

3. DETERMINAREA ANALITICĂ A NIVELULUI SUPRATENSIUNILOR TEMPORARE

3.1. Aspecte teoretice

3.1.1. Scheme echivalente ale rețelelor de transport a energiei electrice

Abordarea analitică a supratensiunilor implică, ca o primă etapă a algoritmului, întocmirea schemei echivalente a rețelei analizate. Deoarece supratensiuni temporare având un nivel periculos pentru izolația instalațiilor se pot produce, practic, doar în rețelele de transport a energiei electrice ce au în componență linii de mare lungime, se vor face referiri la schemele echivalente ale acestor rețele.

Întrucât supratensiunile temporare sunt supratensiuni de durată relativ mare și cu amortizare redusă, referirile ulterioare se vor face doar la analiza regimului permanent sinusoidal, la frecvență industrială.

Pentru exemplificarea modului de întocmire a schemelor echivalente, se pornește de la o schemă monofilară de tipul celei prezentate în fig. 1. Pentru a simplifica abordarea, nu s-a luat în considerare o structură complex buclată. Nu sunt figurate toate întrerupătoarele unei asemenea rețele, cele figurate având doar rolul de a sugera diferite scheme tipice în care să se analizeze nivelul supratensiunilor temporare.

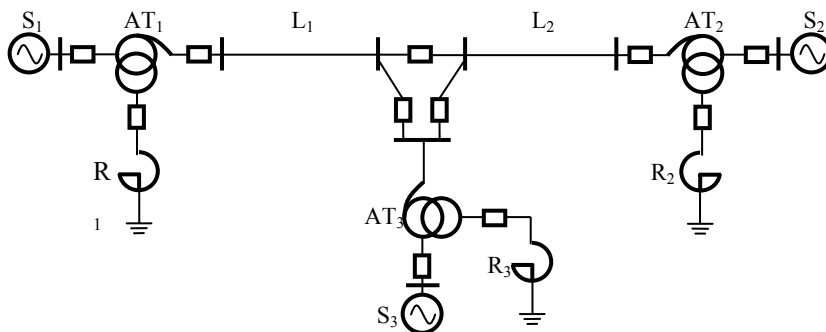


Fig. 1. Schema monofilară simplificată a unei rețele de transport a energiei electrice:
S₁, S₂, S₃ – sursele sistemului; AT₁, AT₂, AT₁₃ – autotransformatoare; L₁, L₂ – linii electrice;
R₁, R₂, R₃ – reactoare de compensare transversală (reactoare șunt).

Pentru întocmirea schemei echivalente a rețelei, fiecare dintre elementele acesteia se înlocuiește printr-un circuit electric echivalent, adecvat regimului ce urmează a fi analizat. Dacă în cazul studiului supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv se analizează un regim simetric, fiind suficientă întocmirea schemei echivalente de secvență directă, în cazul analizei nivelului supratensiunilor temporare datorate nesimetriilor transversale și longitudinale este necesar să se întocmească și schemele echivalente de secvență inversă și de secvență homopolară.

Schemele echivalente ale elementelor rețelei sunt prezentate în cele ce urmează, parametrii acestora fiind raportați la valoarea cea mai ridicată a treptei maxime de tensiune din rețea, U_m , treapta de tensiune a liniilor de transport a energiei electrice.

✓ Sursele

În schema echivalentă de secvență directă, sursele se înlocuiesc printr-un sistem de fazori de secvență directă, având modulul egal cu tensiunea electromotoare a sursei (E) și prin impedanța internă a acesteia. Dacă se neglijează pierderile, impedanța este formată doar din reactanța inductivă internă (X_{intern}) a sursei (fig. 2), astfel:

- în cazul subsistemelor energetice - reactanța de scurtcircuit (X_{sc}), calculată funcție de puterea de scurtcircuit a subsistemului energetic din amonte (S_{sc})

$$X_{sc} = \frac{U_m^2}{S_{sc}}; \quad (1)$$

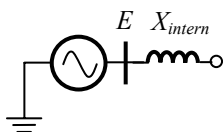


Fig. 2. Schema echivalentă de secvență directă a unei surse

- în cazul turbogeneratoarelor - reactanța supratranzitorie;
- în cazul hidrogeneratoarelor – reactanța tranzitorie.

În schemele de secvență inversă și homopolară, sursele se înlocuiesc doar prin reactanța internă corespunzătoare secvenței respective. Acest mod de întocmire a schemei echivalente este consecința faptului că, pe armonica fundamentală, nu există surse de tensiune inversă, așa cum există pe armonicile superioare.

În cazul generatoarelor sincrone, între valorile reactanțelor interne, calculate pe cele trei secvențe, există relația

$$X_{Gi} < X_{Gd} < X_{Gh}. \quad (2)$$

În cazul subsistemelor energetice având putere suficient de mare, reactanța de secvență inversă este egală cu aceea de secvență directă, iar reactanța de secvență homopolară este cu aproximativ 5 % mai mare.

✓ *Transformatoarele și autotransformatoarele*

Aceste echipamente se pot înlocui prin schemele lor clasice „T”, „Γ” sau „Γ-răsturnat”. Elementele schemei modelează magnetizarea, dispersia, pierderile în cupru și în fier, raportul de transformare regăsindu-se, implicit, în valorile calculate ale parametrilor schemei echivalente. Toate autotransformatoarele ca și unele transformatoare care fac parte din rețelele de transport a energiei electrice au trei înfășurări, întotdeauna existând o înfășurare cu conexiune în triunghi. Pentru aceste transformatoare, schema echivalentă de tip „T” este de forma celei prezentate în fig. 3,a, în cazul neglijării pierderilor schema echivalentă fiind aceea din fig. 3,b.

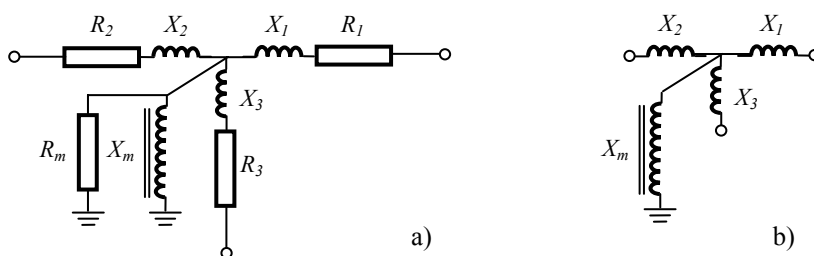


Fig. 3. Schema echivalentă a unui transformator cu trei înfășurări, pentru cazul în care sunt luate în considerare pierderile – a), respectiv neglijate – b):

R_1, R_2, R_3 – rezistențe corespunzătoare pierderilor în cuprul înfășurărilor; R_m – rezistența corespunzătoare pierderilor în fier; X_1, X_2, X_3 – reactanțe de dispersie; X_{1m} – reactanța de magnetizare.

În cazul transformatoarelor mari componenta activă a tensiunii de scurtcircuit este mult mai mică decât componenta reactivă, astfel încât rezistențele R_1, R_2 și R_3 pot fi neglijate, în raport cu reactanțele echivalente de dispersie. De asemenea, conductanța ramurii transversale este mult mai mică decât susceptanța acesteia, valoarea foarte mare a rezistenței R_m , în raport cu reactanța X_m , permițând neglijarea acesteia. Astfel, datorită puterilor mari ale transformatoarelor și autotransformatoarelor din rețelele de transport a energiei electrice, se pot utiliza scheme echivalente simplificate, de tipul celor din fig. 3,b. Neglijarea rezistențelor conduce la rezultate ușor acoperitoare, însă pe deplin acceptabile în calculele ingineresti. Adoptarea, fără rezerve, a acestei ipoteze simplificatoare poate fi făcută pentru că supratensiunile temporare sunt lent amortizate.

În cazul în care se neglijează pierderile prin transformator, impedanțele de scăpări se calculează cu o relație de forma

$$X_i = \frac{U_{sc,i}}{100} \cdot \frac{U_m^2}{S_{n,i}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

în care $U_{sc,i}$ reprezintă tensiunea de scurtcircuit raportată la fiecare înfășurare, iar $S_{n,i}$ puterea nominală a fiecărei înfășurări. Tensiunile de scurtcircuit raportate se obțin cu relații de forma

$$\begin{cases} U_{sc,1} = \frac{U_{sc,1-2} + U_{sc,3-1} - U_{sc,2-3}}{2} \\ U_{sc,2} = \frac{U_{sc,1-2} + U_{sc,2-3} - U_{sc,3-1}}{2} \\ U_{sc,3} = \frac{U_{sc,3-1} + U_{sc,2-3} - U_{sc,1-2}}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

în care tensiunile de scurtcircuit $U_{sc, 1-2}$, $U_{sc, 2-3}$ și $U_{sc, 3-1}$ rezultă din încercările la scurtcircuit efectuate pe grupuri de câte două înfășurări, a treia rămânând în gol.

Reactanța de magnetizare se calculează cu relația

$$X_m = \frac{100}{I_{o,\%}} \cdot \frac{U_m^2}{S_n}, \quad (5)$$

în care $I_{o,\%}$ este curentul de mers în gol, în procente față de curentul nominal, iar S_n puterea nominală la care este dimensionat miezul magnetic al transformatorului.

Schema de secvență inversă este identică cu schema de secvență directă, cu aceleași valori ale parametrilor. Parametrii schemei de secvență homopolară ai transformatoarelor și autotransformatoarelor depind de tipul constructiv și de schema de conexiuni a acestora. Transformatoarele de putere care au circuitul magnetic cu cinci coloane sau în manta, au reactanță homopolară relativ mică, putându-se admite că acestea sunt egale cu acelea de secvență directă. Dacă în cazul transformatoarelor cu două înfășurări reactanța de magnetizare nu poate fi, întotdeauna, neglijată în calculul reactanței echivalente homopolare, în cazul transformatoarelor cu trei înfășurări, deoarece acestea au întotdeauna o înfășurare în triunghi, influența reactanței de magnetizare poate fi neglijată. Funcție de schema de conexiuni, reactanța homopolară se calculează astfel:

$$\begin{aligned} - \mathbf{Y_0YD} &\rightarrow X_h = X_1 + X_3; \\ - \mathbf{Y_0Y_0D} &\rightarrow X_h = X_1 + X_2; \\ - \mathbf{Y_0DD} &\rightarrow X_h = X_1 + \frac{X_2 X_3}{X_2 + X_3}, \end{aligned} \quad (6)$$

X_1 , X_2 și X_3 fiind reactanțele de dispersie corespunzătoare secvenței directe.

Trebuie, de asemenea, menționat faptul că existența unei conexiuni în triunghi sau stea cu neutrul izolat reprezintă punct de întrerupere în schema homopolară.

✓ *Liniile electrice*

Deoarece în componența rețelelor de transport a energiei electrice există, practic, numai linii electrice aeriene, referirile ulterioare vor fi făcute numai la acest tip constructiv de linii.

Funcție de tipul constructiv al liniei, evident, în strânsă legătură cu tensiunea nominală a acesteia, și de natura regimului ce urmează a fi analizat există mai multe posibilități de înlocuire a unei linii electrice aeriene într-o schemă echivalentă. Astfel, dacă liniile electrice din rețelele de distribuție pot fi înlocuite prin cuadripoli unici, de tip „T” sau „II”, cu elemente concentrate și parametri nominali (calculați prin înmulțirea parametrilor lineici cu lungimea liniei modelate), în cazul liniilor lungi o asemenea modelare conduce la erori inacceptabil de mari. O soluție de micșorare a erorii poate fi aceea a înlocuirii liniilor lungi prin lanțuri de cuadripoli cu elemente de circuit concentrate și parametri nominali, fiecare dintre cuadripoli modelând un tronson de linie având lungimea de ordinul a $50 \div 100$ km. Chiar dacă o asemenea abordare permite determinarea valorilor tensiunilor și curenților în mai multe puncte, schemele echivalente ale rețelelor de transport pot deveni foarte complexe.

Pentru a micșora erorile de calcul și pentru a evita operarea cu scheme echivalente extinse, liniile electrice lungi se înlocuiesc prin cuadripoli cu parametri uniform distribuiți (fig.4).

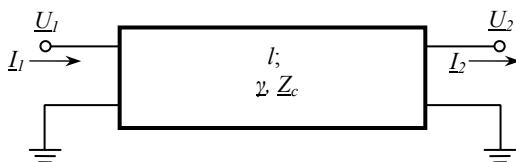


Fig. 4. Schema echivalentă cu parametri uniform distribuiți a liniilor lungi

Variația tensiunii și curentului, în timp și de-a lungul liniilor, este descrisă de *ecuațiile telegrafiștilor*, ecuații diferențiale de ordinul 2 cu derivate parțiale. Deoarece supratensiunile temporare sunt supratensiuni la frecvență industrială, în modelele matematice se utilizează *ecuațiile liniilor lungi*, formă particulară a ecuațiilor telegrafiștilor, pentru regim armonic staționar:

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cdot \underline{ch}\underline{\gamma}x + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \cdot \underline{sh}\underline{\gamma}x \\ \underline{I}(x) = \underline{Y}_c \underline{U}_2 \cdot \underline{sh}\underline{\gamma}x + \underline{I}_2 \cdot \underline{ch}\underline{\gamma}x \end{cases} \quad (7)$$

în care $\underline{U}(x)$ și $\underline{I}(x)$ reprezintă tensiunea și respectiv curentul într-un punct de pe linie situat la distanța x de sfârșitul acesteia, \underline{U}_2 și \underline{I}_2 tensiune și respectiv curentul de la sfârșitul liniei, \underline{Z}_c și \underline{Y}_c impedanța respectiv admitanța caracteristică a liniei, $\underline{\gamma}$ constanta complexă de propagare.

Parametrii de propagare sunt dați de relațiile:

$$\underline{Z}_c = \underline{Y}_c^{-1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}; \quad \underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta, \quad (8)$$

în care \underline{Z}_0 și \underline{Y}_0 sunt parametrii lineici, α constanta de atenuare și β constanta de fază.

În calcule interesează, în majoritatea situațiilor, relația dintre tensiunile și curenții de la extremitățile unei linii de lungime l , caz în care se utilizează o formă particulară a ecuațiilor liniilor lungi:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l \\ \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l \end{cases} \quad (9)$$

Dacă se neglijează pierderile longitudinale și transversale ($R = 0$ și $G = 0$), ipoteză acceptabilă în cazul liniilor relativ scurte, pentru care $R \ll \omega L$, și în absența descărcării corona, constanta de atenuare devine nulă, ecuațiile (9) putând fi scrise sub forma

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta l \end{cases} \quad (10)$$

în care Z_0 este impedanța caracteristică a liniilor fără pierderi.

