

Supratensiuni datorate nesimetriilor transversale

Așa cum se poate observa din § 1.2.2, determinarea factorilor de supratensiune temporară la producerea scurtcircuitelor nesimetrice pe liniile de transport a energiei electrice presupune, în principal, determinarea relațiilor de calcul ale impedanțelor de scurtcircuit și coeficienților de raportare. Acestea pot fi ușor particularizate pentru secvența directă (Z_d, k_d) și homopolară (Z_h, k_h). În ipoteza simplificatoare în care puterea sursei este suficient de mare, valorile impedanțelor de secvență inversă și ale coeficienților de raportare, de pe această secvență, pot fi considerate ca fiind egale cu acelea calculate pentru secvența directă. Cel puțin în ceea ce privește impedanța de secvență directă, acest lucru rezultă și dintr-o comparație între figurile 12 și 13.

Odată cunoscute valorile impedanțelor de scurtcircuit, pe secvență directă și homopolară, ale coeficienților de raportare, pe aceleași secvențe, precum și valorile tensiunilor, la locul defectului și în punctele de calcul alese, înaintea producerii defectului, pot fi calculați factorii de supratensiune corespunzători. Valorile tensiunilor din regimul anterior producerii defectului rezultă, sub forma unor factori de supratensiune, din analiza efectuată anterior (§ 2.2.1).

a) Cazul 1 din tabelul 3.

Schemele echivalente, pentru secvența directă și homopolară sunt cele prezentate în fig. 21, parametrii acestor scheme putând fi calculați conform § 1.1.

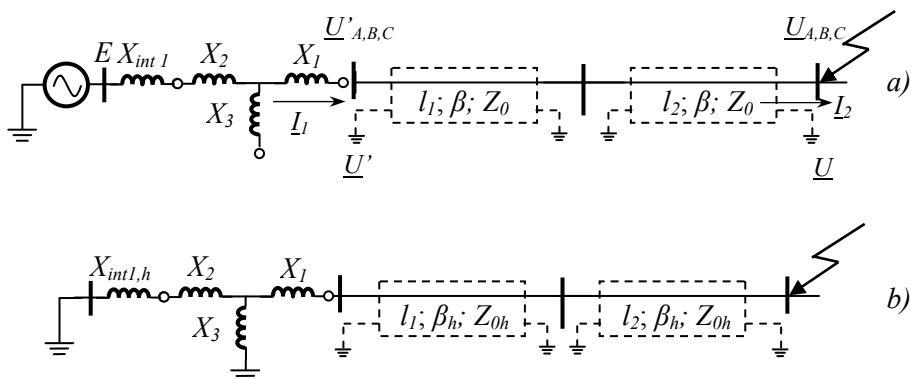


Fig. 21. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 1 din tabelul 3: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

În schema din fig. 21,a, s-au notat cu $U_{A,B,C}$ tensiunile de fază la locul producerii defectului, iar cu $U'_{A,B,C}$ tensiunile de fază la începutul liniei L_1 (în stația de transformare prin intermediul căreia se alimentează linia cu defect). U și U' reprezintă valorile tensiunilor din regimul anterior producerii defectului, în aceleași noduri.

Așa cum s-a arătat în § 1.1, impedanța de scurtcircuit se calculează, pe fiecare dintre secvențe, ca o impedanță de intrare a unei linii alimentate fictiv pe la locul defectului, reactanța internă a sursei reale fiind conectată la pământ. Pentru a păstra forma ecuațiilor liniilor lungi, pentru calculul impedanței de scurtcircuit poate fi utilizată o schemă echivalentă de tipul celei prezentate în fig. 22.

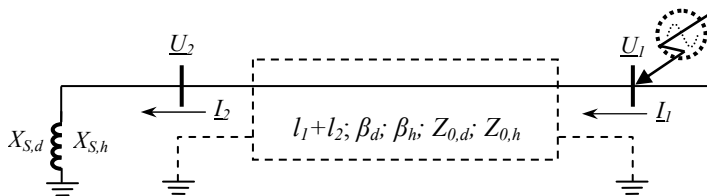


Fig. 22. Schemă echivalentă de calcul a impedanței de scurtcircuit

În fig. 22, reactanțele de secvență ale sursei se calculează cu relațiile:

$$\begin{aligned} X_{S,d} &= X_{\text{int}1} + X_2 + X_1 \\ X_{S,h} &= X_1 + \frac{(X_{\text{int}1,h} + X_2) \cdot X_3}{X_{\text{int}1,h} + X_2 + X_3} \end{aligned} \quad (90)$$

