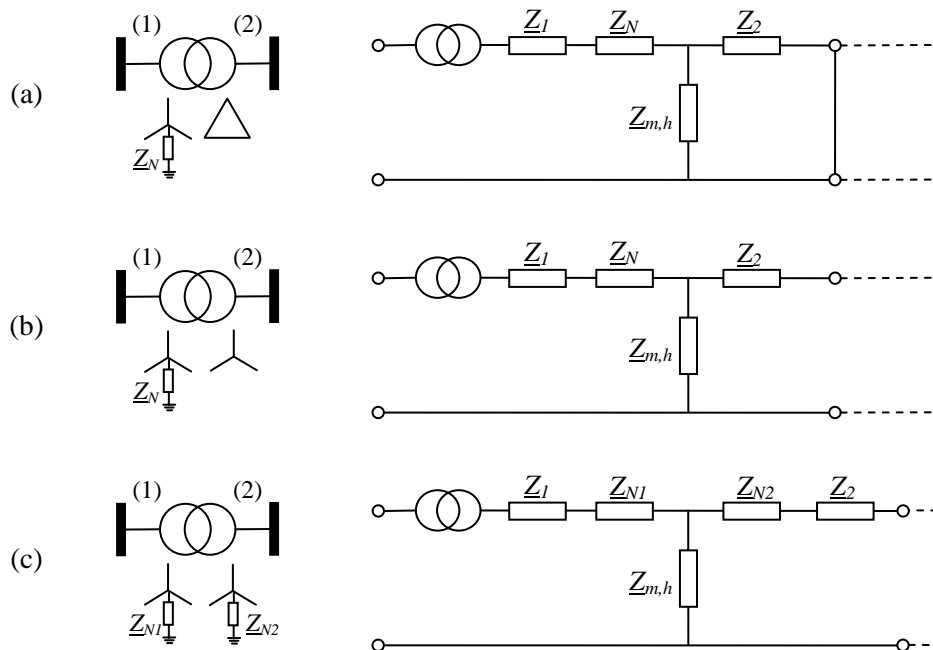


Fig. SH.6 – Scheme echivalente de secvență homopolară în cazul legării neutrului la pământ prin impedență.

Pentru transformatoarele cu trei înfășurări schemele echivalente de secvență homopolară se întocmesc respectând aceleași reguli ca și în cazul transformatoarelor cu două înfășurări

În cazul autotransformatoarelor, legătura galvanică dintre cele două înfășurări de înaltă tensiune face posibilă circulația curenților homopolari prin autotransformator indiferent dacă punctul neutru al celor două înfășurări este sau nu legat la pământ. Schema echivalentă este de forma celei din Fig. SH.5.

### Parametrii de secvență ai generatoarelor și sarcinilor

Dacă în calculul regimului permanent sarcinile și generatoarele se reprezintă doar prin injecții de curenți sau puteri complexe în noduri, analiza nesimetriilor necesită considerarea structurii și proprietăților interne ale surselor și sarcinilor, care se vor reprezenta în schema monofazată de secvență directă prin laturi generatoare sau consumatoare, conectate între nodul respectiv și neutrul comun al schemei.

Deoarece sistemul trifazat de tensiuni electromotoare (t.e.m.) induse în înfășurarea statorului generatorului sincron este un sistem simetric de secvență directă, schema de secvență directă este singura schemă activă de secvență, în care o latură generatoare va reprezenta o sursă reală de tensiune, incluzând impedența internă și t.e.m. internă, sau o sursă reală de curent. Impedența internă se consideră de obicei numai prin reactanța inductivă internă care, în funcție de scopul calculelor și momentul procesului de scurtcircuit, va fi reactanța supratranzitorie  $X''_d$ , reactanța tranzitorie  $x'_d$  sau reactanța sincronă  $x_d$ . Acestor reactanțe le corespund t.e.m.  $E''$ ,  $E'$  și  $E$ .

În schema echivalentă de secvență inversă, generatorul sincron se va reprezenta numai prin reactanța de secvență inversă  $X_{gi}$ . Valoarea acesteia nu este riguros constantă, depinzând de simetria constructivă a rotorului și de condițiile exterioare mașinii. În cazul mașinilor cu înfășurări de amortizare, se recomandă determinarea reactanței inverse cu una dintre relațiile:

$$X_{gi} = \sqrt{X_d'' \cdot X_q''} \quad \text{sau} \quad X_{gi} = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (\text{SH.12})$$

Ce de-a doua relație este considerată mai precisă în cazul unei reactanțe mari a rețelei exterioare, între generator și locul scurtcircuitului. Pentru mașini fără înfășurări de amortizare, pentru reactanța inversă se vor folosi valorile reactanțelor  $X_d'$  și  $X_q$ . Se recomandă ca valori orientative

- $X_{gi} \approx 1,45 \cdot X_d'$  pentru mașini fără înfășurări de amortizare
- $X_{gi} \approx 1,22 \cdot X_d''$  sau  $X_{gi} \approx X_d''$  pentru turbogeneratoare și mașini cu înfășurări de amortizare.

Aceleași scheme sunt valabile și pentru compensatoarele și motoarele sincrone.

În schema de secvență homopolară, reactanțele homopolare ale generatoarelor sincrone se consideră de valoare infinită, deoarece înfășurarea trifazată a statorului este conectată în stea cu neutrul izolat sau legat la pământ printr-o impedanță de valoare mare.

Toate reactanțele menționate sunt exprimate în unități relative nominale.

La analiza nesimetriilor într-un sistem local, este necesar să se determine parametrii de secvență ai generatorului echivalent nodului de echilibru. Reactanțele de secvență ale generatorului echivalent pot fi considerate de aceeași valoare și se calculează cu relația:

$$X_{gd} = X_{gi} = X_{gh} = \frac{U_n^2}{S_{sc}} \quad (\text{SH.13})$$

unde  $U_n$  este tensiunea nodului de alimentare, iar  $S_{sc}$ , puterea de scurtcircuit trifazat a sistemului extern în nodul de alimentare.

Reactanța homopolară calculată cu relația (SH.13) este o valoare aproximativă, ce poate fi mult eronată, iar pentru calculul ei precis trebuie cunoscute structura și parametrii sistemului extern.

Sarcinile dintr-un SEE sunt modelate în schema de secvență directă prin impedanțe complexe, constante, calculate în funcție de tensiunea nodului și puterile activă și reactivă consumate de regim permanent (liniarizarea sarcinii).

Impedanța de secvență inversă are o valoare mult diferită, din cauza motoarelor electrice prezente în structura sarcinii complexe a nodului. Sunt recomandate următoarele valori, exprimate în u.r. în raport cu impedanța de secvență directă:

$$\underline{Z}_{si} = 0,19 + j \cdot 0,36, \text{ pentru rețele cu } U_n > 35 \text{ kV}$$

$$\underline{Z}_{si} = 0,18 + j \cdot 0,24, \text{ pentru rețele cu } U_n = 6-10 \text{ kV}$$

Motoarele asincrone de mare putere ( $>1$  MVA) apropiate de locul defectului au o contribuție semnificativă la valoarea curentului de scc, fiind modelate adesea separat de restul sarcinii. În schema de secvență directă, motorul asincron se reprezintă prin reactanța supratranzitorie  $X''$  și t.e.m.  $E''$ . Reactanța supratranzitorie se calculează, în u.r. nominale, cu expresia  $X'' = 1/i_{p*}$ , unde  $i_{p*}$  este raportul dintre curentul de pornire și cel nominal. În lipsa unor date precise, se pot adopta valorile  $X'' = 0,2$  și  $E'' = 0,9$ .