Pierderile longitudinale nu pot fi neglijate pentru linii oricât de lungi. În cazul în care $R \neq 0$, parametrii de propagare pot fi calculați cu relațiile:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R}{2Z_0}; & \beta = \omega \sqrt{LC}; \\ \underline{Z}_c = Z_0 \left(1 - j \frac{\alpha}{\beta} \right); & \underline{\gamma} = \alpha + j\beta \end{cases} \quad (11)$$

Atunci când tensiunea crește cu $15 \div 20$ % peste valoarea de vârf a tensiunii celei mai ridicate a rețelei, se aprinde descărcarea corona. Descărcarea corona determină modificarea parametrilor transversali ai liniei, creșterea capacității și a conductanței de pierderi fiind dependentă de valoarea instantanee a tensiunii (în conformitate cu caracteristica tensiune-sarcină a tipului constructiv al liniei, pentru anumite condiții de mediu). În aceste condiții, linia nu mai poate fi înlocuită printr-un singur cuadripol, ci printr-un lanț de cuadripoli, lungimea modelată de fiecare cuadripol din lanț fiind suficient de mică încât tensiunea să poată fi considerată constantă, pe toată lungimea tronsonului modelat de un cuadripol.

Supratensiuni datorate efectului capacitiv

Analiza acestui tip de supratensiuni se efectuează în regim simetric, fiind suficiente referirile la o singură fază. Astfel, este suficient să se întocmească doar schema echivalentă de secvență directă a rețelei analizate.

Abordarea analitică a acestui tip de supratensiuni presupune determinarea creșterii relative a tensiunii pe liniile rețelei și creșterea tensiunii de la începutul liniilor, în raport cu tensiunea electromotoare a sursei echivalente.

Un exemplu de calcul poate fi dat în legătură cu schema monofilară din fig. 5,a, căreia îi corespunde schema electrică echivalentă din fig. 5,b.

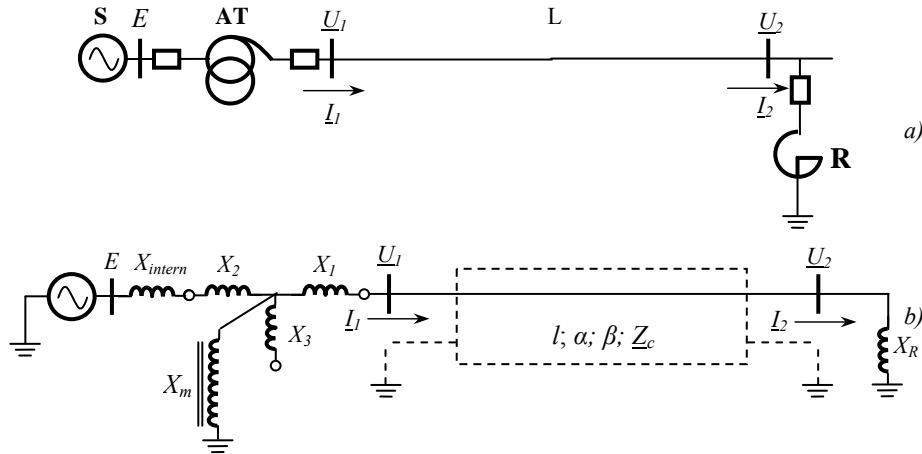


Fig. 5. Schema monofilară a unui tronson de rețea de transport a energiei electrice (a) și schema sa echivalentă de secvență directă (b)

Dacă se neglijează influența reactanței de magnetizare a autotransformatorului, reactanța globală a sursei devine

$$X_s = X_{intern} + X_2 + X_1. \quad (12)$$

Pentru determinarea creșterii relative a tensiunii pe linie se utilizează prima ecuație din sistemul celor două ecuații ale liniilor lungi și o ecuație care să explicitizeze curentul I_2 , astfel:

- dacă reactorul de compensare transversală (**R**) este deconectat

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot ch\gamma l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \cdot sh\gamma l \\ \underline{I}_2 = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

- dacă reactorul de compensare transversală (**R**) este conectat la linie

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot ch\gamma l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \cdot sh\gamma l \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_R} \end{cases}. \quad (14)$$

Pentru cele două situații, relațiile de calcul a factorului de supratensiune sunt:

$$k_1 = \left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| = \frac{1}{|ch\gamma l|} \text{ și respectiv } k_1 = \left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| = \frac{1}{\left| ch\gamma l + \frac{\underline{Z}_c}{jX_R} sh\gamma l \right|}. \quad (15)$$

Dacă se neglijează atât pierderile longitudinale, cât și cele transversale ($\alpha = 0$), relațiile (15) devin de forma:

$$k_1 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l} \text{ și respectiv } k_1 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l + \frac{Z_0}{X_R} \sin \beta l}. \quad (16)$$

Creșterea tensiunii de la începutul liniei, în raport cu tensiunea electromotoare a sursei, se poate determina prin intermediul unei scheme electrice echivalente omogene, cu parametri concentrați, obținute prin înlocuirea liniei prin impedanța sa de intrare (fig. 6).

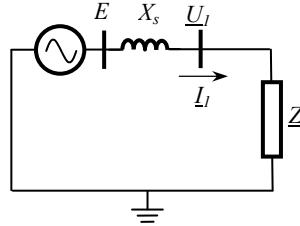


Fig. 6. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

În cazul neglijării pierderilor longitudinale și transversale, sistemele de ecuații necesare determinării relației de calcul a impedanței de intrare (Z_i) sunt următoarele:

- dacă reactorul de compensare transversală (**R**) este deconectat

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta l \\ \underline{I}_2 = 0 \end{cases} \quad ; \quad (17)$$

- dacă reactorul de compensare transversală (**R**) este conectat la linie

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta l \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_R} \end{cases} \quad . \quad (18)$$

Din sistemul de ecuații (17) se obține relația de calcul a impedanței de intrare a unei linii funcționând în gol

$$\underline{Z}_i = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = -jZ_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta l \quad (19)$$

iar din sistemul de ecuații (18) se obține impedanța de intrare a liniei cu reactor conectat la sfârșitul acesteia

$$\underline{Z}_i = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = -jZ_0 \cdot \frac{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{tg} \beta l}{1 - \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{ctg} \beta l} \cdot \operatorname{ctg} \beta l = -jZ_0' \cdot \operatorname{ctg} \beta l \quad (20)$$

Dacă în circuitul reprezentat în fig. 6, aflat în regim permanent sinusoidal, se aplică teorema a II-a a lui Kirchhoff și legea lui Ohm, se obține sistemul de ecuații

$$\begin{cases} E = jX_s I_1 + U_1 \\ I_1 = \frac{U_1}{Z_i} \end{cases}, \quad (21)$$

prin a cărui soluționare se obține relația de calcul a creșterii tensiunii la începutul liniei

$$k_2 = \left| \frac{U_1}{E} \right| = \frac{1}{1 - \frac{X_s}{Z_0} \cdot \operatorname{tg} \beta l}. \quad (22)$$

Relația (22) corespunde situației în care linia funcționează în gol. Dacă, însă, la capătul acesteia se află conectat un reactor de compensare transversală, atunci în locul impedanței caracteristice a liniei fără pierderi, Z_0 , intervine impedanța echivalentă Z'_0 , dată în relația (20).

Factorul de supratensiune global, care reflectă solicitarea reală a izolației, este dat de relația

$$k = \frac{U_2}{E} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_1}{E} = k_1 \cdot k_2. \quad (23)$$

Supratensiuni datorate nesimetriilor longitudinale

Funcționarea temporară cu număr incomplet de faze, datorită refuzului unui echipament de efectuare a unei comutații sau ruperii unui conductor, poate conduce la supratensiuni semnificative, fie ca efect al producerii unui fenomen de rezonanță la frecvență industrială, fie ca efect al producerii fenomenului de ferorezonanță.

Dacă se neglijează reactanțele de magnetizare ale transformatoarelor și, implicit, posibilitatea saturării miezurilor magnetice ale acestora, schema echivalentă are în componență numai elemente lineare de circuit, în această situație putându-se analiza supratensiunile de rezonanță. Dacă o asemenea nesimetrie se produce în condițiile agravante în care linia funcționa în gol, efectele se suprapun, conducând la creșteri importante ale tensiunii. Pentru a analiza un asemenea regim, se poate adopta o schemă monofilară de tipul celei prezentate în fig. 8, nesimetria fiind generată de întrerupătorul din amonte de autotransformator.

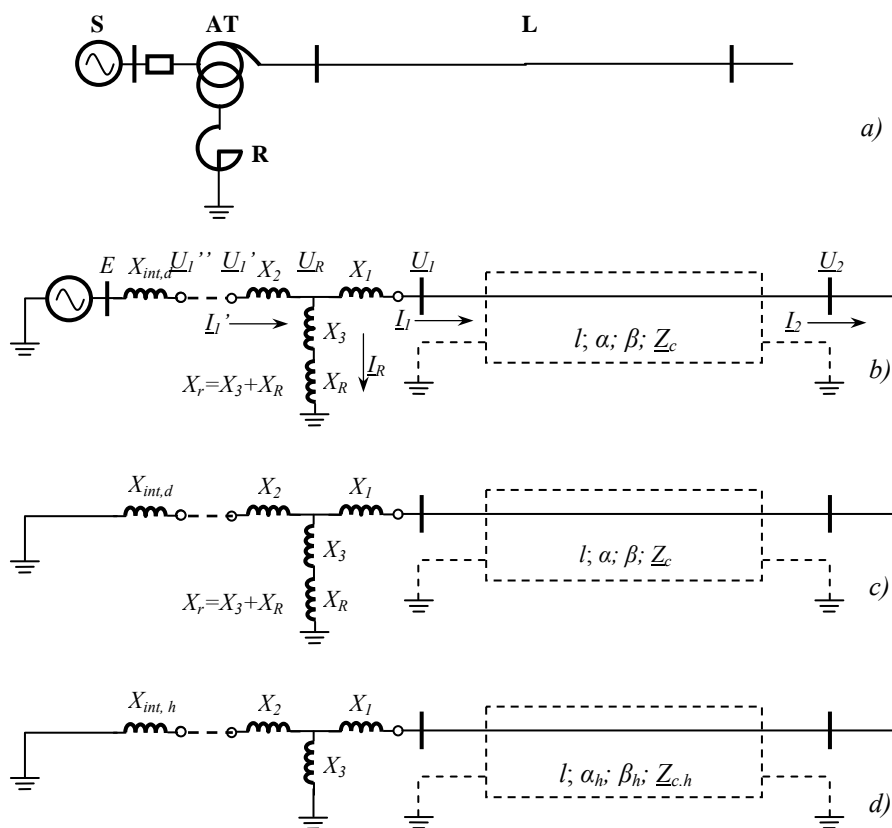


Fig. 8. Schema monofilară (a) și schemele echivalente de secvență directă (b), inversă (c) și homopolară (d) pentru studiul nesimetriilor longitudinale

Chiar dacă tensiunile și curenții din fig. 8,b nu sunt notați cu indicele „d”, aceștia se referă la secvența directă.

Utilizând metoda componentelor simetrice, se obțin următoarele relații de calcul ale tensiunilor fază-pământ:

a) *întrerupere pe o fază*

- tensiuni la locul întreruperii, în amonte de aceasta

$$\begin{cases} \frac{U''_{1,A}}{E} = 1 + \frac{Z_{\text{int},h} - Z_{\text{int},d}}{Z_{1d} + 2Z_{1h}} \\ \frac{U''_{1,B;C}}{E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{Z_{id}}{Z_{1d}} + \frac{Z_{id} Z_{\text{int},h} - Z_{\text{int},d} Z_{ih}}{Z_{1d} \cdot (Z_{1d} + 2Z_{1h})} \end{cases}; \quad (35)$$

- tensiuni la locul întreruperii, în aval de aceasta

$$\begin{cases} \frac{U'_{1,A}}{E} = \frac{Z_{id} - Z_{ih}}{Z_{1d} + 2Z_{1h}}; \\ \frac{U'_{1,B;C}}{E} = \frac{U''_{1,B;C}}{E} \end{cases}; \quad (36)$$

- tensiunile fază-pământ în oricare al punct al liniei

$$\begin{cases} \frac{U_{2,A}}{E} = \frac{k_d Z_{id} - k_h Z_{ih}}{Z_{1d} + 2Z_{1h}} \\ \frac{U_{2,B;C}}{E} = -\frac{k_h Z_{ih} + 0,5k_d Z_{id}}{Z_{1d} + 2Z_{1h}} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} k_d \frac{Z_{id}}{Z_{1d}} \end{cases}. \quad (37)$$

b) *întrerupere pe două faze*

- tensiuni la locul întreruperii, în amonte de aceasta

$$\begin{cases} \frac{U''_{1,A}}{E} = \frac{2Z_{id} + Z_{ih}}{2Z_{1d} + Z_{1h}} \\ \frac{U''_{1,B;C}}{E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{Z_{\text{int},h} - Z_{\text{int},d}}{2Z_{1d} + Z_{1h}} \end{cases}; \quad (38)$$

- tensiuni la locul întreruperii, în aval de aceasta

$$\begin{cases} \frac{U'_{1,A}}{E} = \frac{U''_{1,A}}{E} \\ \frac{U'_{1,B;C}}{E} = \frac{Z_{ih} - Z_{id}}{2Z_{1d} + Z_{1h}} \end{cases}; \quad (39)$$

- tensiunile fază-pământ în oricare al punct al liniei

$$\begin{cases} \frac{U_{2,A}}{E} = \frac{2k_d \underline{Z}_{id} + k_h \underline{Z}_{ih}}{2\underline{Z}_{1d} + \underline{Z}_{1h}} \\ \frac{U_{2,B,C}}{E} = \frac{k_h \underline{Z}_{ih} - k_d \underline{Z}_{id}}{2\underline{Z}_{1d} + \underline{Z}_{1h}} \end{cases} \quad (40)$$

Semnificația notațiilor din relațiile (35) ÷ (40) este următoarea:

- $\underline{Z}_{int,d}$ și $\underline{Z}_{int,h}$ – impedanța internă a sursei, calculată pe secvență directă, respectiv homopolară;
- \underline{Z}_{id} și \underline{Z}_{ih} – impedanța de intrare a circuitului din aval de locul nesimetriei longitudinale, calculată pe secvență directă, respectiv homopolară;
- k_d și k_h – coeficient de raportare a tensiunilor din punctul de calcul ales și de la locul nesimetriei, calculat pe secvență directă, respectiv homopolară;
- \underline{Z}_{1d} și \underline{Z}_{1h} – impedanțe echivalente, date de relațiile (41).

$$\underline{Z}_{1d} = \underline{Z}_{int,d} + \underline{Z}_{id}, \quad \underline{Z}_{1h} = \underline{Z}_{int,h} + \underline{Z}_{ih}. \quad (41)$$

Păstrând notațiile din fig.8, impedanța de intrare, în raport cu locul nesimetriei, poate fi determinată din următoarea schemă electrică echivalentă omogenă, cu parametri concentrați:

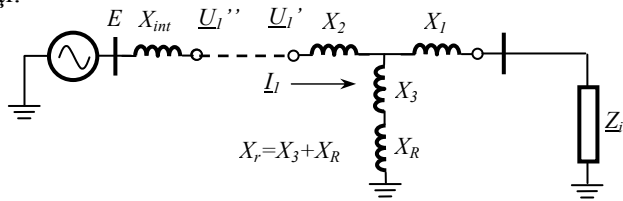


Fig. 9. Schema electrică echivalentă utilizată pentru calculul impedanței de intrare în cazul unei nesimetrie longitudinale determinate de echipamentul de comutație dintr-o schemă bloc transformator-linie (fig.8)

Impedanța de intrare în raport cu locul nesimetriei se calculează cu relația

$$\underline{Z}_i = \frac{U_1'}{I_1} = jX_2 + \frac{jX_r \cdot (jX_1 + \underline{Z}_{il})}{jX_r + jX_1 + \underline{Z}_{il}}, \quad (42)$$

în care s-a notat cu \underline{Z}_{il} impedanța de intrare a liniei, ce se determină conform § 1.2.1. Astfel, pentru cazul în care linia funcționează în gol și sunt neglijate atât pierderile longitudinale, cât și cele transversale, relația de calcul a impedanței de intrare în raport cu locul nesimetriei longitudinale este de forma

$$\underline{Z}_i = j \cdot \left[X_2 + \frac{(X_3 + X_R) \cdot (X_1 - Z_0 \cdot ctg\beta l)}{X_3 + X_R + X_1 - Z_0 \cdot ctg\beta l} \right]. \quad (43)$$

Particularizând relația (43) pot fi determinate relațiile de calcul ale impedanțelor de intrare, pe secvență directă și homopolară (conform schemelor din fig. 8):

$$\begin{cases} \underline{Z}_{id} = j \cdot \left[X_2 + \frac{(X_3 + X_R) \cdot (X_1 - Z_{0,d} \cdot \text{ctg} \beta_d l)}{X_3 + X_R + X_1 - Z_{0,d} \cdot \text{ctg} \beta_d l} \right] = j \cdot X_{id} \\ \underline{Z}_{ih} = j \cdot \left[X_2 + \frac{X_3 \cdot (X_1 - Z_{0,h} \cdot \text{ctg} \beta_h l)}{X_3 + X_1 - Z_{0,h} \cdot \text{ctg} \beta_h l} \right] = j \cdot X_{ih} \end{cases} \quad (44)$$

În cazul în care la sfârșitul liniei este conectat un reactor de compensare transversală, impedanța de intrare a liniei, din relația (42), se înlocuiește cu aceea dată de relația (20).