Valorile reactanțelor din relația (90) se determină conform § 1.1, pentru datele de intrare prezentate în § 2.1. Totuși, pentru a da un exemplu numeric, pot fi utilizate valori rezonabile, precum:

$$\begin{aligned} X_{S,d} &= 115 \, \Omega, & X_{S,h} &= 105 \, \Omega; \\ Z_{0,d} &= 311 \, \Omega, & Z_{0,h} &= 643 \, \Omega; \\ \beta_d(l_1 + l_2) &= 0,43 \, \text{rad}, & \beta_h(l_1 + l_2) &= 0,62 \, \text{rad}; \\ U &= 1,32 \cdot E; \\ U' &= 1,2 \cdot E. \end{aligned}$$

În conformitate cu cele arătate anterior și în condițiile simplificatoare indicate în § 2.1, relația de calcul a impedanței de scurtcircuit se deduce prin rezolvarea sistemului de ecuații

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta(l_1 + l_2) + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta(l_1 + l_2) \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta(l_1 + l_2) + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta(l_1 + l_2) \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_S} \end{cases}, \quad (91)$$

primele două ecuații ale sistemului fiind ecuațiile liniilor lungi, iar cea de a treia rezultă prin aplicarea legii lui Ohm pe reactanța sursei (fig. 22).

Relația de calcul a impedanței de scurtcircuit rezultă de forma

$$\underline{Z}_{sc} = \frac{U_1}{I_1} = jZ_0 \cdot \operatorname{tg} \left[\beta(l_1 + l_2) + \operatorname{arctg} \frac{X_s}{Z_0} \right]. \quad (92)$$

Relația (92) se particularizează pentru cele două secvențe, reactanțele de secvență directă și homopolară calculându-se cu relațiile:

$$\begin{cases} X_{sc,d} = Z_{0,d} \cdot \operatorname{tg} \left[\beta_d(l_1 + l_2) + \operatorname{arctg} \frac{X_{s,d}}{Z_{0,d}} \right] \\ X_{sc,h} = Z_{0,h} \cdot \operatorname{tg} \left[\beta_h(l_1 + l_2) + \operatorname{arctg} \frac{X_{s,h}}{Z_{0,h}} \right] \end{cases}. \quad (93)$$

Valorile acestor reactanțe rezultă:

$$\begin{cases} X_{sc,d} = 311 \cdot \operatorname{tg} \left[0,43 + \operatorname{arctg} \frac{115}{311} \right] = 310,2 \, \Omega \\ X_{sc,h} = 643 \cdot \operatorname{tg} \left[0,62 + \operatorname{arctg} \frac{105}{643} \right] = 638,5 \, \Omega \end{cases}. \quad (94)$$

Fiind cunoscute valorile reactanțelor de scurtcircuit, utilizând relațiile (24) și (25) se pot calcula tensiunile în componente de fază **la locul defectului**, astfel:

- pentru scurtcircuit monofazat

$$\begin{cases} U_A = 0 \\ \frac{U_{B,C}}{\underline{U}} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{X_{sc,h}}{2X_{sc,d} + X_{sc,h}} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{638,5}{2 \cdot 310,2 + 638,5} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2}; \end{cases} \quad (95)$$

respectiv

$$\begin{cases} U_A = 0 \\ \underline{U}_{B,C} = \left(-0,761 \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \underline{U}; \end{cases} \quad (96)$$

cum însă $U = 1,32 \cdot E$, factorul de supratensiune de pe fazele sănătoase devine egal cu

$$\frac{U_{B,C}}{E} = 1,32 \cdot \sqrt{0,578 + 0,75} = 1,52. \quad (97)$$

- pentru scurtcircuit bifazat cu pământ (dublă punere la pământ)

$$\begin{cases} \frac{U_A}{\underline{U}} = \frac{3X_{sc,h}}{X_{sc,d} + 2X_{sc,h}} = \frac{3 \cdot 638,5}{310,2 + 2 \cdot 638,5} = 1,207, \\ U_{B,C} = 0 \end{cases}, \quad (98)$$

iar în condițiile în care $U = 1,32 \cdot E$, factorul de supratensiune pe faza sănătoasă este

$$\frac{U_A}{E} = 1,32 \cdot 1,207 = 1,59. \quad (99)$$

Pentru determinarea tensiunilor, în componente de fază, în orice alt nod al rețelei analizate, se utilizează relațiile (26) și (27), după ce, în prealabil, se calculează coeficienții de raportare corespunzători. Dacă se urmărește determinarea nivelului tensiunii pe barele stației de la care sunt alimentate cele două linii, relația generală a coeficientului de raportare se obține în manieră similară calculului unui factor de supratensiune datorată efectului capacitiv, însă în schema echivalentă rezultată în urma producerii defectului. Astfel, cu notațiile din fig. 22, coeficientul de raportare este egal cu raportul dintre tensiunile

$$k = \left| \frac{U_2}{U_1} \right|. \quad (100)$$

Pentru determinarea relației de calcul a acestui factor de supratensiune (similar unei „creșteri relative a tensiunii pe linie”) se utilizează următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \cdot \cos \beta(l_1 + l_2) + jZ_0 I_2 \cdot \sin \beta(l_1 + l_2) \\ I_2 = \frac{U_2}{jX_S} \end{cases}, \quad (101)$$

prin a cărui rezolvare rezultă

$$k = \frac{1}{\cos \beta(l_1 + l_2) + \frac{Z_0}{X_S} \cdot \sin \beta(l_1 + l_2)}. \quad (102)$$