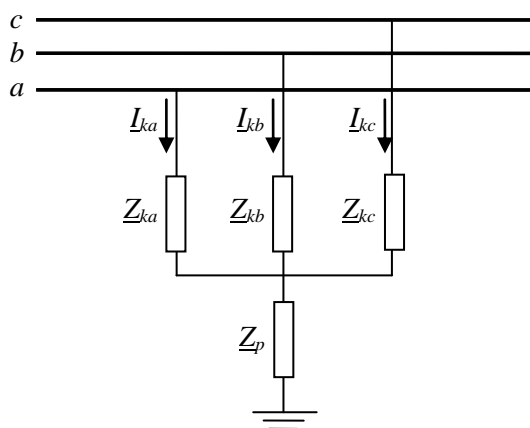
În schema de secvență inversă, motorul asincron intervine numai prin reactanța de secvență inversă, egală cu cea de secvență directă.

Reprezentarea sarcinii în schemele homopolare nu se poate realiza după reguli precise. Impedanța de secvență homopolară a sarcinii generalizate a unui nod are o valoare finită, care depinde de structura și parametrii rețelei de alimentare a tuturor receptoarelor componente.

## Nesimetrii transversale

### Principii generale de modelare și calcul

Oricare nesimetrie transversală apărută într-un nod  $k$  al unui SEE se poate reprezenta printr-o derivație transversală, între nodul  $k$  și pământ, care conține trei impedanțe diferite pe cele trei faze  $\underline{Z}_{ka}$ ,  $\underline{Z}_{kb}$ ,  $\underline{Z}_{kc}$ , și o impedanță comună,  $\underline{Z}_p$  (Fig. XX.2). Pentru simplificarea calculului, unei abordări generale urmate de particularizarea rezultatelor la cazuri concrete i se preferă modelarea directă a nesimetriei transversale de interes, care se studiază independent.



Dintre simetriile transversale, d  
scurtcircuitele nesimetrice:

- scurtcircuitul monofazat (FN)
- scurtcircuitul bifazat (2F)
- scurtcircuitul bifazat cu punere la pământ (2FN)

În rețelele cu neutrul izolat, scurtcircuitul FN și 2FN se mai numesc *simplă*, respectiv *dublă punere la pământ*.

Frecvența de apariție a unui tip de scurtcircuit nu reprezintă o măsură a gravității efectelor sale astfel, deși scurtcircuitul trifazat apare cel mai puțin frecvent (FN - 65%, 2FN - 20%, 2F - 10%, 3F - 5%), studiul său este cel mai important

pentru verificarea și dimensionarea echipamentelor dintr-o rețea. Însă, în unele situații, scurtcircuitul nesimetric determină solicitări mai mari ale instalațiilor, de care trebuie să se țină seama.

În toate tipurile de scurtcircuit nesimetric, o fază se află în stare diferită față de celelalte două (defectă în cazul FN ori sănătoasă în cazul 2F sau 2FN). În continuare, această fază se consideră a fi faza  $a$ , care va fi numită *fază de referință* și componentele simetrice de tensiune și curent  $\underline{U}_{kh}$ ,  $\underline{U}_{kd}$ ,  $\underline{U}_{ki}$ ,  $\underline{I}_{kh}$ ,  $\underline{I}_{kd}$ ,  $\underline{I}_{ki}$ , se aleg drept componente fundamentale. Între ele, se pot scrie relații de tipul (XX.5) și (XX.6).

De asemenea, prin alegerea convenabilă a impedanțelor  $\underline{Z}_{ka}$ ,  $\underline{Z}_{kb}$ ,  $\underline{Z}_{kc}$  și  $\underline{Z}_p$ , tinzând spre 0 sau spre  $\infty$ , se pot obține toate tipurile de scurtcircuite. De exemplu, pentru  $\underline{Z}_p = 0$ ,  $\underline{Z}_{ka} = 0$  și  $\underline{Z}_{kb} = \underline{Z}_{kc} = \infty$ , se obține scurtcircuitul monofazat metalic, fără rezistență a arcului electric  $r_a$ . Condiția  $r_a = 0$  va fi considerată implicit în toate calculele care urmează.

Pentru fiecare tip de nesimetrie, se pot scrie anumite condiții la limită. Pentru scurtcircuitul monofazat metalic, tensiunea pe faza defectă  $\underline{U}_{ka}$  este nulă, iar curenții transversali de pe fazele sănătoase  $\underline{I}_{kb}$ ,  $\underline{I}_{kc}$  sunt, de asemenea, nuli. În funcție de aceste condiții, se stabilește modul de conectare al schemelor monofilare de secvență, din care va rezulta sistemul de ecuații liniare ce are ca necunoscute mărimile de secvență.

Algoritmul general de studiu al nesimetriilor transversale cuprinde următorii pași:

1. Stabilirea și scrierea condițiilor la limită pentru tipul de nesimetrie studiat.
2. Rescrierea condițiilor la limită din mărimi de fază ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) în mărimi de secvență ( $d$ ,  $i$ ,  $h$ ).
3. Identificarea modului de conectare a schemelor monofilare de secvență și construirea schemei echivalente a circuitului, în raport cu bornele nesimetriei.
4. Deducerea din schema echivalentă a curentului de secvență directă.

5. Determinarea, pe baza acestui curent, a celorlalte mărimi necunoscute de secvență (curenți și tensiuni)
6. Trecerea de la mărimi de secvență la mărimi de fază și determinarea expresiilor curenților și tensiunilor de fază la locul de defect.
7. Întocmirea diagramelor fazoriale pentru mărimile de fază și cele de secvență.

Dintre schemele monofilare de secvență, una este activă, cea de secvență directă, iar celelalte două (inversă și homopolară) sunt pasive (Fig. XX.3).

Aplicând teorema generatorului echivalent de tensiune (Thévenin), schema de secvență directă poate fi înlocuită, în raport cu bornele sale, cu un generator real de tensiune având impedanța internă  $\underline{Z}_{kd}$  egală cu impedanța echivalentă a schemei de secvență directă pasivizate și tensiunea electromotoare (t.e.m.)  $\underline{E}_k$  egală cu tensiunea de funcționare în gol  $\underline{U}_{k0}$  ( $\underline{I}_{kd} = 0$ ) la bornele precizate. Aceasta reprezintă tensiunea de fază în nodul  $k$  din regimul permanent anterior scurtcircuitului, care este cunoscută.

Schemele de secvență inversă și homopolară se înlocuiesc prin impedanțele lor echivalente,  $\underline{Z}_{ki}$  și  $\underline{Z}_{kh}$ .

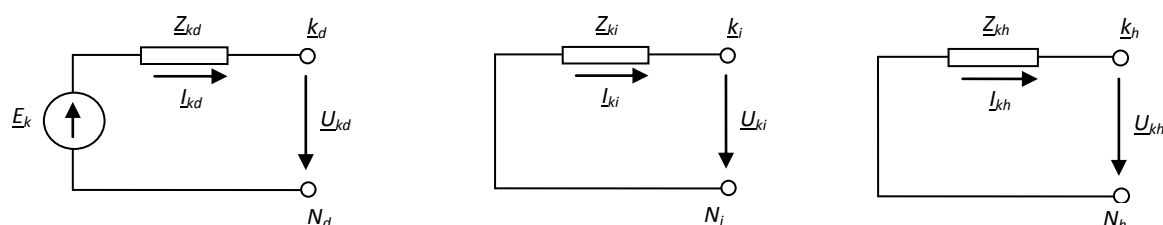


Fig. XX.3 Reprezentarea schemelor de secvență directă, inversă și homopolară pentru studiul nesimetriilor transversale

Scriind pentru aceste scheme legea lui Ohm generalizată, se obține sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{U}_{kd} = \underline{U}_{k0} - \underline{Z}_{kd} \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{ki} = -\underline{Z}_{ki} \cdot \underline{I}_{ki} \\ \underline{U}_{kh} = -\underline{Z}_{kh} \cdot \underline{I}_{kh} \end{cases} \quad (\text{XX.7})$$

care conține șase necunoscute, trei componente simetrice de tensiune și trei de curent.