Ca și în cazul nesimetriilor transversale, interesează determinarea nivelului solicitării și în alte noduri ale rețelei, în relațiile de calcul (37) și (40) intrând coeficienții de raportare a tensiunii din punctul de calcul, la tensiunea din punctul producerii nesimetriei. Pentru o schemă de tipul celei prezentate în fig. 8, este de așteptat ca valoarea maximă a supratensiunii temporare să se înregistreze la sfârșitul aflat în gol al liniei, creșterea suplimentară a tensiunii datorându-se efectului capacitiv. Pentru determinarea relației de calcul a coeficientului de raportare, cu notațiile din fig. 8,b, poate fi utilizat următorul sistem de ecuații

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j Z_0 \underline{I}_2 \sin \beta l \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \sin \beta l + \underline{I}_2 \cos \beta l \\ \underline{I}_2 = 0 \\ \underline{U}_R = \underline{U}_1 + j X_1 \underline{I}_1 \\ \underline{U}'_1 = \underline{U}_R + j X_1 \underline{I}'_1 \\ \underline{I}_R = \frac{\underline{U}_R}{j X_r} \\ \underline{I}'_1 = \underline{I}_1 + \underline{I}_R \end{cases} \quad (45)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații (45), în sensul determinării raportului dintre tensiunea de la sfârșitul liniei și tensiunea de la locul nesimetriei, conduce la următoarea relație generală de calcul a coeficienților de raportare

$$k = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}'_1} = \frac{1}{\cos \beta l} \cdot \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_r} - \frac{1}{Z_0} \cdot \left(X_1 + X_1 + \frac{X_1 X_2}{X_r} \right) \cdot \text{tg} \beta l} \quad (46)$$

Prin particularizarea relației (46), conform schemelor echivalente redată în fig. 8, se obțin coeficienții de raportare de secvență directă și homopolară:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_d = \frac{1}{\cos \beta_d l} \cdot \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_r} - \frac{1}{Z_{0,d}} \cdot \left(X_1 + X_1 + \frac{X_1 X_2}{X_r} \right) \cdot \operatorname{tg} \beta_d l} \\ k_h = \frac{1}{\cos \beta_h l} \cdot \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_3} - \frac{1}{Z_{0,h}} \cdot \left(X_1 + X_1 + \frac{X_1 X_2}{X_3} \right) \cdot \operatorname{tg} \beta_h l} \end{array} \right. \quad (47)$$

În cazul în care tensiunea pe transformator crește peste anumite limite, saturarea miezului magnetic al acestuia nu mai poate fi neglijată, iar reactanța de magnetizare intervine în schema electrică echivalentă, ca element nelinear de circuit (fig. 10).

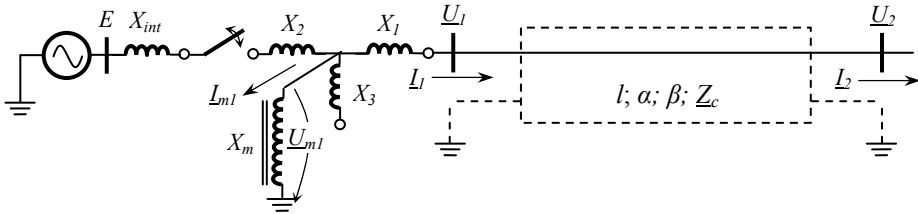


Fig. 10. Schemă electrică echivalentă, de principiu, pentru calculul supratensiunilor de ferorezonanță, la nesimetriei longitudinale.

Saturarea circuitului magnetic determină deformarea sinusoidelor tensiunii și curentului, motiv pentru care analiza ar trebui făcută atât pe armonica fundamentală, cât și pe armonicile superioare. În rețelele având linii de lungimi medii, frecvență întâlnite în structura sistemelor electroenergetice, riscul producerii rezonanței pe armonicile superioare este mai mare decât acela al producerii rezonanței la frecvență industrială. În același timp, pierderile corona sunt direct proporționale cu frecvența. Astfel, descărcarea corona, ce apare pe liniile rețelei, determină reducerea semnificativă a componentelor de frecvență ridicată ale supratensiunii, în majoritatea situațiilor fiind suficientă analiza efectuată pe armonica fundamentală (indice „ l ” pentru tensiunea și curentul din circuitul reactanței de magnetizare – fig.10).

Ca și în cazul supratensiunilor de rezonanță, regimul fiind unul nesimetric, abordarea analitică se realizează prin intermediul metodei componentelor simetrice, transformându-se schema trifazată nesimetrică într-o schemă monofazată, fără cuplaje între elementele circuitului. Dacă se neglijează pierderile, indiferent dacă întreruperea este monofazată sau bifazată, tensiunea U_{m1} se determină cu o relație de forma

$$U_{m1} = \pm E_{ech} + X_{ech} I_{m1}, \quad (48)$$

în care tensiunea electromotoare echivalentă (E_{ech}) și reactanța echivalentă (X_{ech}) se calculează cu relații care depind de structura schemei și de tipul nesimetriei.

Pentru exemplificare, în cazul schemei din figura 10, relațiile de calcul ale tensiunii electromotoare echivalente și ale reactanței echivalente sunt:

a) *întrerupere pe o fază*

$$E_{ech} = -\frac{X_{i,h} - X_{i,d}}{X_{1,d} + 2X_{1,h}} \cdot E, \quad (49)$$

$$X_{ech} = X_{i,d} + \frac{\frac{X_{i,h} - X_{i,d}}{3} \cdot \left(\frac{X_{1,d}}{2} - \frac{X_{int,h} - X_{int,d}}{3} \right)}{\frac{X_{i,h} - X_{i,d}}{3} + \frac{X_{1,d}}{2} - \frac{X_{int,h} - X_{int,d}}{3}}; \quad (50)$$

b) *întrerupere pe două faze*

$$E_{ech} = -\frac{X_{i,h} - X_{i,d}}{2X_{1,d} + X_{1,h}} \cdot E, \quad (51)$$

$$X_{ech} = X_{i,d} + 2 \cdot \frac{\frac{X_{i,h} - X_{i,d}}{3} \cdot \left(X_{1,d} - \frac{X_{int,h} - X_{int,d}}{3} \right)}{\frac{X_{i,h} - X_{i,d}}{3} + X_{1,d} - \frac{X_{int,h} - X_{int,d}}{3}}. \quad (52)$$

În relațiile (49) ÷ (52), semnificația notațiilor este următoarea:

- $X_{int,d}$ și $X_{int,h}$ – reactanța internă a sursei, calculată pe secvență directă, respectiv homopolară;
- $X_{i,d}$ și $X_{i,h}$ – reactanța de intrare a circuitului din aval de locul nesimetriei longitudinale, calculată pe secvență directă, respectiv homopolară, în condițiile neglijării reactanței de magnetizare;
- $X_{1,d}$ și $X_{1,h}$ – reactanțe echivalente ce pot fi calculate cu relațiile (41).

Pentru schema din fig. 10, reactanțele de intrare se calculează cu relații de forma

$$\begin{cases} X_{i,d} = X_1 + X_2 + X_{il,d} = X_1 + X_2 - Z_{0,d} \cdot ctg\beta_d l \\ X_{i,h} = X_1 + X_2 + X_{il,h} = X_1 + X_2 - Z_{0,h} \cdot ctg\beta_h l \end{cases}, \quad (53)$$

al treilea termen reprezentând reactanța de intrare a liniei. În acest exemplu, linia funcționează în gol, orice altă situație putând fi tratată în conformitate cu § 1.2.1.

În condițiile în care tensiunea electromotoare echivalentă și reactanța echivalentă au fost calculate, tensiunea care determină solicitarea izolației principale a transformatorului (U_{m1}) nu poate fi determinată decât dacă este cunoscută caracteristica de magnetizare a acestuia,

$$U_{m1} = f(I_{m1}). \quad (54)$$

Firmele constructoare de transformatoare dau caracteristicile de magnetizare ale acestora în unități relative, tensiunea U_{m1} fiind raportată la valoarea efectivă a tensiunii nominale de fază (E), iar curentul I_{m1} la curentul nominal al transformatorului (I_n):

$$U_{m1}^* = \frac{U_{m1}}{E}; \quad I_{m1}^* = \frac{I_{m1}}{I_n}; \quad I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{S_n}{3 \cdot E}. \quad (55)$$

Dacă termenii ecuației (48) se raportează la tensiunea de fază E , pentru determinarea solicitării izolației principale a transformatorului trebuie rezolvat sistemul de ecuații

$$\begin{cases} U_{m1}^* = \pm \frac{E_{ech}}{E} + X_{ech} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} \cdot I_{m1}^* \\ U_{m1}^* = f(I_{m1}^*) \end{cases} \quad (56)$$

Ecuația caracteristicii de magnetizare fiind una nelineară, sistemul de ecuații (56) se poate rezolva printr-o metodă grafică, așa cum se poate observa din fig. 11.

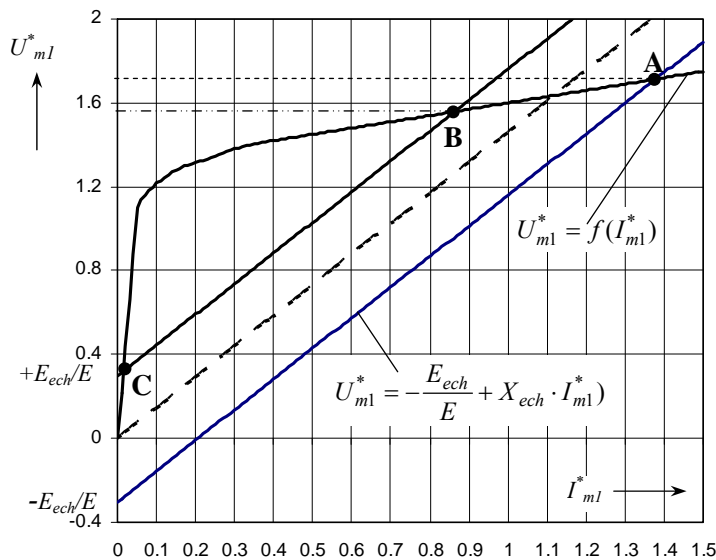


Fig. 11. Rezolvarea grafo-analitică a sistemului de ecuații (56), pentru determinarea nivelului supratensiunilor de ferorezonanță

Soluțiile sistemului de ecuații sunt marcate, în fig. 11, cu **A**, **B** și **C**. Așa cum se poate observa, cea mai mare valoare a supratensiunii corespunde soluției de regim capacitiv (**A**). Soluția corespunzătoare punctului (**B**) nu este luată în considerare, din considerente de ordin matematic, iar soluția (**C**), corespunzătoare regimului inductiv, nu reprezintă, de fapt, o supratensiune.

Ca și în cazul supratensiunilor datorate nesimetriilor transversale sau al supratensiunilor de rezonanță datorate nesimetriilor longitudinale, poate fi calculat nivelul supratensiunii și în orice alt nod al rețelei analizate, chiar dacă calculele sunt relativ complexe. Totuși, nu se justifică, întotdeauna, efectuarea unor astfel de calcule, fiind suficientă determinarea tensiunii pe izolația transformatorului, nivelul de ținere al acesteia fiind semnificativ mai mic decât nivelul de ținere al izolatoarelor liniilor aeriene.

Supratensiuni datorate nesimetriilor transversale

Producerea scurtcircuitelor nesimetrice pe liniile rețelelor de transport a energiei electrice generează supracurenți și supratensiuni periculos de mari. Supratensiunile tranzitorii generate de producerea defectului și de deconectarea liniilor cu defect au o componentă de 50 Hz care, în anumite condiții, poate deveni inadmisibil de mare. Chiar dacă aceste regimuri sunt de scurtă durată, amplitudinea componentei de pe armonica fundamentală poate fi calculată ca o supratensiune temporară (de regim permanent).

Manevra de deconectare a unei linii nu este efectuată simultan de întrerupătoarele de la extremitățile acesteia, astfel încât, pentru un anumit interval de timp, fazele (faza) sănătoase funcționează în gol, sumându-se creșterea de tensiune dată de efectul capacitiv cu aceea dată de funcționarea într-o schemă nesimetrică.

Prin utilizarea metodei componentelor simetrice, se obțin relațiile de calcul ale tensiunilor fază-pământ, la locul producerii defectului:

- pentru scurtcircuit monofazat

$$\begin{cases} U_A = 0 \\ \frac{U_{B,C}}{U} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{Z_h}{2Z_d + Z_h} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (24)$$

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

$$\begin{cases} \frac{U_A}{U} = \frac{3Z_h}{Z_d + 2Z_h} \\ U_{B,C} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

În relațiile (24) și (25) semnificația notațiilor este următoarea: U – tensiunea la locul de defect, în regimul imediat anterior producerii acestuia; Z_d , Z_h – impedanțele de secvență directă și homopolară, calculate în raport cu locul nesimetriei.