Particularizând relația (102) pentru secvențele directă și homopolară se obține

$$k_d = \frac{1}{\cos \beta_d(l_1 + l_2) + \frac{Z_{0,d}}{X_{S,d}} \cdot \sin \beta_d(l_1 + l_2)} = \frac{1}{\cos 0,43 + \frac{311}{115} \cdot \sin 0,43} = 0,49, \quad (103)$$

$$k_h = \frac{1}{\cos \beta_h(l_1 + l_2) + \frac{Z_{0,h}}{X_{S,h}} \cdot \sin \beta_h(l_1 + l_2)} = \frac{1}{\cos 0,62 + \frac{643}{105} \cdot \sin 0,62} = 0,23. \quad (104)$$

În acest fel, fiind deja cunoscute valorile reactanțelor de scurtcircuit și ale coeficienților de raportare, pot fi calculate tensiunile de la începutul liniei:

- pentru scurtcircuit monofazat

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{U} = \frac{U'}{U} - \frac{2k_d \cdot X_{sc,d} + k_h \cdot X_{sc,h}}{2X_{sc,d} + X_{sc,h}} \\ \frac{U'_{B,C}}{U} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{U'}{U} - \frac{k_h \cdot X_{sc,h} - k_d \cdot X_{sc,d}}{2X_{sc,d} + X_{sc,h}} \end{cases}; \quad (105)$$

înlocuind valorile calculate anterior se obține

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{1,32E} = \frac{1,2E}{1,32E} - \frac{2 \cdot 0,49 \cdot 310,2 + 0,23 \cdot 638,5}{2 \cdot 310,2 + 638,5} = 0,551 \\ \frac{U'_{B,C}}{1,32E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{1,2E}{1,32E} - \frac{0,23 \cdot 638,5 - 0,49 \cdot 310,2}{2 \cdot 310,2 + 638,5} = -0,450 \mp j0,787 \end{cases}, \quad (106)$$

factorii de supratensiune, pe faza cu defect și pe fazele sănătoase, fiind egali cu

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{E} = 0,727 \\ \frac{U'_{B,C}}{E} = 1,198 \end{cases}. \quad (107)$$

- pentru scurtcircuit bifazat cu pământ (dublă punere la pământ)

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{U} = \frac{U'}{U} + \frac{k_h \cdot X_{sc,h} - k_d \cdot X_{sc,d}}{X_{sc,d} + 2X_{sc,h}} \\ \frac{U'_{B,C}}{U} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{U'}{U} + \frac{k_h \cdot X_{sc,h} + 0,5k_d \cdot X_{sc,d}}{X_{sc,d} + 2X_{sc,h}} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot k_d \end{cases}, \quad (108)$$

în care, înlocuind valorile reactanțelor de scurtcircuit și ale coeficienților de raportare

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{1,32E} = \frac{1,2E}{1,32E} + \frac{0,23 \cdot 638,5 - 0,49 \cdot 310,2}{310,2 + 2 \cdot 638,5} \\ \frac{U'_{B,C}}{U} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{U'}{U} + \frac{0,23 \cdot 638,5 + 0,5 \cdot 0,49 \cdot 310,2}{310,2 + 2 \cdot 638,5} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,49 \end{cases}, \quad (109)$$

se obține

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{E} = 1,20 \\ \frac{U'_{B,C}}{E} = 0,63 \end{cases}. \quad (110)$$

Pentru ambele tipuri de scurtcircuit nesimetric se obțin valori apropiate ale factorilor de supratensiune, mai mari decât în regimul anterior producerii defectului, în care linia funcționa în gol. Această creștere este observabilă la locul producerii defectului, tensiunea fazelor sănătoase, la începutul liniei, având practic aceeași valoare cu aceea din regimul anterior.

b) Cazul 3 din tabelul 3.

Schemele echivalente, pentru secvența directă și homopolară sunt cele prezentate în fig. 23, parametrii acestor scheme putând fi calculați conform § 1.1.

Dacă se compară fig. 23,b cu fig. 21,b, se constată că schemele de secvență homopolară sunt identice. Prezența reactorului de compensare transversală în rețea nu modifică schema de secvență homopolară, atâta timp cât acesta este conectat în înfășurarea terțiară a autotransformatorului, datorită conexiunii în triunghi a acesteia.