### Scurtcircuitul monofazat (FN)

Pentru acest tip de nesimetrie, schema de principiu și condițiile la limită sunt:

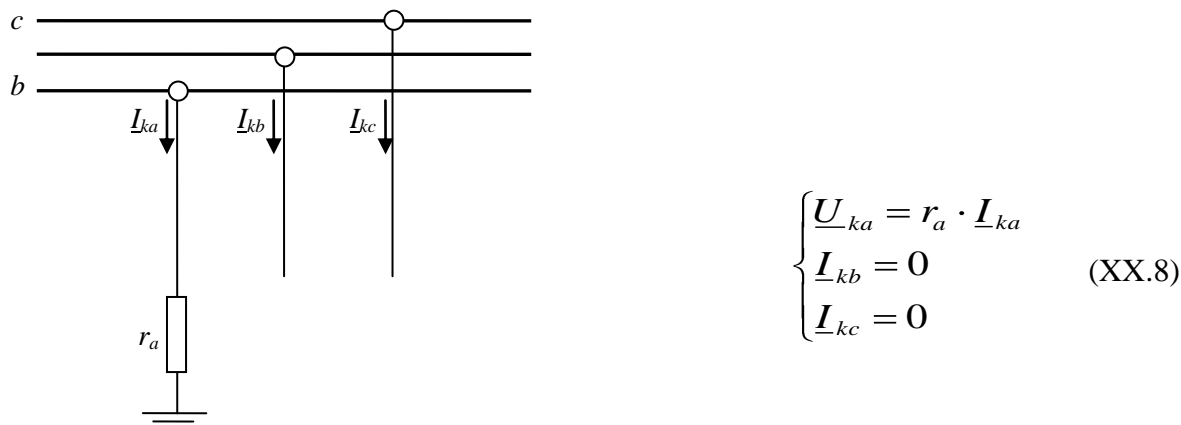


Fig. XX.4 Schema de principiu pentru scurtcircuitul FN

Relațiile (XX.8) se rescriu în componente de secvență astfel:

$$\begin{cases} \underline{U}_{kh} + \underline{U}_{kd} + \underline{U}_{ki} = r_a \cdot \underline{I}_{kh} + \underline{I}_{kd} + \underline{I}_{ki} \\ \underline{I}_{kh} + a^2 \underline{I}_{kd} + a \cdot \underline{I}_{ki} = 0 \\ \underline{I}_{kh} + a \cdot \underline{I}_{kd} + a^2 \cdot \underline{I}_{ki} = 0 \end{cases} \quad (\text{XX.9})$$

de unde rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{kh} = \underline{I}_{kd} = \underline{I}_{ki} &= \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{ka} \\ \underline{U}_{kh} + \underline{U}_{kd} + \underline{U}_{ki} &= 3 \cdot r_a \cdot \underline{I}_{kd} \end{aligned} \quad (\text{XX.10})$$

Ecuatiile (XX.10) indică faptul că cele trei scheme de secvență sunt conectate în serie (curenți egali) și debitează pe o rezistență de valoare  $3 \cdot r_a$  (Fig XX.5).

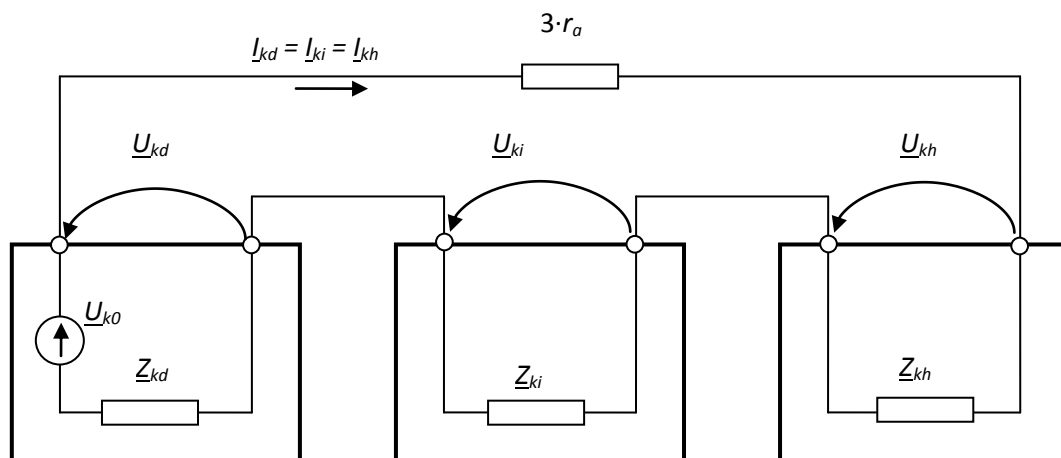


Fig. XX.5 Schema echivalentă a scurtcircuitului monofazat



Din această schemă, aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff, rezultă imediat expresia curentului de secvență directă, egal, conform primei ecuații (XX.10) cu ceilalți curenți de secvență, invers și homopolar:

$$\underline{I}_{kd} = \underline{I}_{ki} = \underline{I}_{kh} = \frac{\underline{U}_{ko}}{\underline{Z}_{kd} + \underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \quad (\text{XX.11})$$

Componentele de secvență ale tensiunii rezultă din relațiile (XX.7), în a căror primă ecuație  $\underline{U}_{ko}$  se înlocuiește conform relației (XX.11):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{kd} &= \underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{ki} &= -\underline{Z}_{ki} \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{kh} &= -\underline{Z}_{kh} \cdot \underline{I}_{kd} \end{aligned} \quad (\text{XX.12})$$

Cunoscând toate componentele simetrice, din relațiile (XX.5) scrise pentru tensiuni și curenți se deduc mărimile de fază la locul scurtcircuitului:

- Curentul de scurtcircuit monofazat:

$$\underline{I}_k^{FN} = \underline{I}_{ka} = 3 \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.13})$$

- Tensiunea fazei cu defect:

$$\underline{U}_{ka} = 3 \cdot r_a \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.14})$$

- Tensiunile fazelor sănătoase:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{kb} &= [a^2 - 1] \underline{Z}_{kh} + [a^2 - a] \underline{Z}_{ki} + 3 \cdot r_a \cdot a^2 \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{kc} &= [a - 1] \underline{Z}_{kh} + [a - a^2] \underline{Z}_{ki} + 3 \cdot r_a \cdot a \cdot \underline{I}_{kd} \end{aligned} \quad (\text{XX.15})$$

În scopul realizării unor estimări practice, se admite ipoteza simplificatoare a unui scurtcircuit metalic ( $r_a = 0$ ) și a neglijării rezistențelor din schemele de secvență, adică:  $\underline{Z}_{K,d} \approx j \cdot X_{K,d}$ ,  $\underline{Z}_{K,i} \approx j \cdot X_{K,i}$  și  $\underline{Z}_{K,h} \approx j \cdot X_{K,h}$ . În acest caz, se pot trasa diagramele fazoriale la locul scurtcircuitului, alegând fazorul  $\underline{U}_{k0}$  ca origine de fază (Fig. XX.6).

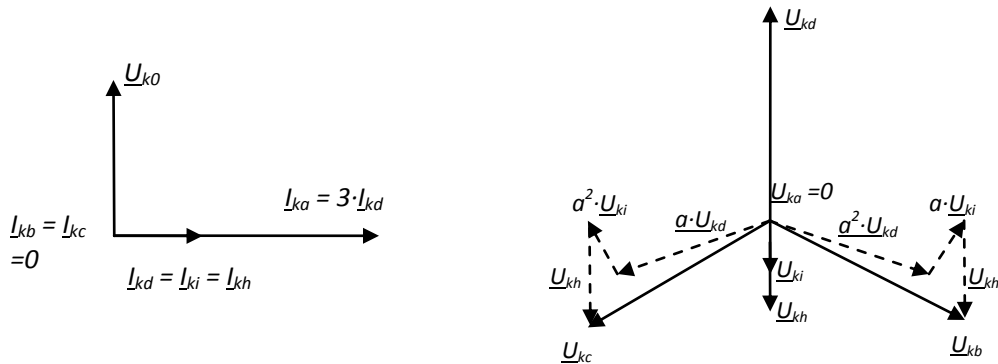


Fig. XX.6 Diagramele fazoriale ale curenților și tensiunilor la locul scc FN în cazul neglijării rezistențelor

Tensiunea de secvență directă  $\underline{U}_{kd}$  este în fază cu tensiunea  $\underline{U}_{k0}$ , iar tensiunile de secvență inversă și homopolară,  $\underline{U}_{ki}$  și  $\underline{U}_{kh}$ , sunt în opoziție de fază cu tensiunea  $\underline{U}_{k0}$ . Pe de altă parte, deoarece s-au neglijat rezistențele, curenții de secvență  $\underline{I}_{ki}$  și  $\underline{I}_{kh}$  și implicit curentul de defect  $\underline{I}_{ka}$  sunt defazați cu  $\pi/2$  radiani în urma tensiunii  $\underline{U}_{k0}$ . Fazorii  $\underline{U}_{kb}$  și  $\underline{U}_{kc}$  se obțin prin compunerea fazorilor de secvență, folosind și operatorul  $a$ .