În rețelele de transport a energiei electrice interesează atât tensiunile la locul producerii defectului, cât și în alte noduri ale rețelei, în special în stațiile de transformare de la extremitățile liniei. Relațiile de calcul ale tensiunilor fază-pământ în orice alt nod al rețelei sunt:

- pentru scurtcircuit monofazat

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{U} = \frac{U'}{U} - \frac{2k_d \cdot Z_d + k_h \cdot Z_h}{2Z_d + Z_h} \\ \frac{U'_{B,C}}{U} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{U'}{U} - \frac{k_h \cdot Z_h - k_d \cdot Z_d}{2Z_d + Z_h} \end{cases} \quad (26)$$

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

$$\begin{cases} \frac{U'_A}{U} = \frac{U'}{U} + \frac{k_h \cdot Z_h - k_d \cdot Z_d}{Z_d + 2Z_h} \\ \frac{U'_{B,C}}{U} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{U'}{U} + \frac{k_h \cdot Z_h + 0,5k_d \cdot Z_d}{Z_d + 2Z_h} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot k_d \end{cases} \quad (27)$$

În relațiile (26) și (27) semnificația noilor notații este următoarea: \underline{U}' – tensiunea în punctul de calcul ales, în regimul imediat anterior producerii defectului; k_d și k_h – coeficienți de raportare a tensiunii din punctul de calcul și a tensiunii de la locul de defect, calculați pe secvență directă și homopolară.

Deoarece liniile electrice lungi se înlocuiesc prin scheme echivalente cu parametri uniform distribuiți, relațiile de calcul ale impedanțelor echivalente de secvență directă și homopolară, precum și acelea ale coeficienților de raportare se determină pornind de la ecuațiile liniilor lungi. Astfel, impedanța echivalentă poartă denumirea de *impedanță de scurtcircuit* și se calculează similar unei impedanțe de intrare, însă în condițiile în care defectul este considerat ca fiind sursa din schema echivalentă. De exemplu, pentru schema monofilară din fig. 5,a, schema electrică echivalentă pentru calculul impedanței de scurtcircuit, în cazul producerii defectului la sfârșitul liniei, este aceea din fig. 7.

Pentru a păstra forma ecuațiilor liniilor lungi, în schema echivalentă s-au notat tensiunile și curenții de la extremitățile liniei invers decât în schema echivalentă prezentată în fig. 5,b, în raport cu extremitățile liniei.

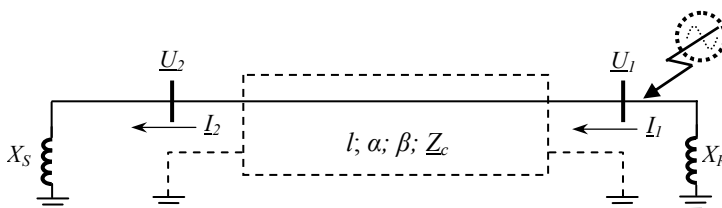


Fig. 7. Schema electrică echivalentă pentru calculul impedanței de scurtcircuit, în cazul producerii defectului la sfârșitul liniei

Dacă se neglijează pierderile longitudinale și transversale, iar reactorul de compensare transversală este deconectat, sistemul de ecuații din care se determină relația de calcul a impedanței de scurtcircuit este

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta l \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_S} \end{cases}, \quad (28)$$

relația de calcul a impedanței de scurtcircuit rezultând de forma

$$\underline{Z}_{sc} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = jZ_0 \cdot \operatorname{tg} \left(\beta l + \operatorname{arctg} \frac{X_S}{Z_0} \right). \quad (29)$$

Relația (29) se particularizează pentru cele două secvențe, reactanțele de secvență directă și homopolară calculându-se cu relațiile:

$$\begin{cases} X_d = X_{sc,d} = Z_{0,d} \cdot \operatorname{tg} \left(\beta_d l + \operatorname{arctg} \frac{X_{S,d}}{Z_{0,d}} \right) \\ X_h = X_{sc,h} = Z_{0,h} \cdot \operatorname{tg} \left(\beta_h l + \operatorname{arctg} \frac{X_{S,h}}{Z_{0,h}} \right) \end{cases}. \quad (30)$$

Dacă reactorul de compensare transversală este conectat, atunci curentul \underline{I}_1 are două componente: una care circulă către linie ($\underline{I}_{1,1}$) și una care se închide prin reactanța reactorului de compensare transversală ($\underline{I}_{1,2}$). În sistemul de ecuații (28) cea de a doua ecuație este valabilă pentru ($\underline{I}_{1,1}$), fiind necesare încă două ecuații pentru determinarea impedanței de scurtcircuit. Una dintre ecuații rezultă din aplicarea legii lui Ohm pe circuitul

reactanței X_R , iar cea de-a doua din aplicarea legii a I-a a lui Kirchoff în nodul cu defect. Prin rezolvarea acestui nou sistem de ecuații se obține relația de calcul a impedanței de scurtcircuit, corespunzătoare prezenței reactorului de compensare transversală în nodul cu defect

$$\underline{Z}_{sc} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{jZ_0 \cdot \operatorname{tg}\left(\beta l + \operatorname{arctg}\frac{X_S}{Z_0}\right) \cdot jX_R}{jZ_0 \cdot \operatorname{tg}\left(\beta l + \operatorname{arctg}\frac{X_S}{Z_0}\right) + jX_R} = jZ_0 \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\beta l + \operatorname{arctg}\frac{X_S}{Z_0}\right)}{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{tg}\left(\beta l + \operatorname{arctg}\frac{X_S}{Z_0}\right)}. \quad (31)$$

Din relația (31) se poate observa că noua impedanță de scurtcircuit se obține, așa cum era de așteptat, ca impedanță echivalentă a circuitului format din impedanța de scurtcircuit a liniei fără reactor, dată de relația (29), conectată în paralel cu impedanța reactorului.

Dacă se cunoaște tensiunea de la locul de defect, la un moment de timp imediat anterior producerii acestuia, relațiile de calcul anterioare sunt suficiente pentru determinarea tensiunilor fază-pământ, la locul de defect. Pentru determinarea tensiunilor de la începutul liniei, de exemplu, trebuie calculați coeficienții de raportare corespunzători. Cu notațiile din fig.7 și în ipoteza simplificatoare a neglijării tuturor pierderilor, sistemul de ecuații necesar determinării relației de calcul a coeficienților de raportare este:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_S} \\ k = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \end{cases}. \quad (32)$$

Indiferent dacă este conectat sau deconectat reactorul de compensare transversală, relația de calcul a coeficienților de raportare este

$$k = \frac{1}{\cos \beta l + \frac{Z_0}{X_S} \cdot \sin \beta l}, \quad (33)$$

particularizarea acesteia pentru secvență directă și homopolară conducând la relații de forma:

$$k_d = \frac{1}{\cos \beta_d l + \frac{Z_{0,d}}{X_{S,d}} \cdot \sin \beta_d l}, \text{ respectiv } k_h = \frac{1}{\cos \beta_h l + \frac{Z_{0,h}}{X_{S,h}} \cdot \sin \beta_h l}. \quad (34)$$

Astfel, au fost obținute toate relațiile necesare determinării tensiunilor de la începutul liniei la al cărui sfârșit s-a produs un scurtcircuit nesimetric, în condițiile în care este cunoscută tensiunea (eventual sub forma unui factor de supratensiune) de la începutul liniei, în regimul imediat anterior producerii defectului.

Tema

Să se determine, analitic și numeric, factorii de supratensiune temporară determinați de efectul capacitiv, de nesimetriile transversale și de cele longitudinale, în rețeaua de transport a energiei electrice având schema monofilară de forma celei prezentate în fig. 1. Parametrii elementelor circuitului sunt:

- *Sursele* - toate cele trei surse ale schemei sunt subsisteme electroenergetice, având următoarele puteri de scurtcircuit pe barele de 220 kV ale stațiilor de transformare, prin intermediul cărora se conectează rețeaua analizată la sistemul electroenergetic:

$$S_{sc,1} = 2590 \text{ MVA};$$

$$S_{sc,2} = 2800 \text{ MVA};$$

$$S_{sc,3} = 3500 \text{ MVA}.$$

- *Autotransformatoarele* – toate cele trei autotransformatoare sunt identice, în construcție cu trei înfășurări și conexiune de tip Y_0Y_0d , având următorii parametri:

$U_n = 420/231/34 \text{ kV}$ – înfășurarea 1 fiind înfășurarea cu tensiunea cea mai mare, iar înfășurarea 3 fiind înfășurarea de medie tensiune, având conexiune în triunghi;

$$S_n = 400/400/162 \text{ MVA} \text{ – puterea de } 162 \text{ MVA corespunde celei de a treia înfășurări};$$

$$U_{sc,1-2} = 10,6 \%;$$

$$U_{sc,2-3} = 37 \%;$$

$$U_{sc,3-1} = 47 \%;$$

$$I_{0,\%} = 2,5 \%.$$

- *Reactoarele de compensare transversală* – toate cele trei reactoare de compensare transversală sunt identice, atât în ceea ce privește tensiunea nominală cât și puterea, și au următorii parametri:

$$U_{n,R} = 34 \text{ kV};$$

$$S_{n,R} = 90 \text{ MVA}.$$

- *Liniile electrice* – ambele linii ale rețelei analizate sunt linii electrice aeriene, având tensiunea nominală de 400 kV, realizate pe stâlpi de tip PAS 400, cu două conductoare de OIAI 450 mm² pe fază și conductoare de protecție de tip OIZn 135 mm²; parametrii electrici și cei de propagare, pe unitatea de lungime, sunt dați în tabelul 1, atât pentru secvența directă, cât și pentru aceea homopolară. Lungimile celor două linii sunt:

$$l_1 = 282 \text{ km};$$

$$l_2 = 118 \text{ km}.$$

Tabelul 1. Parametrii electrici și de propagare ai liniilor schemei analizate

Parametrul	Secvență directă	Secvență homopolară
L [mH/km]	1,065	3,3
C [nF/km]	10,1	7,74
R [Ω /km]	0,0323	0,133
Z_0 [Ω]	311	643
β [rad/km]	$10,75 \cdot 10^{-4}$	$15,63 \cdot 10^{-4}$
α [km^{-1}]	$52 \cdot 10^{-6}$	$103,4 \cdot 10^{-6}$

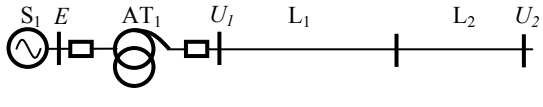
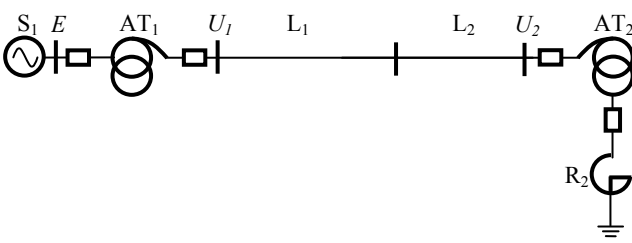
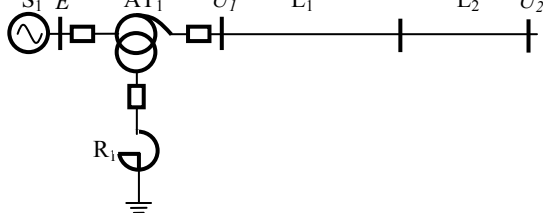
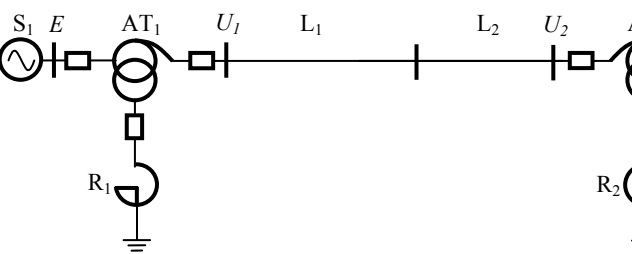
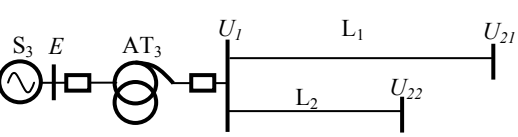
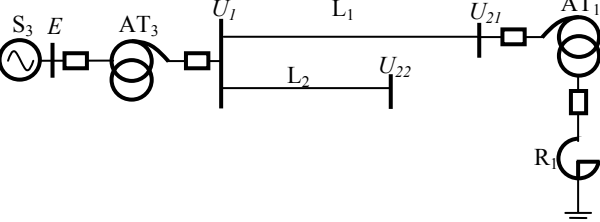
Se neglijează:

- componenta activă a impedanțelor interne ale surselor;
- pierderile în autotransformatoare;
- reactanțele de magnetizare ale autotransformatoarelor;
- pierderile pe liniile electrice aeriene;

- componenta activă a impedențelor reactoarelor de compensare transversală.

Schemele tipice în care se va determina nivelul supratensiunilor datorate efectului capacitiv sunt cele reprezentate în tabelul 2.

Tabelul 2. Scheme tipice pentru studiul efectului capacitiv

Nr crt	Schema monofilară a rețelei (relativ la schema din fig.1)	Factori de supratensiune
1		$\frac{U_2}{U_1}; \frac{U_1}{E} \Rightarrow \frac{U_2}{E}$
2		$\frac{U_2}{U_1}; \frac{U_1}{E} \Rightarrow \frac{U_2}{E}$
3		$\frac{U_2}{U_1}; \frac{U_1}{E} \Rightarrow \frac{U_2}{E}$
4		$\frac{U_2}{U_1}; \frac{U_1}{E} \Rightarrow \frac{U_2}{E}$
5		$\frac{U_{21}}{U_1}; \frac{U_{22}}{U_1}; \frac{U_1}{E} \Rightarrow \frac{U_{21}}{E}; \frac{U_{22}}{E}$
6		$\frac{U_{21}}{U_1}; \frac{U_{22}}{U_1}; \frac{U_1}{E} \Rightarrow \frac{U_{21}}{E}; \frac{U_{22}}{E}$

4		$\frac{U_{A,B,C}}{E}, \frac{U'_{A,B,C}}{E},$ $\frac{U_{2;A,B,C}}{E}$
5		$\frac{U_{A,B,C}}{E}, \frac{U'_{A,B,C}}{E},$ $\frac{U_{22;A,B,C}}{E}$
<p><i>Notă:</i> Factorii de supratensiune datorati producerii nesimetriilor se calculează conform § 1.2.2, în condițiile în care factorii de supratensiune U/E, U'/E, U_2/E și U_{22}/E au fost deja calculați în prima etapă a analizei, în care s-au determinat supratensiunile datorate efectului capacitiv.</p>		

În cazul studiului supratensiunilor datorate nesimetriilor longitudinale se face o analiză doar la nivelul primelor trei scheme monofilare din tabelul 1, în condițiile în care se consideră că nesimetria este generată de întrerupătorul din amonte de autotransformatorul AT₁. Nivelul supratensiunilor generate de fenomenul de ferorezonanță se analizează doar la nivelul primelor două scheme. În acest ultim caz, pentru trasarea caracteristicii de magnetizare se utilizează perechile de valori din tabelul 4.