Ca și în cazul schemei din fig. 21, a) și în cazul schemei din fig. 23, a) s-au notat cu $U_{A,B,C}$ tensiunile de fază la locul producerii defectului, iar cu $U'_{A,B,C}$ tensiunile de fază la începutul liniei L_1 . U și U' reprezintă valorile tensiunilor din regimul anterior producerii defectului, la sfârșitul și respectiv la începutul liniei.

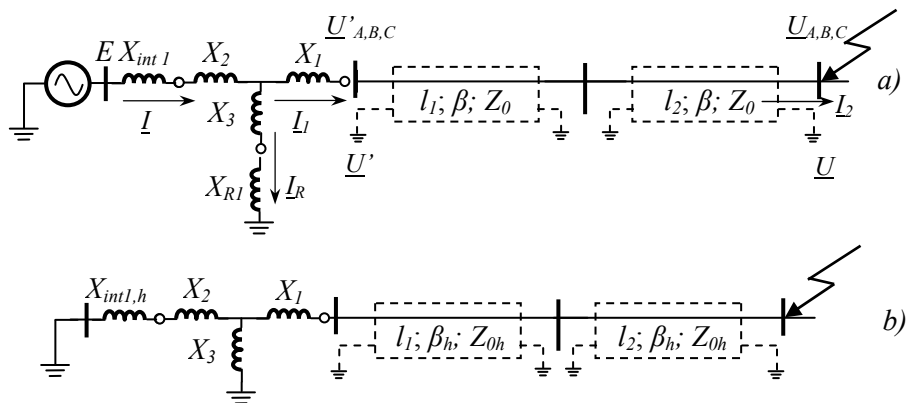


Fig. 23. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 3 din tabelul 3: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

În acest caz, problema poate fi rezolvată după același algoritm ca și în cazul anterior. Pe de altă parte, însă, se poate constata că singura diferență este aceea a prezenței suplimentare a ramurii reactorului de compensare transversală de la începutul liniei. În aceste condiții, o altă posibilă metodă de rezolvare este aceea de a transforma circuitul de la începutul liniei într-un circuit echivalent, identic ca structură cu circuitul din cazul deja rezolvat. Astfel, pot fi utilizate toate relațiile de calcul obținute.

Schemele celor două circuite de la începutul liniei care trebuie rezolvate în sensul identificării echivalenței sunt date în fig. 24.

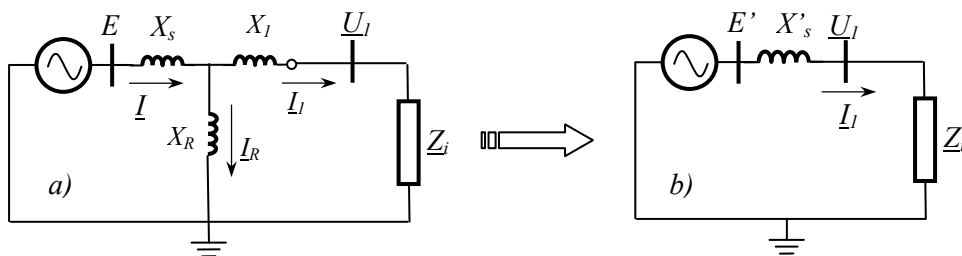


Fig. 24. Schemele electrice ale circuitelor pentru care se face echivalența: a) – circuitul original; b) – circuitul echivalent

Regimul permanent sinusoidal al circuitului real este descris de următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{E} = jX_S \underline{I} + jX_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ jX_R \underline{I}_R = jX_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ \underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_1 \end{cases} \quad (111)$$

Legea a doua a lui Kirchhoff aplicată circuitului echivalent conduce la o ecuație de forma

$$\underline{E}' = jX_S' \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_1. \quad (112)$$

Sistemul de ecuații (111) trebuie rezolvat în sensul stabilirii unei relații între tensiuni, curenți și reactanțe, de forma (112). Utilizând metoda substituției se elimină necunoscutele \underline{I} și \underline{I}_R , rezultând

$$\begin{aligned} \underline{E} &= j\underline{I}_1 \left[X_1 + \frac{X_S \cdot (X_R + X_1)}{X_R} \right] + \underline{U}_1 \left(1 + \frac{X_S}{X_R} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{X_R}{X_S + X_R} \cdot \underline{E} &= j \left(X_1 + \frac{X_S \cdot X_R}{X_S + X_R} \right) \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \end{aligned} \quad (113)$$

În consecință, sunt valabile egalitățile

$$E' = \frac{X_R}{X_S + X_R} \cdot E \quad \text{și} \quad X_S' = X_1 + \frac{X_S \cdot X_R}{X_S + X_R}. \quad (114)$$

Calcululele pentru determinarea tensiunilor la locul de defect și la începutul liniei pot fi făcute utilizând aceleași relații ca și în cazul analizat anterior, înlocuind tensiunea electromotoare E cu tensiunea electromotoare echivalentă E' , iar reactanța X_S cu X_S' . Nu trebuie neglijat faptul că în schema de secvență homopolară nu s-a modificat nimic și, în consecință, atât reactanța de scurtcircuit pe secvența homopolară ($X_{sc,h}$), cât și coeficientul de raportare (k_h) nu se modifică.

c) Cazul 5 din tabelul 3.