Din diagrama fazorială din Fig. XX.6 se constată că tensiunile pe fazele sănătoase sunt egale în modul:

$$|\underline{U}_{kb}| = |\underline{U}_{kc}| \quad (\text{XX.16})$$

și sunt defazate cu un unghi  $\Theta_{bc}$ .

Pentru evaluarea ordinului de mărime al tensiunii pe fazele sănătoase, se calculează raportul dintre modulele tensiunilor:

$$K_U^{FN} = \frac{|\underline{U}_{kb}|}{|\underline{U}_{k0}|} = \sqrt{3} \cdot \frac{\sqrt{X_{kh}^2 + X_{kh} \cdot X_{ki} + X_{ki}^2}}{X_{kd} + X_{ki} + X_{kh}} < \sqrt{3} \cdot \frac{X_{kh} + X_{ki}}{X_{kd} + X_{ki} + X_{kh}} < \sqrt{3} \quad (\text{XX.17})$$

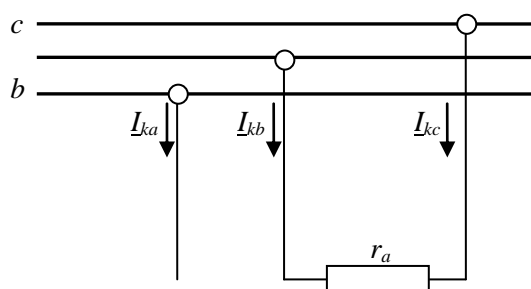
adică, tensiunea pe fazele sănătoase (ca mărime de fază) nu poate depăși tensiunea între faze (ca mărime de linie) din regimul anterior defectului. În realitate, valorile acestor tensiuni sunt mult mai apropiate de valorile de regim normal.

În rețelele de înaltă tensiune rapoartele  $X_{kh} / X_{kd}$  și  $X_{ki} / X_{kd}$  variază între limitele 0 și 3, respectiv 0 și 1. În aceste condiții, pentru coeficientul  $K_U^{FN}$  se obțin limite de variație între 0 și 1.25.

În ceea ce privește unghiul de defazaj  $\Theta_{bc}$  între fazorii  $\underline{U}_{kb}$  și  $\underline{U}_{kc}$ , acesta variază în general în limite largi (de la  $\pi/3$ , la  $\pi$ ), în funcție de reactanța de secvență homopolară  $X_{kh}$ , care variază între  $\infty$  și 0.

### Scurtcircuitul bifazat (2F)

Pentru acest tip de nesimetrie, schema de principiu și condițiile la limită sunt:



$$\begin{cases} \underline{I}_{ka} = 0 \\ \underline{I}_{kb} = -\underline{I}_{kc} \\ \underline{U}_{kb} - \underline{U}_{kc} = r_a \cdot \underline{I}_{kb} \end{cases} \quad (\text{XX.18})$$

Fig. XX.7 Schema de principiu pentru scurtcircuitul 2F

Deoarece schema echivalentă nu conține legături cu pământul, componenta homopolară este absentă și se vor scrie ecuații care includ doar componentele de secvență directă și inversă.

Primele două ecuații (XX.18) nu sunt independente, astfel că prima și a treia ecuație se rescriu în componente simetrice:

$$\begin{cases} \underline{I}_{kd} + \underline{I}_{ki} = 0 \\ a^2 \cdot \underline{U}_{kd} + a \cdot \underline{U}_{ki} - (a \cdot \underline{U}_{kd} + a^2 \cdot \underline{U}_{ki}) = r_a (a^2 \cdot \underline{I}_{kd} + a \cdot \underline{I}_{ki}) \end{cases} \quad (\text{XX.19})$$

de unde rezultă

$$\begin{cases} \underline{I}_{ki} = -\underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{kd} = \underline{U}_{ki} + r_a \cdot \underline{I}_{kd} \end{cases} \quad (\text{XX.20})$$

Ecuațiile (XX.20) arată că schemele de secvență directă și homopolară sunt conectate în paralel (Fig. XX.8), iar expresia componentei de secvență directă a curentului va fi:

$$\underline{I}_{kd} = \frac{\underline{U}_{k0}}{\underline{Z}_{kd} + \underline{Z}_{ki} + r_a} \quad (\text{XX.21})$$

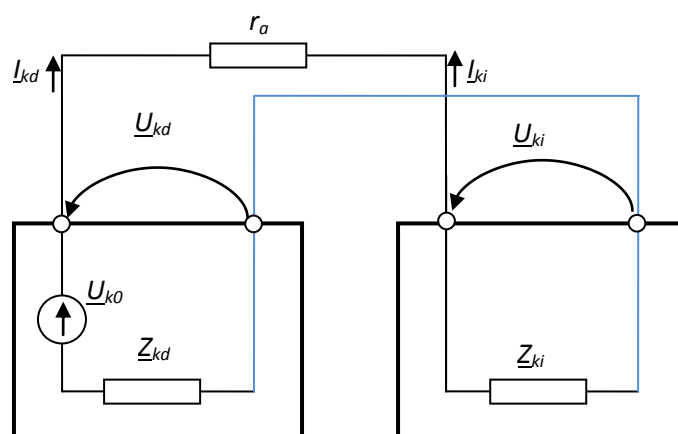


Fig. XX.8 Schema echivalentă a scurtcircuitului bifazat

Explicitând tensiunea  $\underline{U}_{k0}$  din (XX.21) și introducând rezultatul în prima ecuație (XX.7), se obțin relațiile de calcul ale componentelor simetrice de tensiune:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{kd} &= (\underline{Z}_{ki} + r_a) \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{ki} &= \underline{Z}_{ki} \cdot \underline{I}_{kd} \end{aligned} \quad (\text{XX.22})$$

Cunoscând toate componentele simetrice, se deduc mărimile de fază la locul scurtcircuitului:

- Curentul de scurtcircuit bifazat:

$$\underline{I}_k^{2F} = \underline{I}_{kb} = -\underline{I}_{kc} = a^2 \cdot \underline{I}_{kd} + a \cdot \underline{I}_{ki} = (a^2 - a) \cdot \underline{I}_{kd} = -j \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.23})$$

- Tensiunea fazei sănătoase:

$$\underline{U}_{ka} = \underline{U}_{kd} + \underline{U}_{ki} = (2 \cdot \underline{Z}_{ki} + r_a) \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.24})$$

- Tensiunile fazelor cu defect:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{kb} &= a^2 \cdot \underline{U}_{kd} + a \cdot \underline{U}_{ki} = (-\underline{Z}_{ki} + a^2 \cdot r_a) \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{U}_{kc} &= a \cdot \underline{U}_{kd} + a^2 \cdot \underline{U}_{ki} = (-\underline{Z}_{ki} + a \cdot r_a) \cdot \underline{I}_{kd} \end{aligned} \quad (\text{XX.25})$$

În cazul unui scurtcircuit metalic ( $r_a=0$ ), rezultă egalitatea fazorială a tensiunilor fazelor cu defect, valoarea în modul a acestora fiind egală cu jumătate din tensiunea pe faza sănătoasă. Dacă în plus, se neglijează și rezistențele din schemele de secvență, diagramele fazoriale ale curenților și tensiunilor la locul simetriei sunt cele din Fig. XX.9.