Tabelul 4. Perechile de valori pentru trasarea caracteristicii de magnetizare

I_{m1}^*	0,00	0,02	0,05	0,10	0,20	0,30	1,30
U_{m1}^*	0,00	1,00	1,10	1,22	1,32	1,38	1,69
<i>Notă:</i> În primul și în ultimul interval, dependența tensiunii de curent se consideră lineară.							

Exemple de calcul

Prima etapă a unei asemenea abordări analitice presupune întocmirea schemelor echivalente corespunzătoare și calculul parametrilor elementelor acestor scheme. Astfel, pentru întreaga schemă monofilară din fig.1 și în ipotezele simplificatoare indicate în enunțul temei (§ 2.1.) se obțin următoarele scheme echivalente:

- *schema de secvență directă*

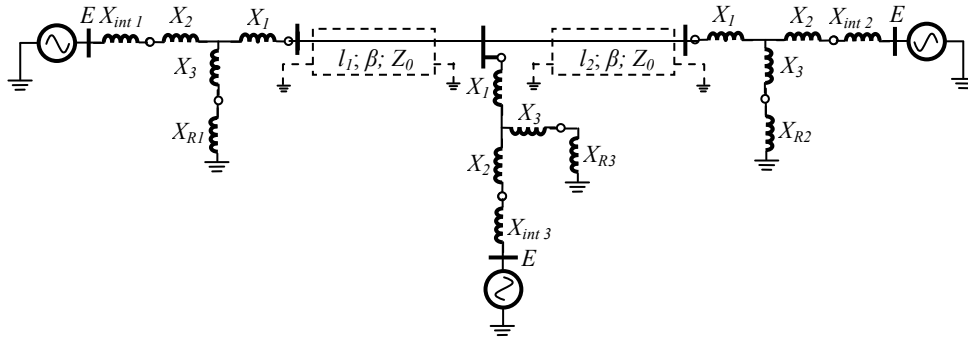


Fig. 12. Schema electrică echivalentă de secvență directă

- *schema de secvență inversă*

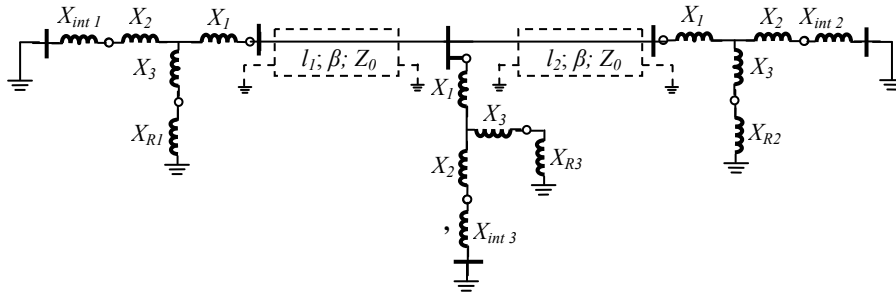


Fig. 13. Schema electrică echivalentă de secvență inversă

- *schema de secvență homopolară*

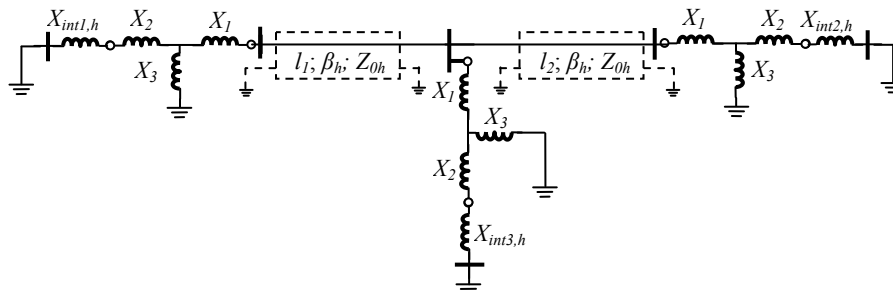


Fig. 14. Schema electrică echivalentă de secvență homopolară

Parametrii schemelor electrice echivalente se calculează conform § 1.1.

Supratensiuni datorate efectului capacitiv

a) Schema 2 din tabelul 2.

Deoarece se analizează un regim simetric, se întocmesc doar scheme echivalente de secvență directă, rezultatele fiind aceleași pentru fiecare dintre cele trei faze ale rețelei. Schema electrică echivalentă corespunzătoare schemei monofilare 2 și ipotezelor simplificatoare enumerate în § 2.1 este dată în fig.15, a – în forma sa completă și în fig.15, b – în forma sa redusă.

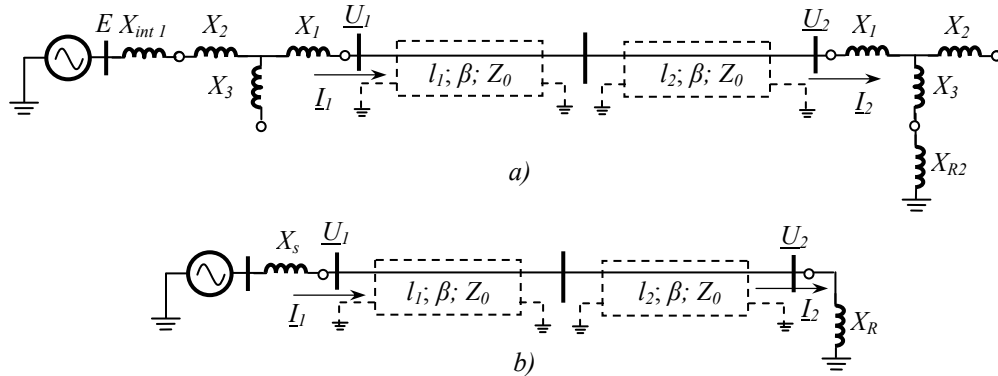


Fig. 15. Schemele echivalente pentru studiul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv – cazul 2 din tabelul 2

În fig. 15,b reactanța sursei (X_s) și reactanța echivalentă a reactorului de compensare transversală (X_R) rezultă prin conectarea în serie a reactanțelor corespunzătoare, astfel:

$$\begin{aligned} X_s &= X_{int1} + X_2 + X_1 \\ X_R &= X_{R2} + X_3 + X_1 \end{aligned} \quad (57)$$

Toate reactanțele din relația (57) se determină conform § 1.1, totuși, pentru a da și un exemplu numeric, se consideră următoarele valori:

$$\begin{aligned} X_s &= 115 \, \Omega, \\ X_R &= 2400 \, \Omega. \end{aligned}$$

Așa cum s-a arătat în § 1.2.1, pentru a determina creșterea absolută a tensiunii de fază de la sfârșitul liniei se determină creșterea relativă a tensiunii pe linie și creșterea absolută a tensiunii de la începutul liniei.

Pentru determinarea creșterii relative a tensiunii pe linie se utilizează prima ecuație din sistemul celor două ecuații ale liniilor lungi și o ecuație ce rezultă din aplicarea legii lui Ohm pe circuitul reactorului de compensare transversală, rezultând sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + Z_0 \underline{I}_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{jX_R} \end{cases} \quad (58)$$

în care lungimea $l = l_1 + l_2 = 400$ km.

Creșterea relativă a tensiunii pe linie este

$$k_1 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l + \frac{Z_0}{X_R} \sin \beta l} = \frac{1}{\cos 0,43 + \frac{311}{2400} \cdot \sin 0,43} = 1,038. \quad (59)$$

Creșterea absolută a tensiunii de fază de la începutul liniei se determină utilizând o schemă echivalentă omogenă, cu parametri concentrați, rezultată prin înlocuirea liniei prin impedanța sa de intrare, așa cum este schema din fig. 16.

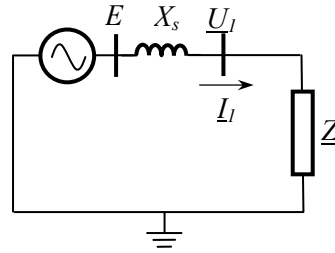


Fig. 16. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

Impedanța de intrare a liniei (Z_i) se determină din următorul sistem de ecuații

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 I_2 \cdot \sin \beta l \\ I_1 = j \frac{U_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l + I_2 \cdot \cos \beta l \\ I_2 = \frac{U_2}{jX_R} \end{cases}, \quad (60)$$

primele două ecuații fiind ecuațiile liniilor lungi fără pierderi, iar cea de a treia rezultă din aplicarea legii lui Ohm pe circuitul reactorului de compensare transversală.

Relația de calcul a impedanței de intrare a liniei rezultă

$$Z_i = \frac{U_1}{I_1} = -jZ_0 \cdot \frac{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{tg} \beta l}{1 - \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{ctg} \beta l} \cdot \operatorname{ctg} \beta l = -jZ'_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta l. \quad (61)$$

Înlocuind datele în relația (61), se obține

$$Z'_0 = Z_0 \cdot \frac{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{tg} \beta l}{1 - \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{ctg} \beta l} = 311 \cdot \frac{1 + \frac{311}{2400} \cdot \operatorname{tg} 0,43}{1 - \frac{311}{2400} \cdot \operatorname{ctg} 0,43} = 459,24 \, \Omega. \quad (62)$$

Sistemul de ecuații care conduce la determinarea raportului dintre tensiunea de la începutul liniei și tensiunea electromotoare a sursei, rezultat prin aplicarea celei de a doua teoreme a lui Kirchhoff și a legii lui Ohm circuitului din fig. 16, este:

$$\begin{cases} E = jX_s I_1 + U_1 \\ I_1 = \frac{U_1}{Z_i} \end{cases}. \quad (63)$$

Relația de calcul a creșterii tensiunii la începutul liniei rezultă de forma

$$k_2 = \left| \frac{U_1}{E} \right| = \frac{1}{1 - \frac{X_s}{Z'_0} \cdot \operatorname{tg} \beta l} = \frac{1}{1 - \frac{115}{459,24} \cdot \operatorname{tg} 0,43} = 1,13. \quad (64)$$

Creșterea absolută a tensiunii de la sfârșitul liniei rezultă

$$k = \frac{U_2}{E} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_1}{E} = k_1 \cdot k_2 = 1,038 \cdot 1,13 = 1,173. \quad (65)$$

Creșterea tensiunii cu numai 17,3 % este rezultatul prezenței reactorului de compensare transversală la capătul deconectat al liniei. Puterea reactorului nu este astfel dimensionată încât să se realizeze o compensare completă a curentului capacitiv al liniei, fără însă a se obține o creștere periculoasă a tensiunii pe linie.

b) Schema 3 din tabelul 2.

Schema electrică echivalentă corespunzătoare schemei monofilare 3 și ipotezelor simplificatoare enumerate în § 2.1 este dată în fig. 17, în care s-a notat cu X_s reactanța echivalentă obținută prin conectarea în serie a reactanțelor X_{int1} și X_2 .

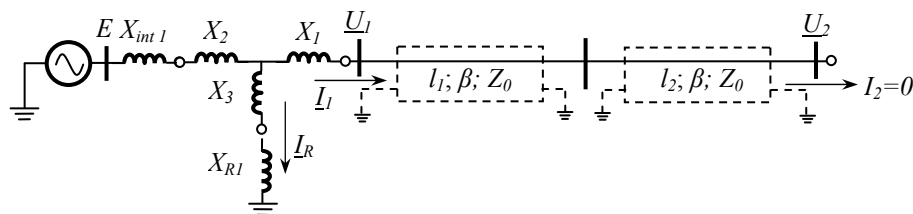


Fig. 17. Schemele echivalente pentru studiul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv – cazul 3 din tabelul 2

Reactanțele din schema echivalentă se determină conform § 1.1. Fără a folosi datele de intrare prezentate în § 2.1, valori rezonabile pentru aceste reactanțe sunt:

$$X_s = 70 \Omega,$$

$$X_l = 45 \Omega,$$

$$X_R = 2350 \Omega.$$

Pentru determinarea creșterii relative a tensiunii pe linie se utilizează prima ecuație din sistemul celor două ecuații ale liniilor lungi, particularizată pentru $I_2 = 0$:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \cdot \cos \beta l + Z_0 I_2 \cdot \sin \beta l \\ I_2 = 0 \end{cases} \quad (66)$$

în care lungimea $l = l_1 + l_2 = 400$ km.

Creșterea relativă a tensiunii pe linie este

$$k_1 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l} = \frac{1}{\cos 0,43} = 1,10. \quad (67)$$

Creșterea absolută a tensiunii de fază de la începutul liniei se determină utilizând o schemă echivalentă omogenă, cu parametri concentrați, rezultată prin înlocuirea liniei prin impedanța sa de intrare, așa cum este schema din fig. 18.

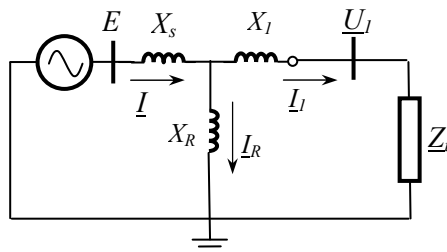


Fig. 18. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

Impedanța de intrare a liniei (\underline{Z}_i) se determină din sistemul de ecuații ale liniilor lungi, particularizate pentru $I_2 = 0$:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \beta l + jZ_0 I_2 \cdot \sin \beta l \\ \underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin \beta l + \underline{I}_2 \cdot \cos \beta l \\ \underline{I}_2 = 0 \end{cases}, \quad (68)$$

rezultând

$$\underline{Z}_i = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = -jZ_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta l. \quad (69)$$

Odată cunoscută relația de calcul pentru impedanța de intrare a liniei, se poate rezolva circuitul din fig.18, în sensul determinării raportului U_1/E . Pentru aceasta, poate fi scris următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{E} = jX_S \underline{I} + jX_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ jX_R \underline{I}_R = jX_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ \underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_1 \\ \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_i} = \frac{\underline{U}_1}{-jZ_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta l} \end{cases}. \quad (70)$$

Prin soluționarea sistemului de ecuații (70), fără a introduce în calcule formula impedanței de intrare, se obține

$$E = \underline{U}_1 \cdot \left[1 + \frac{X_S}{X_R} + \frac{j}{Z_i} \cdot \left(X_1 + \frac{X_1 X_S}{X_R} + X_S \right) \right]. \quad (71)$$

Pentru cazul liniei în gol, a cărei impedanță de intrare este dată de relația (69), creșterea tensiunii la începutul liniei este dată de relația

$$k_2 = \frac{\underline{U}_1}{E} = \frac{1}{1 + \frac{X_S}{X_R} - \frac{\operatorname{tg} \beta l}{Z_0} \cdot \left(X_S + X_1 + \frac{X_S X_1}{X_R} \right)}. \quad (72)$$

Înlocuind datele de intrare în relația (72) se obține factorul de supratensiune

$$k_2 = \frac{1}{1 + \frac{70}{2350} - \frac{\operatorname{tg} 0,43}{311} \cdot \left(70 + 45 + \frac{70 \cdot 45}{2350} \right)} = 1,165 \quad (73)$$

Creșterea absolută a tensiunii de la sfârșitul liniei rezultă

$$k = \frac{\underline{U}_2}{E} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \cdot \frac{\underline{U}_1}{E} = k_1 \cdot k_2 = 1,1 \cdot 1,165 = 1,281. \quad (74)$$

Prezența reactorului de compensare la începutul liniei nu are influență asupra creșterii relative a tensiunii pe linie, însă determină reducerea nivelului tensiunii la începutul liniei.

c) Schema 6 din tabelul 2.

