

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.

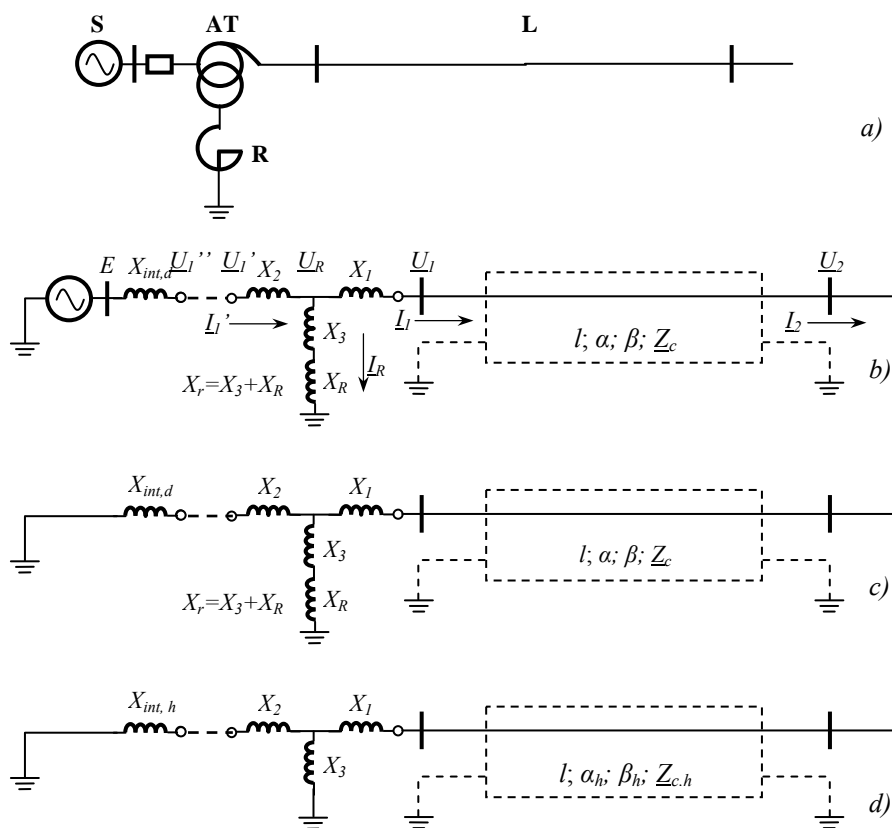


Fig. 8. Schema monofilară (a) și schemele echivalente de secvență directă (b), inversă (c) și homopolară (d) pentru studiul nesimetriilor longitudinale

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

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

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:

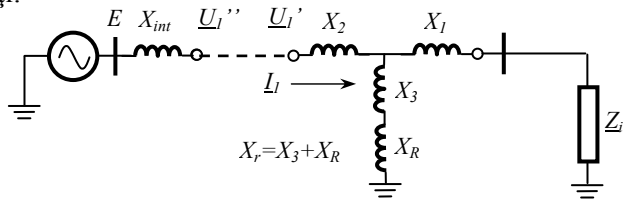


Fig. 9. Schema electrică echivalentă utilizată pentru calculul impedanței de intrare în cazul unei nesimetrie longitudinale determinate de echipamentul de comutație dintr-o schemă bloc transformator-linie (fig.8)

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).

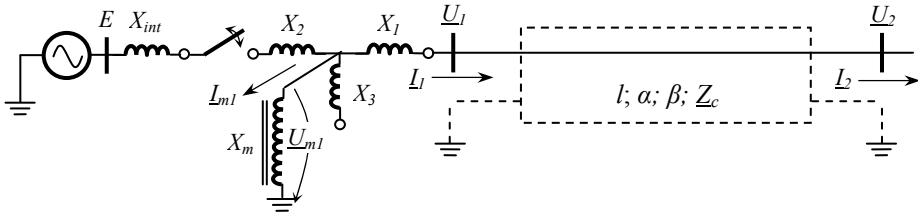


Fig. 10. Schemă electrică echivalentă, de principiu, pentru calculul supratensiunilor de ferorezonanță, la nesimetriei longitudinale.

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.

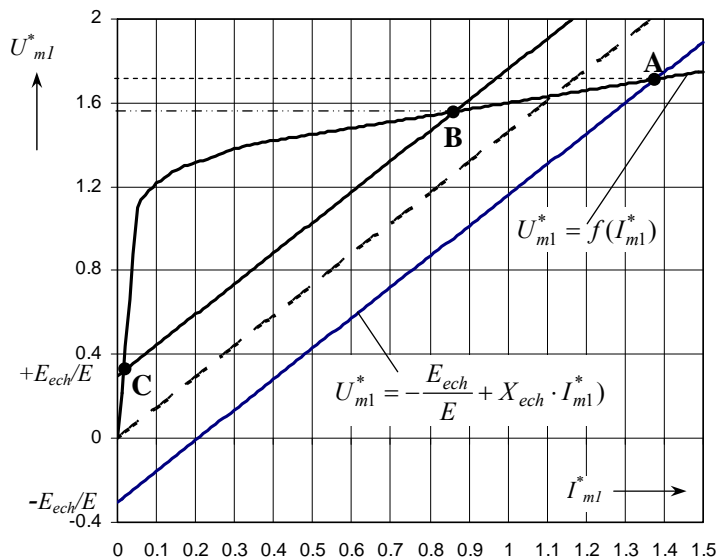


Fig. 11. Rezolvarea grafo-analitică a sistemului de ecuații (56), pentru determinarea nivelului supratensiunilor de ferorezonanță

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.