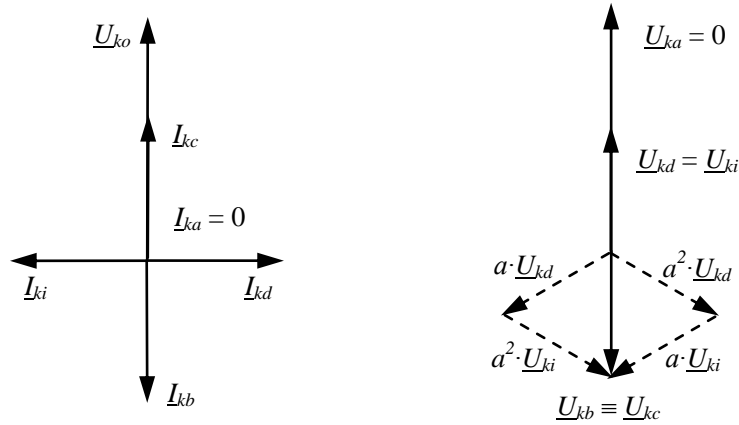


Fig. XX.9 Diagramele fazoriale ale curenților și tensiunilor la locul scc 2F în cazul neglijării rezistențelor

Tensiunile de secvență directă și inversă sunt în fază cu tensiunea  $\underline{U}_{k0}$ , la fel ca și tensiunea pe faza sănătoasă. Pe de altă parte, curenții de secvență directă și inversă, având caracter pur reactiv, sunt defazați cu  $\pi/2$  radiani în urma ( $\underline{I}_{kd}$ ) și înaintea ( $\underline{I}_{ki}$ ) fazorului  $\underline{U}_{k0}$ . Curenții pe fazele defecte sunt, la rândul lor, în fază ( $\underline{I}_{kc}$ ) și în opoziție de fază ( $\underline{I}_{kb}$ ) cu fazorul tensiunii  $\underline{U}_{k0}$ . În sfârșit, fazorii  $\underline{U}_{kb}$  și  $\underline{U}_{kc}$  se obțin prin compunerea fazorilor  $\underline{U}_{kd}$  și  $\underline{U}_{ki}$ , folosind și operatorul  $a$ .

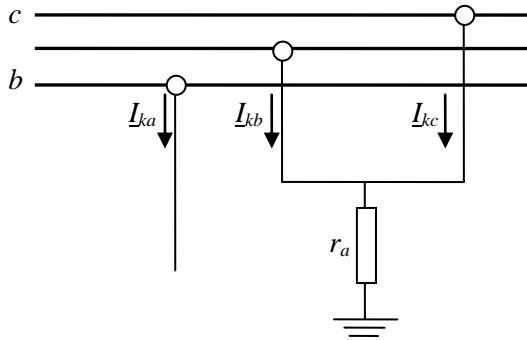
Pentru evaluarea ordinului de mărime al tensiunii pe faza sănătoasă, se calculează raportul:

$$K_U^{2F} = \frac{|\underline{U}_{K,A}|}{|\underline{U}_{K,0}|} = \frac{2 \cdot X_{K,i}}{X_{K,d} + X_{K,i}} = \frac{2 \cdot \frac{X_{K,i}}{X_{K,d}}}{1 + \frac{X_{K,i}}{X_{K,d}}} \quad (\text{XX.26})$$

Deoarece raportul  $X_{K,i} / X_{K,d}$  ia valori între limitele 0 și 1, pentru coeficientul  $K_U^{2F}$  se obțin limitele de variație între 0 și 1.

### Scurtcircuitul bifazat cu pământ (2FN)

Pentru acest tip de nesimetrie, schema de principiu și condițiile la limită sunt:



$$\begin{cases} \underline{I}_{ka} = 0 \\ \underline{U}_{kb} = \underline{U}_{kc} \\ \underline{U}_{kb} = r_a \cdot (\underline{I}_{kb} + \underline{I}_{kc}) \end{cases} \quad (\text{XX.27})$$

Fig. XX.10 Schema de principiu pentru scurtcircuitul 2FN

Relațiile (XX.27) se rescriu în componente simetrice:

$$\begin{cases} \underline{I}_{kh} + \underline{I}_{kd} + \underline{I}_{ki} = 0 \\ \underline{U}_{kh} + a^2 \cdot \underline{U}_{kd} + a \cdot \underline{U}_{ki} = \underline{U}_{kh} + a \cdot \underline{U}_{kd} + a^2 \cdot \underline{U}_{ki} \\ \underline{U}_{kh} + a^2 \cdot \underline{U}_{kd} + a \cdot \underline{U}_{ki} = r_a \cdot (2 \cdot \underline{I}_{kh} - \underline{I}_{kd} - \underline{I}_{ki}) \end{cases} \quad (\text{XX.28})$$

și se aduc apoi la forma echivalentă

$$\begin{cases} \underline{I}_{kh} + \underline{I}_{kd} + \underline{I}_{ki} = 0 \\ \underline{U}_{kd} = \underline{U}_{ki} \\ \underline{U}_{kh} - \underline{U}_{kd} = 3 \cdot r_a \cdot \underline{I}_{kh} \end{cases} \quad (\text{XX.29})$$

din care rezultă schema echivalentă a scurtcircuitului 2FN din Fig. XX.11

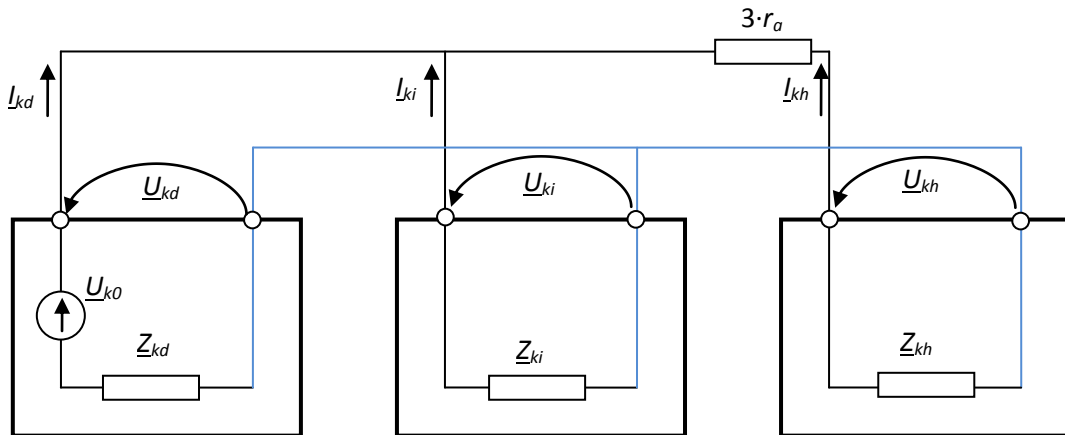


Fig. XX.11 Schema echivalentă a scurtcircuitului monofazat

Din schema echivalentă, rezultă curentul de secvență directă, care trece prin impedanța  $\underline{Z}_{kd}$  înseriată cu grupul de impedanțele  $\underline{Z}_{ki}$  și  $\underline{Z}_{kh} + r_a$ :

$$\underline{I}_{kd} = \frac{\underline{U}_{ko}}{\underline{Z}_{kd} + \frac{\underline{Z}_{ki} \cdot (\underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a)}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a}} \quad (\text{XX.30})$$

Înlocuind expresia tensiunii  $\underline{U}_{ko}$  din (XX.30) în prima ecuație (XX.7) și ținând cont de (XX.29), rezultă expresia tensiunii de secvență directă:

$$\underline{U}_{kd} = \underline{U}_{ki} = \frac{\underline{Z}_{ki} \cdot (\underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a)}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.31})$$

Folosind (XX.7), rezultă expresia curentului de secvență inversă:

$$\underline{I}_{ki} = - \frac{\underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.32})$$

și din (XX.29), curentul de secvență homopolară:

$$\underline{I}_{kh} = - \frac{\underline{Z}_{ki}}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.33})$$