Schema electrică echivalentă corespunzătoare schemei monofilare 6 și ipotezelor simplificatoare enumerate în § 2.1 este dată în fig. 19,a – pentru schema echivalentă completă și în fig. 19,b – pentru schema redusă rezultată prin înlocuirea reactanțelor cu reactanțele echivalente ale circuitelor corespunzătoare.

În fig.19,b reactanța sursei (X_S) și reactanța echivalentă a reactorului de compensare transversală (X_R) rezultă prin conectarea în serie a reactanțelor corespunzătoare, astfel:

$$\begin{aligned} X_S &= X_{int3} + X_2 + X_1 \\ X_R &= X_{R1} + X_3 + X_1 \end{aligned} \quad (75)$$

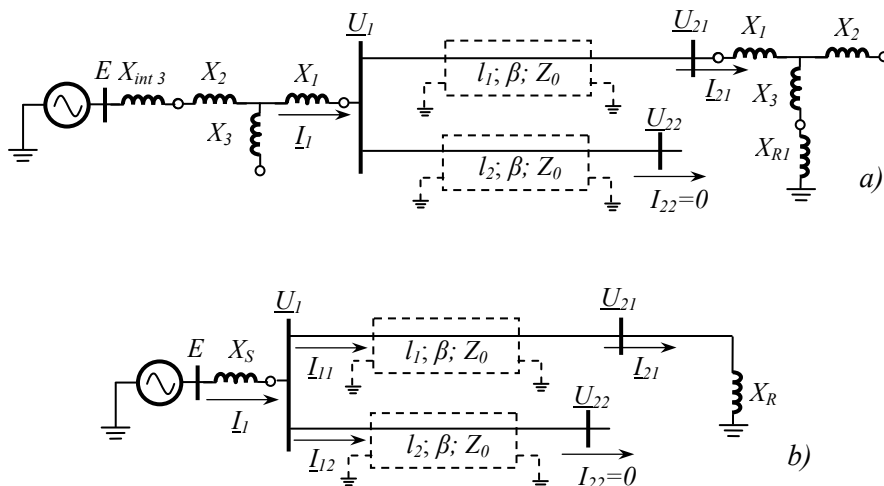


Fig. 19. Schemele echivalente pentru studiul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv – cazul 6 din tabelul 2

Reactanțele din schema echivalentă se determină conform § 1.1. Fără a folosi datele de intrare prezentate în § 2.1, valori rezonabile pentru aceste reactanțe sunt:

$$\begin{aligned} X_S &= 100 \Omega, \\ X_R &= 2400 \Omega. \end{aligned}$$

Spre deosebire de exemplele prezentate anterior, în acest caz sunt conectate două linii lungi la barele aceleiași stații de transformare. În consecință, într-o primă etapă a analizei, trebuie determinată creșterea relativă a tensiunii pe fiecare dintre cele două linii.

Pentru determinarea creșterii relative a tensiunii pe linia L_1 , la al cărui sfârșit se află conectat un reactor de compensare transversală, se utilizează prima ecuație din sistemul celor două ecuații ale liniilor lungi și o ecuație ce rezultă din aplicarea legii lui Ohm pe circuitul reactorului de compensare transversală:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_{21} \cdot \cos \beta l_1 + Z_0 \underline{I}_{21} \cdot \sin \beta l_1 \\ \underline{I}_{21} = \frac{\underline{U}_{21}}{jX_R} \end{cases} \quad (76)$$

Creșterea relativă a tensiunii pe linie este

$$k_{11} = \frac{U_{21}}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l_1 + \frac{Z_0}{X_R} \sin \beta l_1} = \frac{1}{\cos 0,3 + \frac{311}{2400} \cdot \sin 0,3} = 1,006 \quad (77)$$

Pentru determinarea creșterii relative a tensiunii pe linia L_2 , aflată în gol, se utilizează prima ecuație din sistemul celor două ecuații ale liniilor lungi, particularizată pentru o valoare nulă a intensității curentului la sfârșitul ei $I_{22} = 0$:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_{22} \cdot \cos \beta l_2 + Z_0 \underline{I}_{22} \cdot \sin \beta l_2 \\ \underline{I}_{22} = 0 \end{cases} \quad (78)$$

Creșterea relativă a tensiunii pe linia L_2 este

$$k_{12} = \frac{U_{22}}{U_1} = \frac{1}{\cos \beta l_2} = \frac{1}{\cos 0,13} = 1,008. \quad (79)$$

Creșterea absolută a tensiunii de fază de la începutul liniei se determină utilizând o schemă echivalentă omogenă, cu parametri concentrați, rezultată prin înlocuirea celor două linii prin impedanțele lor intrare, așa cum rezultă din schema prezentată în fig. 20.

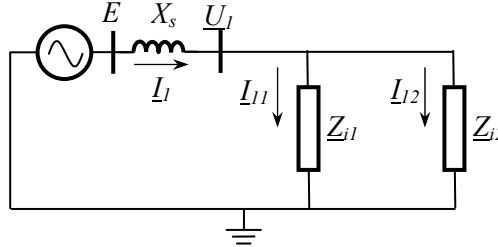


Fig. 20. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

Pentru a putea rezolva circuitul omogen din fig.20, trebuie determinate, pentru început, impedanțele de intrare ale fiecăreia dintre cele două linii.

Impedanța de intrare a liniei L_1 (Z_{i1}) se determină din următorul sistem de ecuații

$$\begin{cases} U_1 = U_{21} \cdot \cos \beta l_1 + jZ_0 I_{21} \cdot \sin \beta l_1 \\ I_{11} = j \frac{U_{21}}{Z_0} \cdot \sin \beta l_1 + I_{21} \cdot \cos \beta l_1 \\ I_{21} = \frac{U_{21}}{jX_R} \end{cases}, \quad (80)$$

primele două ecuații fiind ecuațiile liniilor lungi, fără pierderi, iar cea de a treia rezultă din aplicarea legii lui Ohm pe circuitul reactorului de compensare transversală.

Relația de calcul a impedanței de intrare a liniei rezultă

$$Z_i = \frac{U_1}{I_{11}} = -jZ_0 \cdot \frac{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{tg} \beta l_1}{1 - \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{ctg} \beta l_1} \cdot \operatorname{ctg} \beta l_1 = -jZ'_{01} \cdot \operatorname{ctg} \beta l_1. \quad (81)$$

Înlocuind datele în relația (81), se obține valoarea impedanței echivalente

$$Z'_{01} = Z_0 \cdot \frac{1 + \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{tg} \beta l_1}{1 - \frac{Z_0}{X_R} \cdot \operatorname{ctg} \beta l_1} = 311 \cdot \frac{1 + \frac{311}{2400} \cdot \operatorname{tg} 0,3}{1 - \frac{311}{2400} \cdot \operatorname{ctg} 0,3} = 556,65 \Omega. \quad (82)$$

Impedanța de intrare a liniei L_2 (Z_{i2}) se determină din sistemul de ecuații ale liniilor lungi, particularizate pentru $I_{22} = 0$:

$$\begin{cases} U_1 = U_{22} \cdot \cos \beta l_2 + jZ_0 I_{22} \cdot \sin \beta l_2 \\ I_{12} = j \frac{U_{22}}{Z_0} \cdot \sin \beta l_2 + I_{22} \cdot \cos \beta l_2 \\ I_{22} = 0 \end{cases}, \quad (83)$$

rezultând

$$\underline{Z}_{i2} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_{12}} = -jZ_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta l_2. \quad (84)$$

Odată determinate relațiile de calcul ale impedanțelor de intrare ale celor două linii, circuitul din fig. 20 poate fi rezolvat în sensul obținerii relației dintre tensiunea U_1 și tensiunea electromotoare a sursei. Astfel, poate fi scris următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{E} = jX_S \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} \\ \underline{I}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{i1}} = \frac{\underline{U}_1}{-jZ'_{01} \cdot \operatorname{ctg} \beta l_1} \\ \underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{i2}} = \frac{\underline{U}_1}{-jZ_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta l_2} \end{cases} \quad (85)$$

Prin rezolvarea sistemului de ecuații (85) se obține creșterea absolută a tensiunii pe barele stației la care sunt conectate cele două linii:

$$k_2 = \frac{\underline{U}_1}{E} = \frac{1}{1 - X_S \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \beta l_1}{Z'_{01}} + \frac{\operatorname{tg} \beta l_2}{Z_0} \right)}. \quad (86)$$

Înlocuind datele de intrare în relația (86) se obține factorul de supratensiune pe barele stației

$$k_2 = \frac{\underline{U}_1}{E} = \frac{1}{1 - 100 \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} 0,3}{556,65} + \frac{\operatorname{tg} 0,13}{311} \right)} = 1,108 \quad (87)$$

Creșterea absolută a tensiunii de la sfârșitul liniei \mathbf{L}_1 rezultă

$$k_{L1} = \frac{U_{21}}{E} = \frac{U_{21}}{U_1} \cdot \frac{U_1}{E} = k_{11} \cdot k_2 = 1,006 \cdot 1,108 = 1,114, \quad (88)$$

iar la sfârșitul liniei \mathbf{L}_2

$$k_{L2} = \frac{U_{22}}{E} = \frac{U_{22}}{U_1} \cdot \frac{U_1}{E} = k_{12} \cdot k_2 = 1,008 \cdot 1,108 = 1,117. \quad (89)$$

Prezența reactorului de compensare transversală la sfârșitul liniei \mathbf{L}_1 face ca nivelul supratensiunii la sfârșitul acestei linii să fie, practic, egal cu acela de la sfârșitul liniei \mathbf{L}_1 , în condițiile în care lungimea primei linii este de 2,4 ori mai mare decât a celei de a doua. Creșterea relativă a tensiunii pe linii este nesemnificativă, în cazul primei linii datorită prezenței reactorului, iar în cazul celei de a doua linii datorită lungimii sale reduse.

Creșterea tensiunii la începutul liniilor este practic aceeași cu cazul în care la barele stației este conectată o singură linie, având lungimea egală cu suma lungimilor celor două linii și în condițiile în care la linie este conectat un reactor de compensare transversală de aceeași putere.

Supratensiuni de rezonanță datorate nesimetriilor longitudinale

Așa cum s-a putut observa, determinarea nivelului supratensiunilor temporare de rezonanță la producerea nesimetriilor longitudinale pe liniile de transport a energiei electrice presupune, în principal, determinarea relațiilor de calcul ale impedanțelor de intrare în raport cu locul nesimetriei și ale coeficienților de raportare. Ulterior, 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.

Odată cunoscute valorile impedanțelor de intrare și ale coeficienților de raportare, precum și valorile tensiunilor la locul defectului și în punctele de calcul alese, pot fi calculați factorii de supratensiune corespunzători. Valorile tensiunilor din regimul anterior producerii defectului rezultă din analiza efectuată în cazul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv (§ 2.2.1).

În cazul supratensiunilor de rezonanță se dă un exemplu de abordare analitică doar pentru cazul în care există reactor de compensare transversală la începutul liniei (cazul 3 din tabelul 2).

Schemele echivalente, pentru secvența directă și homopolară sunt cele prezentate în fig. 28, parametrii acestor scheme putând fi calculați conform § 1.1.

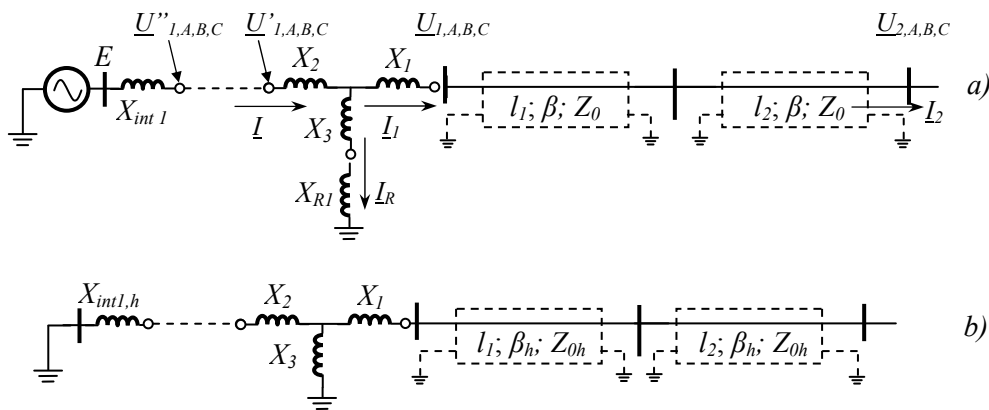


Fig. 28. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 3 din tabelul 2: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

În fig. 28,a, s-a notat cu $U''_{1,A,B,C}$ tensiunile de fază din amonte de locul nesimetriei, cu $U'_{1,A,B,C}$ tensiunile de fază din aval de locul nesimetriei, cu $U_{1,A,B,C}$ tensiunile de fază de la începutul liniei, iar cu $U_{2,A,B,C}$ tensiunile de la sfârșitul acesteia.

Impedanța de intrare a circuitului, în raport cu locul întreruperii, se determină ca raport între tensiunea și curentul din acest punct. Astfel, cu notațiile din fig. 28,a, impedanța de intrare este dată de relația

$$\underline{Z}_i = \frac{U'_1}{I}. \quad (139)$$

Pentru determinarea relației de calcul a impedanței de intrare linia se înlocuiește prin propria sa impedanță de intrare, definită ca raport între tensiunea și curentul de la începutul acesteia

$$\underline{Z}_{il} = \frac{U_1}{I_1}, \quad (140)$$

iar în schema omogenă, cu parametri concentrați, astfel obținută se determină \underline{Z}_i .

În ipotezele simplificatoare din § 2.1 și în condițiile neglijării reactanței de magnetizare a autotransformatorului schema omogenă este aceea redată în fig. 29.