Schemele echivalente, pentru secvența directă și homopolară sunt cele prezentate în fig. 25, parametrii acestor scheme putând fi calculați conform § 1.1.

Ca și în cazurile precedente, prima etapă a calculului este destinată determinării impedanței de scurtcircuit. La fel ca și în primul caz analizat, impedanța de scurtcircuit se calculează ca și impedanța de intrare a unei linii alimentate fictiv pe la locul defec-tului, reactanța internă a sursei reale fiind conectată la pământ. În plus, de această dată, în paralel cu impedanța internă a sursei se află și impedanța de intrare a celei de a doua linii (\underline{Z}_{i2}), așa cum se poate observa în fig. 26. Pentru a păstra forma ecuațiilor liniilor lungi, vor fi utilizate notațiile din fig. 26.

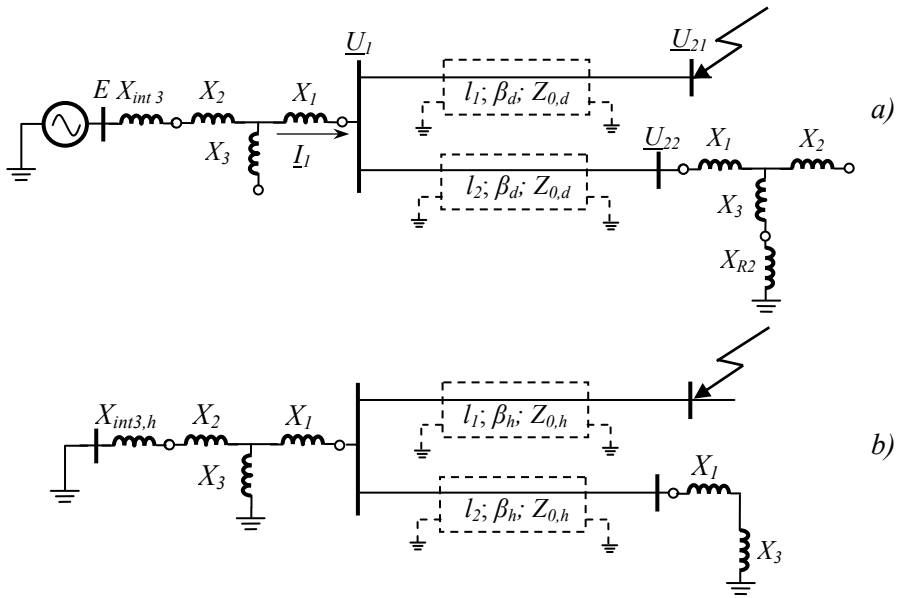


Fig. 25. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 5 din tabelul 3: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

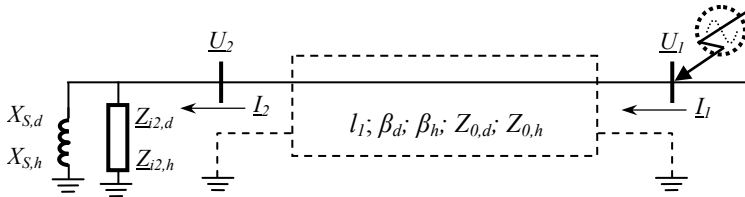


Fig. 26. Schemă echivalentă de calcul a impedanței de scurtcircuit

În fig. 26, reactanțele de secvență ale sursei se calculează cu relațiile:

$$\begin{aligned}
 X_{S,d} &= X_{\text{int}3} + X_2 + X_1 \\
 X_{S,h} &= X_1 + \frac{(X_{\text{int}3,h} + X_2) \cdot X_3}{X_{\text{int}3,h} + X_2 + X_3}
 \end{aligned}
 \quad (115)$$

Un exemplu de calcul a impedanței de intrare a unei linii cu reactor de compensare transversală, instalat la sfârșitul acesteia, a fost dat în § 2.2.1, astfel:

$$\underline{Z}_{i2} = \frac{U_2}{I_{22}} = -jZ_0 \cdot \frac{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \text{tg}\beta l_2}{1 - \frac{Z_0}{X_R} \cdot \text{ctg}\beta l_2} \cdot \text{ctg}\beta l_2 = -jZ_0' \cdot \text{ctg}\beta l_2. \quad (116)$$