Din (XX.7) și (XX.33) rezultă componenta de secvență homopolară a tensiunii:

$$\underline{U}_{kh} = \frac{\underline{Z}_{ki} \cdot \underline{Z}_{kh}}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.34})$$

Toate componentele de secvență ale tensiunii și curentului pe cele trei faze fiind cunoscute, se determină la locul nesimetriei:

- Curenții de scurtcircuit bifazat cu pământ:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{kb} &= \left( - \frac{\underline{Z}_{ki}}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} + a^2 - a \cdot \frac{\underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \right) \cdot \underline{I}_{kd} \\ \underline{I}_{kc} &= \left( - \frac{\underline{Z}_{ki}}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} + a - a^2 \cdot \frac{\underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \right) \cdot \underline{I}_{kd} \end{aligned} \quad (\text{XX.35})$$

- Tensiunea fazei sănătoase:

$$\underline{U}_{ka} = 3 \cdot \frac{\underline{Z}_{ki} \cdot \underline{Z}_{kh} + 2 \cdot r_a \cdot \underline{Z}_{ki}}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.36})$$

- Tensiunea fazelor cu defect:

$$\underline{U}_{kb} = \underline{U}_{kc} = 3 \cdot \frac{r_a}{\underline{Z}_{ki} + \underline{Z}_{kh} + 3 \cdot r_a} \cdot \underline{I}_{kd} \quad (\text{XX.38})$$

Dacă se neglijează rezistențele schemelor de secvență, se pot trasa ușor diagramele fazoriale din Fig. XX.12:

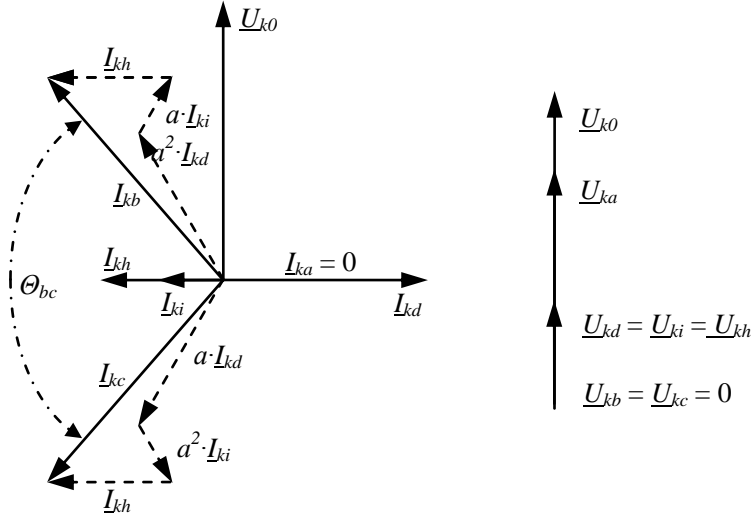


Fig. XX.12 Diagramele fazoriale ale curenților și tensiunilor la locul scc 2FN în cazul neglijării rezistențelor

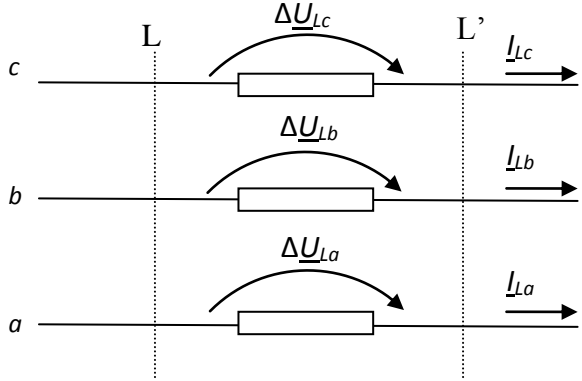
Dacă se alege tensiunea  $\underline{U}_{k0}$  ca origine de fază, toate tensiunile de secvență sunt egale între ele și în fază cu tensiunea  $\underline{U}_{k0}$ , la fel ca și tensiunea pe faza sănătoasă  $\underline{U}_{ka}$ . Pe de altă parte, curentul de secvență directă  $\underline{I}_{kd}$  este defazat cu  $\pi/2$  radiani în urma tensiunii  $\underline{U}_{k0}$ , în timp ce curenții de secvență inversă și homopolară,  $\underline{I}_{ki}$  și  $\underline{I}_{kh}$ , sunt defazați cu  $\pi/2$  radiani înaintea fazorului  $\underline{U}_{k0}$ . Fazorii curenților pe fazele cu defect ( $\underline{I}_{kb}$  și  $\underline{I}_{kc}$ ) se obțin apelând la operatorii  $a$  și  $a^2$ .

Pentru valorile uzuale ale rapoartelor reactanțelor de secvență, și anume  $X_{K,i} / X_{K,d} \in [0, 1]$  și  $X_{K,h} / X_{K,d} \in [0, 3]$ , în cazul scurtcircuitului 2FN se obțin pentru coeficientul  $K_U^{2FN}$  valori între 0 și 1.28. Cu alte cuvinte, în situația cea mai defavorabilă, supratensiunea pe faza sănătoasă nu depășește o valoare de 1.28 ori mai mare decât în regimul normal de funcționare anterior defectului.

## Nesimetrii longitudinale

### Principii generale de modelare și calcul

Prin nesimetrie longitudinală se înțelege apariția unor impedanțe inegale într-un anumit loc din rețea, delimitat de două noduri notate  $L$  și  $L'$  (Fig. XC.1). În condițiile în care se neglijează influențele mutuale între faze, se pot scrie următoarele relații între căderile de tensiune și curenții de pe faze:



$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{La} &= \underline{Z}_a \cdot \underline{I}_{La} \\ \Delta \underline{U}_{Lb} &= -\underline{Z}_b \cdot \underline{I}_{Lb} \\ \Delta \underline{U}_{Lc} &= -\underline{Z}_c \cdot \underline{I}_{Lc}\end{aligned} \quad (\text{XC.1})$$

Fig. XC.1 Reprezentarea generală a unei nesimetrii longitudinale

Studiul diferitelor tipuri de nesimetrii longitudinale se realizează în aceeași manieră precum cea aplicată în cazul nesimetriilor transversale, aplicând metoda componentelor simetrice.

Sistemul trifazat al căderilor de tensiune și sistemul trifazat din relațiile (XC.1) sunt nesimetrice. Ca și în cazul nesimetriilor transversale, una dintre faze, faza a, se caracterizează printr-o stare diferită față de cele două, fiind ori fază sănătoasă (întrerupere bifazată), ori fază defectă (întrerupere monofazată). Ea este aleasă ca fază de referință sau fundamentală și i se definesc componentele simetrice directă, inversă și homopolară ale căderilor de tensiune  $\Delta \underline{U}_{Ld}$ ,  $\Delta \underline{U}_{Li}$ ,  $\Delta \underline{U}_{Lh}$ , și ale curenților,  $\underline{I}_{Ld}$ ,  $\underline{I}_{Li}$ ,  $\underline{I}_{Lh}$ , pentru care se scriu relații de transformare de tipul (XX.5):

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{La} \\ \Delta \underline{U}_{Lb} \\ \Delta \underline{U}_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{Lh} \\ \Delta \underline{U}_{Ld} \\ \Delta \underline{U}_{Li} \end{bmatrix} \quad (\text{XC.2})$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{La} \\ \underline{I}_{Lb} \\ \underline{I}_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{Lh} \\ \underline{I}_{Ld} \\ \underline{I}_{Li} \end{bmatrix} \quad (\text{XC.3})$$

Schemele de secvență directă, inversă și homopolară se întocmesc în mod similar nesimetriilor transversale, prin dipoli liniari în raport cu bornele nesimetriei,  $L$  și  $L'$  (Fig. XC.2). În acest caz, ambele borne ale fiecărei scheme sunt noduri independente, ele aparținând aceleiași faze.

Schema de secvență directă folosește o sursă ideală de curent, notată cu  $\underline{I}_{L0}$ , legată în paralel cu admitanța  $\underline{Y}_{Ld}$ , corespunzătoare valorii inverse a impedanței de secvență directă  $\underline{Z}_{Ld}$ .