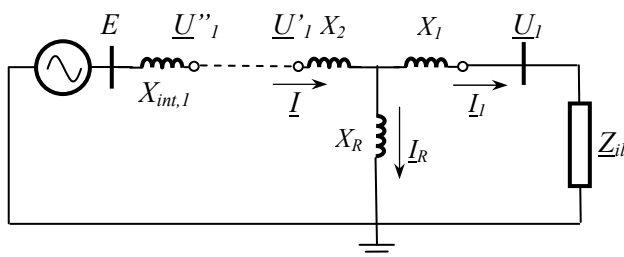


Fig. 29. Schemele electrică omogenă pentru calculul impedanței de intrare

Reactanța X_R este reactanța echivalentă a circuitului reactorului

$$X_R = X_3 + X_{R1}, \quad (141)$$

iar impedanța de intrare a liniei se calculează așa cum s-a arătat în § 2.2.1, în cazul liniei aflate în gol impedanța de intrare a acesteia calculându-se cu relația

$$\underline{Z}_{il} = \frac{U_1}{I_1} = -jZ_0 \cdot \text{ctg} \beta(l_1 + l_2). \quad (142)$$

Din fig. 29 rezultă foarte evident că impedanța de intrare în raport cu locul întreruperii se poate calcula ca o impedanță echivalentă obținută prin conectarea în serie și în paralel a mai multor elemente de circuit. În acest fel, nu mai este necesar să se rezolve circuitul, în sensul determinării raportului dintre tensiunea U'_1 și curentul I_1 . Relația de calcul a impedanței de intrare rezultă de forma

$$\underline{Z}_i = jX_2 + \frac{jX_R \cdot [jX_1 - jZ_0 \cdot \text{ctg} \beta(l_1 + l_2)]}{jX_R + jX_1 - jZ_0 \cdot \text{ctg} \beta(l_1 + l_2)}. \quad (143)$$

Valorile reactanțelor din schemele prezentate în figurile 28 și 29 se determină conform celor prezentate în § 1.1, pentru datele de intrare din § 2.1. Pentru a da un exemplu numeric, pot fi utilizate o serie de valori, precum:

$$\begin{aligned} X_{int,d} &= 68 \, \Omega, & X_{int,h} &= 71,5 \, \Omega; \\ X_{R,d} &= 1380 \, \Omega, & X_{R,h} &= 399 \, \Omega; \\ X_1 &= 45 \, \Omega, & X_2 &= 1,3 \, \Omega; \\ Z_{0,d} &= 311 \, \Omega, & Z_{0,h} &= 643 \, \Omega; \\ \beta_d (l_1 + l_2) &= 0,43 \, \text{rad}, & \beta_h (l_1 + l_2) &= 0,625 \, \text{rad}. \end{aligned}$$

Relația (143) se particularizează pe cele două secvențe, rezultând:

$$\begin{cases} X_{i,d} = X_2 + \frac{X_{R,d} \cdot [X_1 - Z_{0,d} \cdot \text{ctg} \beta_d (l_1 + l_2)]}{X_{R,d} + X_1 - Z_{0,d} \cdot \text{ctg} \beta_d (l_1 + l_2)} \\ X_{i,h} = X_2 + \frac{X_{R,h} \cdot [X_1 - Z_{0,h} \cdot \text{ctg} \beta_h (l_1 + l_2)]}{X_{R,h} + X_1 - Z_{0,h} \cdot \text{ctg} \beta_h (l_1 + l_2)} \end{cases} \quad (144)$$

În relațiile (144) se înlocuiesc valorile parametrilor circuitelor, obținându-se

$$\begin{cases} X_{i,d} = 1,3 + \frac{1380 \cdot (45 - 311 \cdot \text{ctg} 0,43)}{1380 + 45 - 311 \cdot \text{ctg} 0,43} = -1168 \, \Omega \\ X_{i,h} = 1,3 + \frac{399 \cdot (45 - 643 \cdot \text{ctg} 0,625)}{399 + 45 - 643 \cdot \text{ctg} 0,625} = 759 \, \Omega \end{cases} \quad (145)$$

Pentru a determina tensiunile la locul nesimetriei, mai este necesar să se calculeze reactanțele echivalente date de relația (41), astfel:

$$\begin{cases} X_{1,d} = X_{int,d} + X_{i,d} = 68 - 1168 = -1100 \, \Omega \\ X_{1,h} = X_{int,h} + X_{i,h} = 71,5 + 759 = 830,5 \, \Omega \end{cases} \quad (146)$$

Odată calculate reactanțele de intrare, pe cele două secvențe, pot fi calculate tensiunile de la locul nesimetriei, în amonte și în aval de aceasta. Relațiile de calcul ale factorilor de supratensiune sunt date în § 1.2.3 – relațiile (35) și (36) pentru întrerupere pe o fază și relațiile (38) și (39) pentru întrerupere pe două faze. Particularizând aceste relații de calcul pentru ipoteza simplificatoare a neglijării pierderilor se obține:

a) *întrerupere pe o fază*

- tensiuni la locul întreruperii, în amonte de aceasta

$$\begin{cases} \frac{U_{1,A}''}{E} = 1 + \frac{X_{int,h} - X_{int,d}}{X_{1d} + 2X_{1h}} \\ \frac{U_{1,B,C}''}{E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{X_{id}}{X_{1d}} + \frac{X_{id} X_{int,h} - X_{int,d} X_{ih}}{X_{1d} \cdot (X_{1d} + 2X_{1h})} \end{cases} \quad (147)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U''_{1,A}}{E} = 1 + \frac{71,5 - 68}{-1100 + 2 \cdot 830,5} = 1,006 \\ \frac{U''_{1,B;C}}{E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \frac{-1168}{-1100} + \frac{-1168 \cdot 71,5 - 68 \cdot 759}{-1100 \cdot (-1100 + 2 \cdot 830,5)} = -0,3121 \mp j \cdot 0,9167 \end{array} \right. ,$$

rezultând factorii de supratensiune:

$$\left\{ \begin{array}{l} k''_A = \frac{U''_{1,A}}{E} = 1,006 \\ k''_{B,C} = \frac{U''_{1,B;C}}{E} = 0,970 \end{array} \right. \quad (148)$$

- tensiuni la locul întreruperii, în aval de aceasta

$$\left\{ \begin{array}{l} k'_A = \frac{U'_{1,A}}{E} = \frac{X_{id} - X_{ih}}{X_{1d} + 2X_{1h}} = \frac{-1168 - 759}{-1100 + 2 \cdot 830,5} = 3,43 \\ k'_{B,C} = \frac{U'_{1,B;C}}{E} = \frac{U''_{1,B;C}}{E} = k''_{B,C} = 0,970 \end{array} \right. \quad (149)$$

b) *întrerupere pe două faze*

- tensiuni la locul întreruperii, în amonte de aceasta

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U''_{1,A}}{E} = \frac{2X_{id} + X_{ih}}{2X_{1d} + X_{1h}} \\ \frac{U''_{1,B;C}}{E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{X_{int,h} - X_{int,d}}{2X_{1d} + X_{1h}} \end{array} \right. ; \quad (150)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U''_{1,A}}{E} = \frac{-2 \cdot 1168 + 759}{-2 \cdot 1100 + 830,5} = 1,15 \\ \frac{U''_{1,B;C}}{E} = \left(-\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{71,5 - 68}{-2 \cdot 1100 + 830,5} = -0,502 \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{array} \right. ,$$

rezultând factorii de supratensiune:

$$\left\{ \begin{array}{l} k''_A = \frac{U''_{1,A}}{E} = 1,15 \\ k''_{B,C} = \frac{U''_{1,B;C}}{E} = 1,001 \end{array} \right. \quad (151)$$

- tensiuni la locul întreruperii, în aval de aceasta

$$\begin{cases} k'_A = \frac{U'_{1,A}}{E} = \frac{U''_{1,A}}{E} = k''_A = 1,15 \\ k'_{B,C} = \frac{U'_{1,B;C}}{E} = \frac{X_{ih} - X_{id}}{2X_{1d} + X_{1h}} = \frac{759 + 1168}{-2 \cdot 1100 + 830,5} = -1,4 \end{cases} \quad (152)$$

În cazul întreruperii pe o singură fază, factorii de supratensiune calculați în amonte de locul nesimetriei sunt, practic, egali cu unitatea, puterea sistemului energetic fiind suficient de mare (la o putere de scurtcircuit $S_{sc,1} = 2590$ MVA) încât să impună nivelul tensiunii într-un astfel de regim. O valoare ceva mai mare se poate înregistra în cazul întreruperii pe două faze, o creștere a tensiunii de 15 % fiind calculată pe faza conectată la sursă.

Supratensiuni ce pot deveni periculoase se pot înregistra însă în aval de locul nesimetriei. Un factor de nesimetrie de 3,43 unități relative sugerează că schema analizată, prin parametrii ei, nu este foarte departe de condiția de rezonanță la întrerupere pe o fază.

Pentru determinarea tensiunilor și în alt nod al rețelei este necesar să se calculeze coeficienții de raportare corespunzători. Pentru o schemă de tipul celei analizate, este de așteptat ca nivelul maxim al supratensiunii să se înregistreze la capătul aflat în gol al liniei lungi, datorită suprapunerii efectelor funcționării temporare într-o schemă nesimetrică și funcționării liniei în gol.

Pentru determinarea relației de calcul a coeficienților de raportare se utilizează sistemul de ecuații

$$\begin{cases} \underline{U}'_1 = jX_2 \underline{I} + jX_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ jX_R \underline{I}_R = jX_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \\ \underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_1 \\ \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_i} = \frac{\underline{U}_1}{-jZ_0 \cdot ctg \beta l} \\ \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta(l_1 + l_2) + jZ_0 \underline{I}_2 \sin \beta(l_1 + l_2) \\ \underline{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (153)$$

care trebuie rezolvat în sensul determinării raportului U_2/U'_1 .

Sistemul de ecuații (153) este scris utilizând notațiile din fig. 28,a și din fig.29, iar prin soluționarea sistemului de ecuații (153) se obține

$$k = \frac{U_2}{U'_1} = \frac{1}{\cos \beta(l_1 + l_2)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_R} - \frac{1}{Z_0} \cdot \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_R} \right) \cdot tg \beta(l_1 + l_2)} \quad (154)$$

Particularizând relația (154) pe cele două secvențe se obține:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_d = \frac{1}{\cos \beta_d(l_1 + l_2)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_{R,d}} - \frac{1}{Z_{0,d}} \cdot \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{R,d}} \right) \cdot \operatorname{tg} \beta_d(l_1 + l_2)} \\ k_h = \frac{1}{\cos \beta_h(l_1 + l_2)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_{R,h}} - \frac{1}{Z_{0,h}} \cdot \left(X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_{R,h}} \right) \cdot \operatorname{tg} \beta_h(l_1 + l_2)} \end{array} \right. , (155)$$

iar prin înlocuirea valorilor numerice rezultă:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_d = \frac{1}{\cos 0,43} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,3}{1380} - \frac{1}{311} \cdot \left(45 + 1,3 + \frac{45 \cdot 1,3}{1380} \right) \cdot \operatorname{tg} 0,43} = 1,180 \\ k_h = \frac{1}{\cos 0,625} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,3}{399} - \frac{1}{643} \cdot \left(45 + 1,3 + \frac{45 \cdot 1,3}{399} \right) \cdot \operatorname{tg} 0,625} = 1,297 \end{array} \right. . (156)$$

Fiind determinate valorile coeficienților de raportare, pot fi calculate tensiunile de fază, la sfârșitul liniei, utilizând relațiile (37) și (40). Forma particulară a acestor relații pentru cazul neglijării pierderilor, precum și modul de înlocuire a datelor de intrare sunt date în continuare:

a) *întrerupere pe o fază*

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_{2,A}}{E} = \frac{k_d X_{id} - k_h X_{ih}}{X_{1d} + 2X_{1h}} \\ \frac{U_{2,B;C}}{E} = -\frac{k_h X_{ih} + 0,5k_d X_{id}}{X_{1d} + 2X_{1h}} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} k_d \frac{X_{id}}{X_{1d}} \end{array} \right. . (157)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_{2,A}}{E} = \frac{1,18 \cdot (-1168) - 1,297 \cdot 759}{-1100 + 2 \cdot 830,5} = -4,2 \\ \frac{U_{2,B;C}}{E} = -\frac{1,297 \cdot 759 + 0,5 \cdot 1,18 \cdot (-1168)}{-1100 + 2 \cdot 830,5} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,18 \cdot \frac{-1168}{-1100} = 0,526 \mp j1,085 \end{array} \right.$$

Rezultă factorii de supratensiune

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_{2,A}}{E} = 4,2 \\ \frac{U_{2,B;C}}{E} = 1,206 \end{array} \right. . (158)$$

Factorii de supratensiune sunt dați în raport cu tensiunea electromotoare a sursei (E) și nu în raport cu tensiunea de la locul nesimetriei, în aval de aceasta (U'), deoarece, în majoritatea situațiilor acestea sunt, practic, egale.

b) întrerupere pe două faze

$$\begin{cases} \frac{U_{2,A}}{E} = \frac{2k_d X_{id} + k_h X_{ih}}{2X_{1d} + X_{1h}} \\ \frac{U_{2,B,C}}{E} = \frac{k_h X_{ih} - k_d X_{id}}{2X_{1d} + X_{1h}} \end{cases} \quad (159)$$

$$\begin{cases} \frac{U_{2,A}}{E} = \frac{2 \cdot 1,18 \cdot (-1168) + 1,297 \cdot 759}{2 \cdot (-1100) + 830,5} = 1,29 \\ \frac{U_{2,B,C}}{E} = \frac{1,297 \cdot 759 - 1,18 \cdot (-1168)}{2 \cdot (-1100) + 830,5} = -1,73 \end{cases} \quad (160)$$

În raport cu valorile factorilor de supratensiune de la începutul liniei, se observă creșterea nivelului supratensiune, fapt explicabil prin manifestarea efectului capacitiv.

Supratensiuni de ferorezonanță datorate nesimetriilor longitudinale

Pentru cazul ferorezonanței, a cărei abordare analitică este prezentată în § 1.2.3, se exemplifică determinarea nivelului supratensiunilor numai pentru situația în care inia este în gol (corespunzătoare cazului 1 din tabelul 2). Schemele de secvență directă și homopolară sunt cele date în fig. 30.

Reactanța de magnetizare nu apare în schema de secvență homopolară, ea fiind șuntată de reactanța de dispersie a înfășurării terțiare, aceasta fiind mai mică decât reactanța de magnetizare.

Pentru rezolvarea sistemului de ecuații (56), pe lângă datele deja cunoscute, trebuie să se calculeze reactanța echivalentă (X_{ech}) și tensiunea electromotoare echivalentă (E_{ech}), dependente de structura schemei și de tipul nesimetriei.