Valorile reactanțelor din relațiile (115) și (116) se determină conform § 1.1, pentru datele de intrare prezentate în § 2.1. Totuși, pentru a da un exemplu numeric, pot fi utilizate o serie de valori, precum:

$$\begin{aligned}
X_{S,d} &= 97 \, \Omega, & X_{S,h} &= 98 \, \Omega; \\
X_{R,d} &= 2405 \, \Omega, & X_{R,h} &= 445 \, \Omega; \\
Z_{0,d} &= 311 \, \Omega, & Z_{0,h} &= 643 \, \Omega; \\
\beta_d l_1 &= 0,30 \, \text{rad}, & \beta_h l_1 &= 0,441 \, \text{rad}; \\
\beta_d l_2 &= 0,13 \, \text{rad}, & \beta_h l_2 &= 0,184 \, \text{rad}; \\
U &= U_{21} = 1,16 \cdot E; & U' &= U_1 = 1,09 \cdot E; & U'' &= U_{22} = 0,99 \cdot E \quad (\text{fig. 25,a}).
\end{aligned}$$

În conformitate cu condițiile simplificatoare indicate în § 2.1, relația de calcul a impedanței de scurtcircuit se deduce prin rezolvarea sistemului de ecuații

$$\begin{cases}
\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l_1 + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l_1 \\
\underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l_1 + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta l_1 \\
\underline{I}_2 = \underline{I}_{21} + \underline{I}_{22} = \frac{\underline{U}_2}{jX_S} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{i2}}
\end{cases} \quad (117)$$

Dacă la sistemul de ecuații (117) se adaugă și relația care dă impedanța de intrare a celei de a doua linii, relația de calcul a impedanței de scurtcircuit rezultă de forma

$$\underline{Z}_{sc} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = jZ_0 \cdot \frac{\frac{Z_0}{Z_0'} \cdot \left(\frac{Z_0'}{X_S} - \text{tg } \beta l_2 \right) \cdot \text{tg } \beta l_1 + 1}{\frac{Z_0}{Z_0'} \cdot \left(\frac{Z_0'}{X_S} - \text{tg } \beta l_2 \right) \cdot \text{ctg } \beta l_1 - 1} \cdot \text{ctg } \beta l_1. \quad (118)$$

Relația (118) se particularizează pentru cele două secvențe, reactanțele de secvență directă și homopolară calculându-se cu relațiile:

$$\begin{cases}
X_{sc,d} = Z_{0,d} \cdot \frac{\frac{Z_{0,d}}{Z_{0,d}'} \cdot \left(\frac{Z_{0,d}'}{X_{S,d}} - \text{tg } \beta_d l_2 \right) \cdot \text{tg } \beta_d l_1 + 1}{\frac{Z_{0,d}}{Z_{0,d}'} \cdot \left(\frac{Z_{0,d}'}{X_{S,d}} - \text{tg } \beta_d l_2 \right) \cdot \text{ctg } \beta_d l_1 - 1} \cdot \text{ctg } \beta_d l_1 \\
X_{sc,h} = Z_{0,h} \cdot \frac{\frac{Z_{0,h}}{Z_{0,h}'} \cdot \left(\frac{Z_{0,h}'}{X_{S,h}} - \text{tg } \beta_h l_2 \right) \cdot \text{tg } \beta_h l_1 + 1}{\frac{Z_{0,h}}{Z_{0,h}'} \cdot \left(\frac{Z_{0,h}'}{X_{S,h}} - \text{tg } \beta_h l_2 \right) \cdot \text{ctg } \beta_h l_1 - 1} \cdot \text{ctg } \beta_h l_1
\end{cases} \quad (119)$$

Valorile acestor reactanțe se calculează astfel:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z'_{0,d} = 311 \cdot \frac{1 + \frac{311}{2405} \cdot \operatorname{tg} 0,127}{1 - \frac{311}{2405} \cdot \operatorname{ctg} 0,127} \cdot \operatorname{ctg} 0,127 = -24815 \, \Omega \\ Z'_{0,h} = 643 \cdot \frac{1 + \frac{643}{445} \cdot \operatorname{tg} 0,184}{1 - \frac{643}{445} \cdot \operatorname{ctg} 0,184} \cdot \operatorname{ctg} 0,184 = -120,6 \, \Omega \end{array} \right. ; \quad (120)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{sc,d} = 311 \cdot \frac{\frac{311}{-24815} \cdot \left(\frac{-24815}{97} - \operatorname{tg} 0,127 \right) \cdot \operatorname{tg} 0,3 + 1}{\frac{311}{-24815} \cdot \left(\frac{-24815}{97} - \operatorname{tg} 0,127 \right) \cdot \operatorname{ctg} 0,3 - 1} \cdot \operatorname{ctg} 0,3 = 214 \, \Omega \\ X_{sc,h} = 643 \cdot \frac{\frac{643}{-120,6} \cdot \left(\frac{-120,6}{98} - \operatorname{tg} 0,184 \right) \cdot \operatorname{tg} 441 + 1}{\frac{643}{-120,6} \cdot \left(\frac{-120,6}{98} - \operatorname{tg} 0,184 \right) \cdot \operatorname{ctg} 441 - 1} \cdot \operatorname{ctg} 441 = 409 \, \Omega \end{array} \right. . \quad (121)$$