Conform teoremei generatorului echivalent de curent (Norton), curentul  $\underline{I}_{L0}$  este curentul de scurtcircuit la bornele schemei de secvență directă și corespunde curentului din punctul  $L$  în regimul permanent precedent nesimetriei analizate.

Schemele de secvență inversă și homopolară sunt scheme pasive și sunt descrise de impedanțele de secvență inversă și homopolară  $\underline{Z}_{Li}$  și  $\underline{Z}_{Lh}$ .

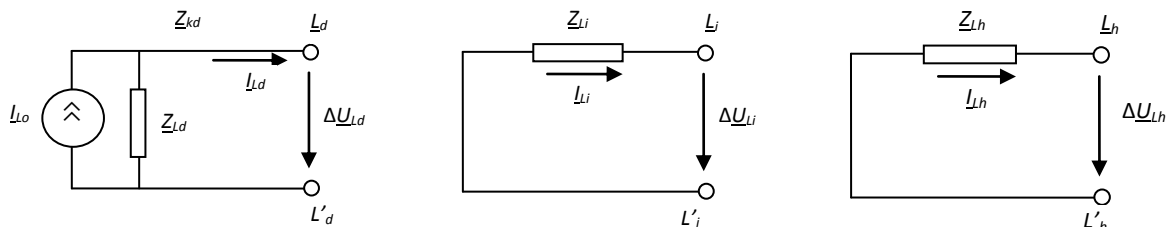


Fig. XC.2 Reprezentarea schemelor de secvență directă, inversă și homopolară pentru studiul nesimetriilor transversale

Ecuțiile de funcționare ale celor trei scheme de secvență se scriu, conform Fig. XC.2:

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{Ld} &= \underline{Z}_{Ld} \cdot \underline{I}_{L0} - \underline{I}_{Ld} \\ \Delta \underline{U}_{Li} &= -\underline{Z}_{Li} \cdot \underline{I}_{Li} \\ \Delta \underline{U}_{Lh} &= -\underline{Z}_{Lh} \cdot \underline{I}_{Lh}\end{aligned}\quad (\text{XC.4})$$

Impedanțele  $\underline{Z}_L$  definite pentru nesimetriile longitudinale nu au nicio legătură cu impedanțele  $\underline{Z}_k$  definite pentru nesimetriile transversale. În cazul scurtcircuitelor, schemele echivalente se leagă între locul scurtcircuitului și pământ, în timp ce nodurile  $L$  și  $L'$  sunt situate pe o fază.

În continuare, se vor studia două cazuri particulare de nesimetrie longitudinale, care apar în situații concrete din exploatare, precum ruperea conductoarelor unei LEA sau acționarea incompletă a unui întrerupător trifazat etc., și anume:

- întreruperea monofază
- întreruperea bifază

### Întreruperea monofază

În cazul întreruperii monofazate (Fig. XC.3), condițiile la limită sunt anularea curentului pe faza defectă și anularea căderilor de tensiune pe fazele sănătoase:

$$\begin{cases} \underline{I}_{La} = 0 \\ \Delta \underline{U}_{Lb} = 0 \\ \Delta \underline{U}_{Lc} = 0 \end{cases} \quad (\text{XC.5})$$

Fig. XC.3 Schema de principiu pentru întreruperea monofază

Condițiile (XC.5) se scriu în componente simetrice:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{Lh} + \underline{I}_{Ld} + \underline{I}_{Li} &= 0 \\ \Delta \underline{U}_{Lh} + a^2 \cdot \Delta \underline{U}_{Ld} + a \cdot \Delta \underline{U}_{Li} &= 0 \\ \Delta \underline{U}_{Lh} + a \cdot \Delta \underline{U}_{Ld} + a^2 \cdot \Delta \underline{U}_{Li} &= 0\end{aligned}\quad (\text{XC.6})$$

Rezultă automat:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{Lh} + \underline{I}_{Ld} + \underline{I}_{Li} &= 0 \\ \Delta \underline{U}_{Lh} = \Delta \underline{U}_{Ld} = \Delta \underline{U}_{Li}\end{aligned}\quad (\text{XC.7})$$

Relațiile (XC.7) conduc direct la schema echivalentă a întreruperii monofazate, formată prin conectarea în paralel la bornele schemei de secvență directă a schemelor de secvență inversă și homopolară (Fig. XC.4).

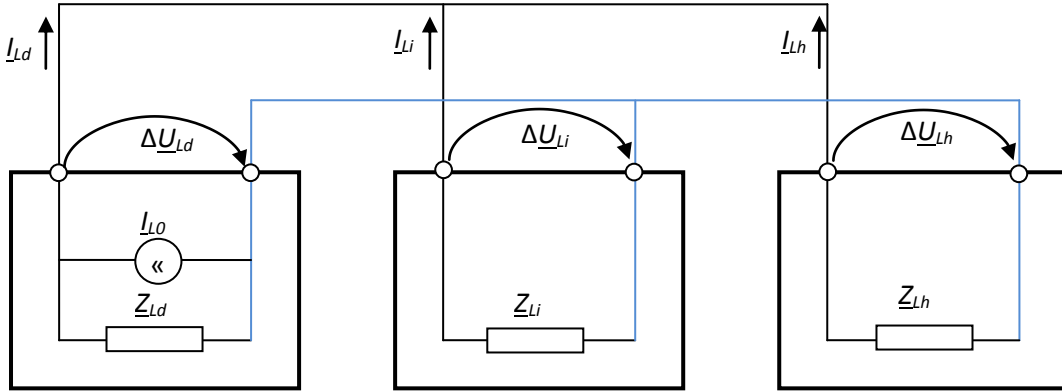
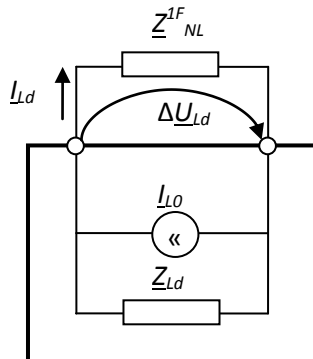


Fig. XC.4 Schema echivalentă la o întrerupere monofazată

Dacă se recurge la simplificarea schemei din Fig. XC.4 prin reducere în raport cu bornele schemei de secvență directă, se obține o impedanță de nesimetrie longitudinală (Fig XC.5):



$$\underline{Z}_{NL}^{1F} = \frac{\underline{Z}_{Li} \cdot \underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \quad (\text{XC.8})$$

Fig. XC.3 Schema echivalentă redusă pentru întreruperea monofazată

Din această schemă, rezultă, aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff:

$$\Delta U_{Ld} = \underline{Z}_{NL}^{1F} \cdot \underline{I}_{Ld} = -\underline{Z}_{Ld} \cdot \underline{I}_{Ld} - \underline{I}_{L0} \cdot \underline{Z}_{L0} \quad (\text{XC.9})$$

Din (XC.9) și (XC.8) rezultă componenta de secvență directă a curentului:

$$\underline{I}_{Ld} = \frac{\underline{Z}_{Ld} \cdot \underline{I}_{L0}}{\underline{Z}_{Ld} + \underline{Z}_{NL}^{1F}} = \frac{\underline{Z}_{Ld} \cdot \underline{I}_{L0}}{\underline{Z}_{Ld} + \frac{\underline{Z}_{Li} \cdot \underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}}} \quad (\text{XC.10})$$

și componenta de secvență directă a tensiunii:

$$\Delta U_{Ld} = \frac{\underline{Z}_{Li} \cdot \underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \cdot \underline{I}_{Ld} \quad (\text{XC.11})$$

Din ultimele două ecuații (XC.4), ținând seama de (XC.7) și (XC.11), se calculează celelalte două componente de secvență ale curentului:

$$\underline{I}_{Li} = \frac{\underline{Z}_{NL}^{1F}}{\underline{Z}_{Li}} \cdot \underline{I}_{Ld} = -\frac{\underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \cdot \underline{I}_{Ld} \quad \underline{I}_{Lh} = \frac{\underline{Z}_{NL}^{1F}}{\underline{Z}_{Lh}} \cdot \underline{I}_{Ld} = -\frac{\underline{Z}_{Li}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \cdot \underline{I}_{Ld} \quad (\text{XC.12})$$