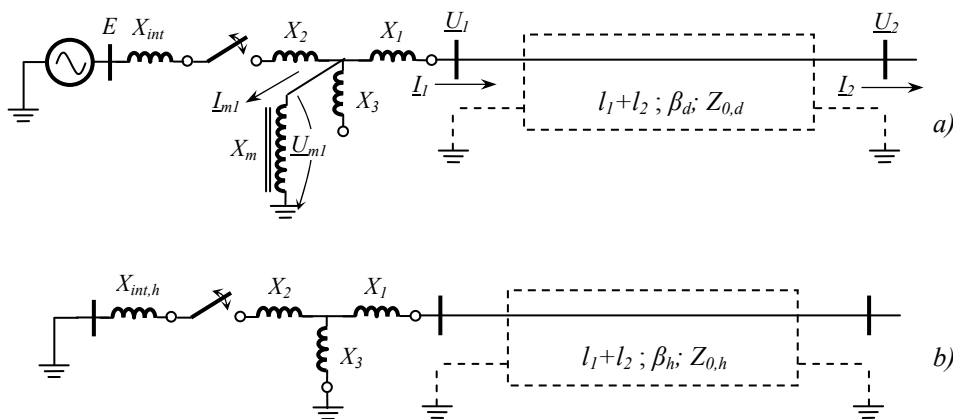


Fig. 30. Schemele electrice echivalente de secvență directă (a) și homopolară (b)

Valorile reactanțelor din schemele prezentate în fig. 30 se determină conform celor prezentate în § 1.1, pentru datele de intrare din § 2.1. Un exemplu numeric poate fi dat pentru următorii parametri ai elementelor rețelei echivalente:

$$\begin{aligned} X_{int,d} &= 68 \, \Omega, & X_{int,h} &= 71,5 \, \Omega; \\ X_1 &= 45 \, \Omega, & X_2 &= 1,3 \, \Omega, & X_3 &= 399 \, \Omega; \\ Z_{0,d} &= 311 \, \Omega, & Z_{0,h} &= 643 \, \Omega; \\ \beta_d (l_1 + l_2) &= 0,43 \, \text{rad}, & \beta_h (l_1 + l_2) &= 0,625 \, \text{rad}. \end{aligned}$$

Relațiile (49) – (52) permit calculul tensiunilor electromotoare echivalente și al reactanțelor echivalente în condițiile în care se cunoaște impedanța de intrare, calculată în raport cu locul nesimetriei.

Pentru schema din fig. 30, reactanțele de intrare se calculează cu relații de forma

$$\begin{cases} X_{i,d} = X_1 + X_2 - Z_{0,d} \cdot \text{ctg} \beta_d (l_1 + l_2) \\ X_{i,h} = X_1 + X_2 - Z_{0,h} \cdot \text{ctg} \beta_h (l_1 + l_2) \end{cases} \quad (161)$$

în care intervine, evident, reactanța de intrare a liniei funcționând în gol, însă nu mai intervine și reactanța X_3 în schema de secvență homopolară.

Prin înlocuirea datelor în relațiile (161) se obține

$$\begin{cases} X_{i,d} = 45 + 1,3 - 311 \cdot \text{ctg} 0,43 = -631,4 \, \Omega \\ X_{i,h} = 45 + 1,3 - 643 \cdot \text{ctg} 0,625 = -844,1 \, \Omega \end{cases} \quad (162)$$

Reactanțele echivalente, care rezultă din sumarea algebrică a impedanțelor de intrare cu impedanța internă a sursei, sunt egale cu:

$$\begin{cases} X_{1,d} = X_{int,d} + X_{i,d} = 68 - 631,4 = -563,4 \, \Omega \\ X_{1,h} = X_{int,h} + X_{i,h} = 71,5 - 844,1 = -772,6 \, \Omega \end{cases} \quad (163)$$

Înlocuind acești parametri în relațiile (49) – (52) rezultă:

a) *întrerupere pe o fază*

$$E_{ech} = -\frac{-844,1 + 631,4}{-563,4 - 2 \cdot 772,6} \cdot E = -0,1 \cdot E, \quad (164)$$

$$X_{ech} = -631,4 + \frac{-844,1 - 631,4}{3} \cdot \left(\frac{-563,4}{2} - \frac{71,5 - 68}{3} \right) = 688 \, \Omega. \quad (165)$$

iar sistemul de ecuații care trebuie rezolvat grafic este

$$\begin{cases} U_{m1}^* = \pm \frac{E_{ech}}{E} + X_{ech} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} \cdot I_{m1}^* = \mp 0,1 + 688 \cdot \frac{400}{420^2} \cdot I_{m1}^* = \mp 0,1 + 1,56 \cdot I_{m1}^* \\ U_{m1}^* = f(I_{m1}^*) \end{cases} \quad (166)$$

b) *întrerupere pe două faze*

$$E_{ech} = -\frac{-844,1 + 631,4}{2 \cdot (-563,4) - 844,1} \cdot E = 0,11 \cdot E, \quad (167)$$

$$X_{ech} = -631,4 + 2 \cdot \frac{\frac{-844,1 + 631,4}{3} \cdot \left(-563,4 - \frac{71,5 - 68}{3} \right)}{\frac{-844,1 + 631,4}{3} - 563,4 - \frac{71,5 - 68}{3}} = 757,4 \, \Omega. \quad (168)$$

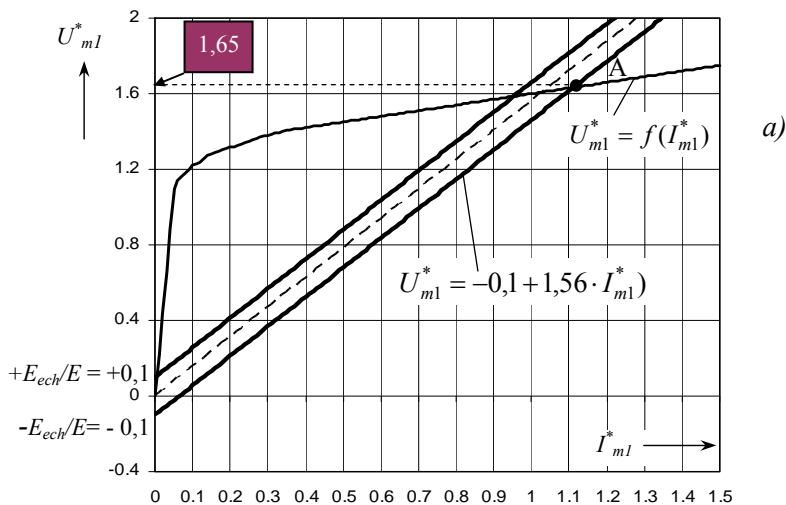
iar sistemul de ecuații care trebuie rezolvat grafic este

$$\begin{cases} U_{m1}^* = \pm \frac{E_{ech}}{E} + X_{ech} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} \cdot I_{m1}^* = \pm 0,11 + 1,72 \cdot I_{m1}^* \\ U_{m1}^* = f(I_{m1}^*) \end{cases} \quad (169)$$

Sistemele de ecuații (166) și (169) se rezolvă pe cale grafică, perechile de valori cu care se poate trasa caracteristica de magnetizare a transformatorului, în unități relative, fiind dată în tabelul 4.

Construcția grafică pentru *întrerupere pe o fază* este dată în fig. 31,a, iar construcția grafică pentru *întrerupere pe două faze* este dată în fig. 31,b.

În ambele desene s-a marcat numai soluția corespunzătoare regimului capacitiv, căreia îi corespund anumite creșteri ale tensiunii.



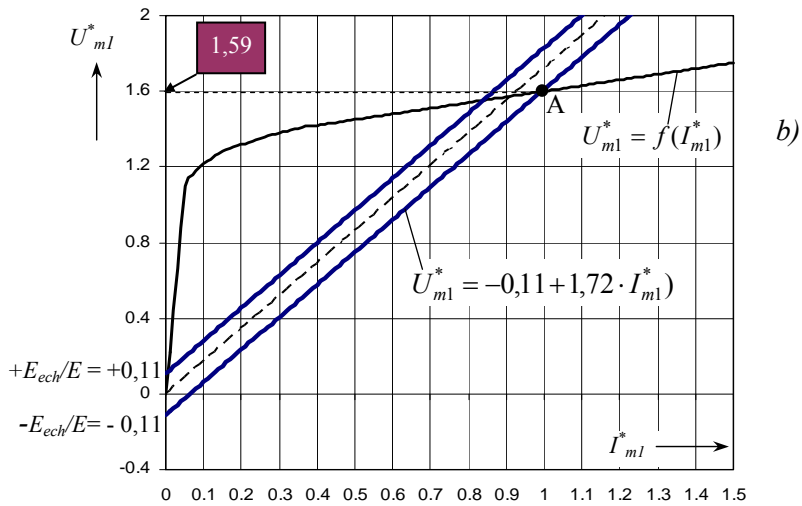


Fig. 31. Rezolvarea grafică a sistemului de ecuații care dă nivelul supratensiunilor de ferorezonanță:

- a) întrerupere pe o fază în schema 1 din tabelul 2;
- b) întrerupere pe două faze în schema 1 din tabelul 2.

Analizând rezultatele obținute, se constată că supratensiunea înregistrată la întrerupere pe o fază este doar cu puțin mai mare decât aceea înregistrată la întrerupere pe două faze, în ambele situații nivelul supratensiunii fiind semnificativ mai mic decât în cazul neglijării fenomenului de saturare a miezului magnetic al autotransformatorului (cazul supratensiunilor de rezonanță).

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.

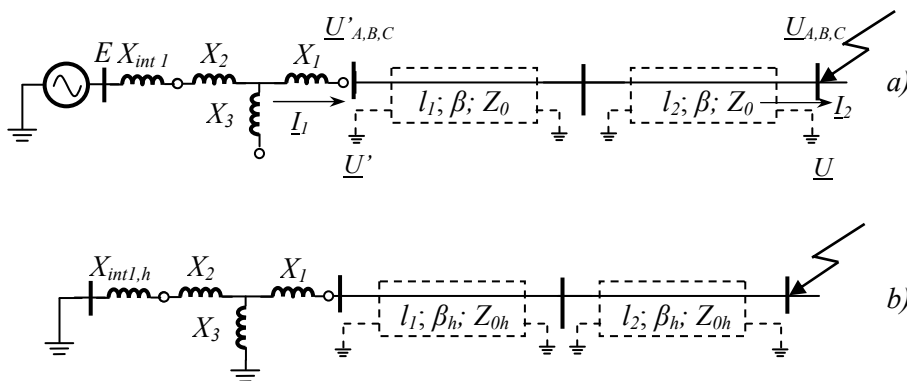


Fig. 21. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 1 din tabelul 3: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

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.

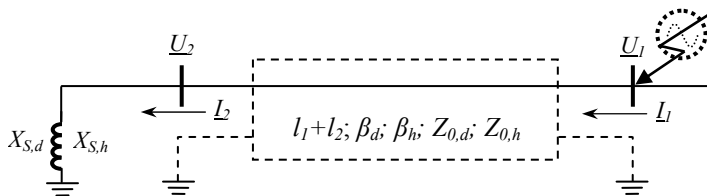


Fig. 22. Schemă echivalentă de calcul a impedanței de scurtcircuit

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.

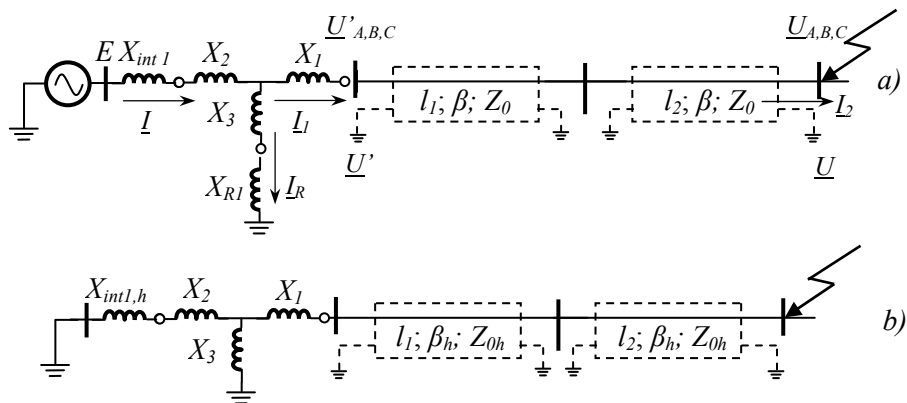


Fig. 23. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 3 din tabelul 3: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

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.

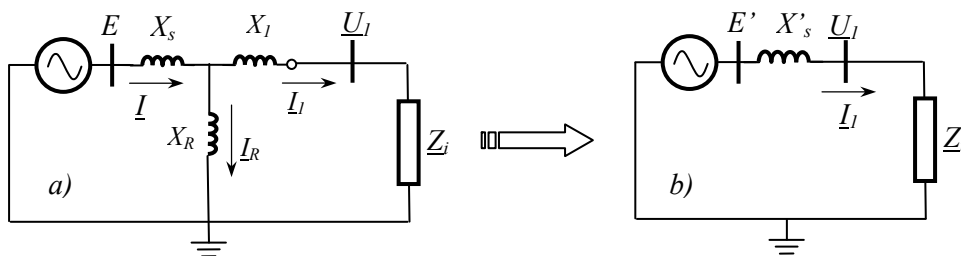


Fig. 24. Schemele electrice ale circuitelor pentru care se face echivalența: a) – circuitul original; b) – circuitul echivalent

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.

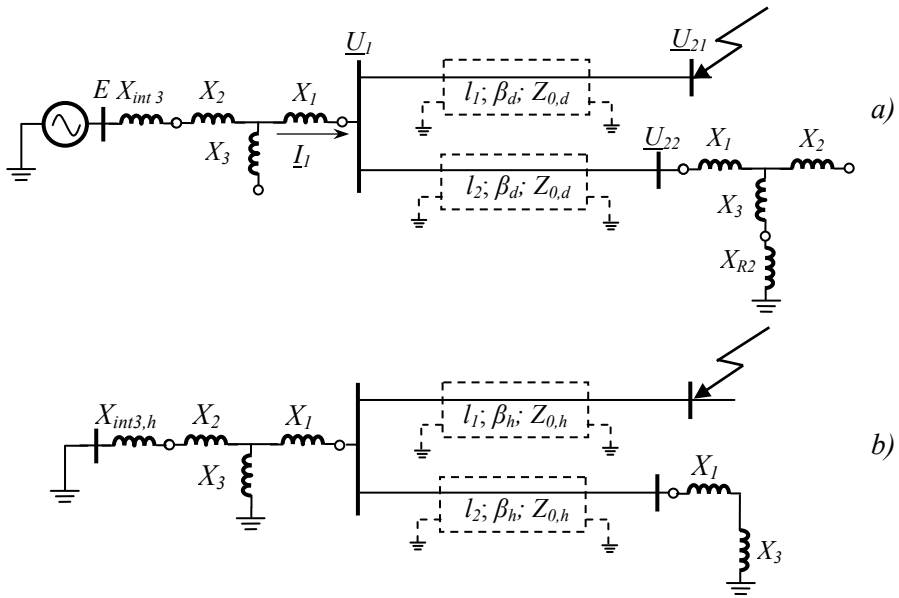


Fig. 25. Schemele electrice echivalente pentru calculul supratensiunilor temporare datorate scurtcircuitelor nesimetrice – cazul 5 din tabelul 3: a) schema de secvență directă; b) schema de secvență homopolară.

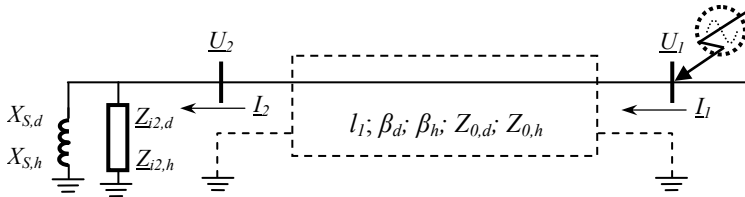


Fig. 26. Schemă echivalentă de calcul a impedanței de scurtcircuit

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:

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

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)

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

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

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

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