Fiind cunoscute valorile reactanțelor de scurtcircuit, pot fi utilizate relațiile (24) și (25), prin intermediul cărora se pot calcula tensiunile în componente de fază **la locul defectului**, astfel:

- pentru scurtcircuit monofazat

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = 0 \\ \frac{U_{B,C}}{U} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{X_{sc,h}}{2X_{sc,d} + X_{sc,h}} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{409}{2 \cdot 214 + 409} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} ; \end{array} \right. \quad (122)$$

respectiv

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = 0 \\ U_{B,C} = \left(-0,851 \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot U ; \end{array} \right. \quad (123)$$

cum însă $U = U_{21} = 1,16 \cdot E$, factorul de supratensiune de pe fazele sănătoase devine egal cu

$$\frac{U_{B,C}}{E} = 1,16 \cdot \sqrt{0,724 + 0,75} = 1,32 . \quad (124)$$

- pentru scurtcircuit bifazat cu pământ

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_A}{U} = \frac{3X_{sc,h}}{X_{sc,d} + 2X_{sc,h}} = \frac{3 \cdot 409}{214 + 2 \cdot 409} = 1,189 , \\ U_{B,C} = 0 \end{array} \right. , \quad (125)$$

iar în condițiile în care $U = 1,16 \cdot E$, factorul de supratensiune pe faza sănătoasă este

$$\frac{U_A}{E} = 1,16 \cdot 1,189 = 1,38. \quad (126)$$

Pentru determinarea tensiunilor, în componente de fază, în orice alt nod al rețelei analizate, se utilizează relațiile (26) și (27), după ce, în prealabil, se calculează coeficienții de raportare corespunzători.

În cazul schemei din fig. 25,a, interesează atât creșterea de tensiune la începutul liniei cu defect, pe barele stației de transformare, dar și la sfârșitul liniei L_2 , conectată la același sistem de bare ca și linia cu defect.

Pentru determinarea nivelului tensiunii pe barele stației de la care sunt alimentate cele două linii, relația generală a coeficientului de raportare se obține în manieră similară calculului unui factor de supratensiune datorată efectului capacitiv, însă în schema echivalentă rezultată în urma producerii defectului. Astfel, cu notațiile utilizate în fig. 26, coeficientul de raportare este egal cu raportul dintre tensiunile

$$k = \left| \frac{U_2}{U_1} \right|. \quad (127)$$

Din sistemul de ecuații (117) și din relația care dă impedanța de intrare a liniei cu reactor la sfârșit (116) se obține relația generală de calcul a coeficientului de raportare, sub forma

$$k = \frac{1}{\cos \beta l_1 + \frac{Z_0}{Z'_0} \cdot \left(\frac{Z'_0}{X_S} - tg \beta l_2 \right) \cdot \sin \beta l_1}. \quad (128)$$

Prin particularizarea relației (128), pentru cele două secvențe, se obțin valorile corespunzătoare ale coeficienților de raportare, relativ la începutul liniei L_1 :

$$\begin{cases} k_d = \frac{1}{\cos 0,3 + \frac{311}{-24815} \cdot \left(\frac{-24815}{97} - tg 0,127 \right) \cdot \sin 0,3} = 0,526 \\ k_h = \frac{1}{\cos 0,441 + \frac{643}{-120,6} \cdot \left(\frac{-120,6}{98} - tg 0,184 \right) \cdot \sin 0,441} = 0,234 \end{cases}. \quad (129)$$

În acest fel, fiind cunoscute valorile reactanțelor de scurtcircuit și ale coeficienților de raportare, pot fi calculate tensiunile de la începutul liniei:

- pentru scurtcircuit monofazat, se înlocuiesc valorile în relația (105)

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{1,16E} = \frac{1,09E}{1,16E} - \frac{2 \cdot 0,526 \cdot 214 + 0,234 \cdot 409}{2 \cdot 214 + 409} = 0,556 \\ \frac{U'_{B,C}}{1,16E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{1,09E}{1,16E} - \frac{0,234 \cdot 409 - 0,526 \cdot 214}{2 \cdot 214 + 409} = -0,449 \mp j 0,813 \end{cases}, \quad (130)$$

factorii de supratensiune, pe faza cu defect și pe fazele sănătoase, fiind egali cu