Cunoscând toate mărimile de secvență, se calculează mărimile de fază la locul nesimetriei:

- Curenții pe fazele neîntrerupte:

$$\underline{I}_{Lb} = \underline{I}_{Lh} + a^2 \cdot \underline{I}_{Ld} + a \cdot \underline{I}_{Li} = \left[ -\frac{\underline{Z}_{Li}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} + a^2 - a \cdot \frac{\underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \right] \cdot \underline{I}_{Ld} \quad (\text{XC.13})$$

$$\underline{I}_{Lb} = \underline{I}_{Lh} + a \cdot \underline{I}_{Ld} + a^2 \cdot \underline{I}_{Li} = \left[ -\frac{\underline{Z}_{Li}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} + a - a^2 \cdot \frac{\underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \right] \cdot \underline{I}_{Ld}$$

- Căderea de tensiune la bornele întreruperii, pe faza avariată:

$$\Delta \underline{U}_{La} = \Delta \underline{U}_{Lh} + \Delta \underline{U}_{Ld} + \Delta \underline{U}_{Li} = 3 \cdot \Delta \underline{U}_{Ld} = 3 \cdot \frac{\underline{Z}_{Li} \cdot \underline{Z}_{Lh}}{\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \cdot \underline{I}_{Ld} \quad (\text{XC.14})$$

### Înteruperea bifazată

În cazul înteruperii monofazate (Fig. XC.4), condițiile la limită sunt anularea curentului pe fazele defecte și anularea căderii de tensiune pe faza sănătoasă:

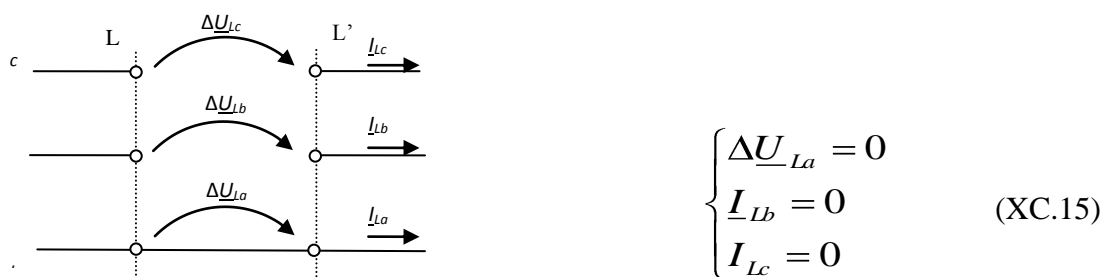


Fig. XC.4 Schema de principiu pentru înteruperea monofazată

Condițiile (XC.15) se rescriu în componente simetrice:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{Lh} + \Delta \underline{U}_{Ld} + \underline{U}_{Li} &= 0 \\ \underline{I}_{Lh} + a^2 \cdot \underline{I}_{Ld} + a \cdot \underline{I}_{Li} &= 0 \\ \underline{I}_{Lh} + a \cdot \underline{I}_{Ld} + a^2 \cdot \underline{I}_{Li} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{XC.16})$$

de unde rezultă:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{Lh} + \Delta \underline{U}_{Ld} + \underline{U}_{Li} &= 0 \\ \underline{I}_{Lh} = \underline{I}_{Ld} = \underline{I}_{Li} \end{aligned} \quad (\text{XC.17})$$

Ecuatiile (XC.17) indică faptul că cele trei scheme de secvență sunt conectate în serie (curenți egali). Schema echivalentă este prezentată desfășurată în Fig. XC.5 și concentrată în Fig. XC.6

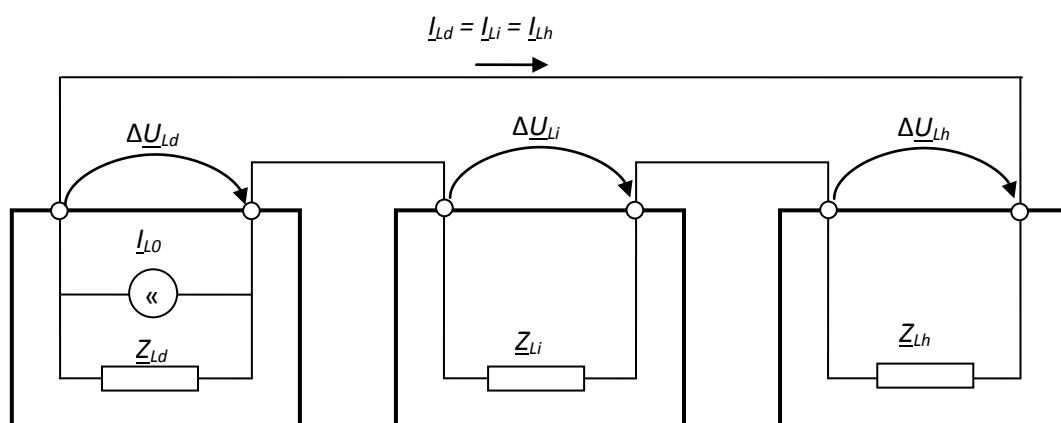
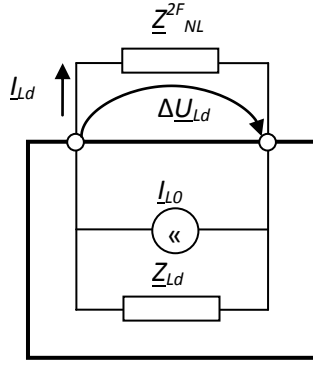


Fig. XC.5 Schema echivalentă a înteruperii bifazate, desfășurată



$$\underline{Z}_{NL}^{2F} = \underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh} \quad (\text{XC.18})$$

Fig. XC.6 Schema echivalentă redusă pentru întreruperea monofază

Din schema echivalentă se deduc relațiile:

$$\Delta \underline{U}_{Ld} = \underline{Z}_{NL}^{2F} \cdot \underline{I}_{Ld} = -\underline{Z}_{Ld} \cdot (\underline{I}_{Ld} - \underline{I}_{L0}) \quad (\text{XC.19})$$

din care rezultă expresiile curentului de secvență directă și a componentei directe a căderii de tensiune:

$$\underline{I}_{Ld} = \frac{\underline{Z}_{Ld} \cdot \underline{I}_{L0}}{\underline{Z}_{Ld} + \underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}} \quad (\text{XC.20})$$

$$\Delta \underline{U}_{Ld} = (\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}) \cdot \underline{I}_{Ld} \quad (\text{XC.21})$$

Folosind (XC.4) și (XC.20), se determină componentele inversă și homopolară ale căderii de tensiune:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{Li} &= -\underline{Z}_{Li} \cdot \underline{I}_{Ld} \\ \Delta \underline{U}_{Lh} &= -\underline{Z}_{Lh} \cdot \underline{I}_{Ld} \end{aligned} \quad (\text{XC.22})$$

După determinarea tuturor mărimilor de secvență, se calculează mărimile de fază la locul nesimetriei:

- Curentul pe faza neîntreruptă:

$$\underline{I}_{La} = 3 \cdot \underline{I}_{Ld} \quad (\text{XC.23})$$

- Căderile de tensiune la bornele întreruperii, pe fazele avariate:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{Lb} &= [-\underline{Z}_{Lh} + a^2 \cdot (\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}) - a \cdot \underline{Z}_{Li}] \cdot \underline{I}_{Ld} \\ \Delta \underline{U}_{Lc} &= [-\underline{Z}_{Lh} + a \cdot (\underline{Z}_{Li} + \underline{Z}_{Lh}) - a^2 \cdot \underline{Z}_{Li}] \cdot \underline{I}_{Ld} \end{aligned} \quad (\text{XC.24})$$