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{E} = 0,645 \\ \frac{U'_{B,C}}{E} = 1,077 \end{cases} \quad (131)$$

- pentru scurtcircuit bifazat cu pământ se utilizează relații de forma (108), astfel:

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{1,16E} = \frac{1,09E}{1,16E} + \frac{0,234 \cdot 409 - 0,526 \cdot 214}{214 + 2 \cdot 409} \\ \frac{U'_{B,C}}{U} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{U'}{U} + \frac{0,234 \cdot 409 + 0,5 \cdot 0,526 \cdot 214}{214 + 2 \cdot 409} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,526 \end{cases} \quad (132)$$

se obține

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{E} = 1,09 \\ \frac{U'_{B,C}}{E} = 0,65 \end{cases} \quad (133)$$

Pentru calculul tensiunilor de fază de la sfârșitul liniei L_2 se poate proceda în două moduri, astfel:

1. – se face un calcul similar celui prin care s-au determinat supratensiunile datorate efectului capacitiv, considerând însă că pe barele stației de alimentare tensiunea este cea determinată de prezența defectului (calculată anterior);
2. – se calculează coeficienții de raportare între tensiunea de la sfârșitul liniei L_2 și aceea de la sfârșitul liniei L_1 (locul defectului), acești coeficienți de raportare urmând a fi introduși în relații de forma (105) și (108).

Pentru calculul noilor coeficienți de raportare se poate utiliza, în cazul schemei analizate, un circuit echivalent de forma celui prezentat în fig. 27, în care se face referire la notațiile din fig. 25,a.

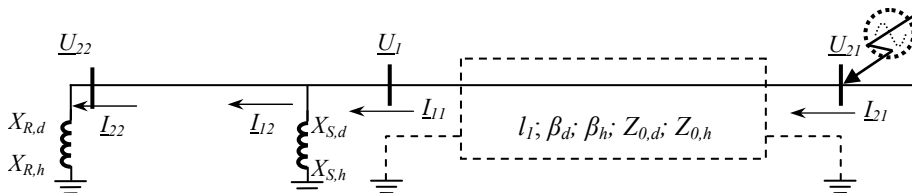


Fig. 27. Schemă echivalentă de calcul a coeficienților de raportare relativ la sfârșitul liniei L_2

Ecuatiile care descriu funcționarea circuitului din fig. 27 sunt următoarele:

$$\begin{cases} \underline{U}_{21} = \underline{U}_1 \cdot \cos \beta l_1 + jZ_0 \underline{I}_{11} \cdot \sin \beta l_1 \\ \underline{I}_{21} = j \frac{\underline{U}_1}{Z_0} \cdot \sin \beta l_1 + \underline{I}_{11} \cdot \cos \beta l_1 \\ \underline{U}_1 = \underline{U}_{22} \cdot \cos \beta l_2 + jZ_0 \underline{I}_{22} \cdot \sin \beta l_2 \\ \underline{I}_{12} = j \frac{\underline{U}_{22}}{Z_0} \cdot \sin \beta l_2 + \underline{I}_{22} \cdot \cos \beta l_2 \\ \underline{I}_{22} = \frac{\underline{U}_{22}}{jX_R} \\ \underline{I}_{11} = \underline{I}_{12} + \frac{\underline{U}_1}{jX_S} \end{cases} \quad (134)$$

Prin rezolvarea acestui sistem de ecuații, în sensul determinării raportului dintre tensiunea de la sfârșitul liniei \mathbf{L}_2 și tensiunea de la locul defectului, se obține

$$k' = \frac{U_{22}}{U_{21}} = \frac{1}{\cos \beta l + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \sin \beta l + \frac{Z_0}{X_S} \cdot \sin \beta l_1 \cdot \cos \beta l_2 + \frac{Z_0^2}{X_S \cdot X_R} \cdot \sin \beta l_1 \cdot \sin \beta l_2} \quad (135)$$

Particularizarea relației (135) pentru secvență directă și pentru secvență homopolară conduce la următoarele rezultate:

$$\begin{cases} k'_d = 0,52 \\ k'_h = 0,187 \end{cases} \quad (136)$$

Prin înlocuirea valorilor coeficienților de raportare (136) și a reactanțelor de scurtcircuit (121) în relații de forma (105) și (108) se obțin valorile tensiunilor de la sfârșitul liniei \mathbf{L}_2 :

- pentru scurtcircuit monofazat

$$U_A = 0,685 \cdot E; \quad U_{B,C} = 1,077 \cdot E. \quad (137)$$

- pentru scurtcircuit bifazat cu pământ

$$U_A = 1,06 \cdot E; \quad U_{B,C} = 0,59 \cdot E. \quad (138)$$