

## 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.

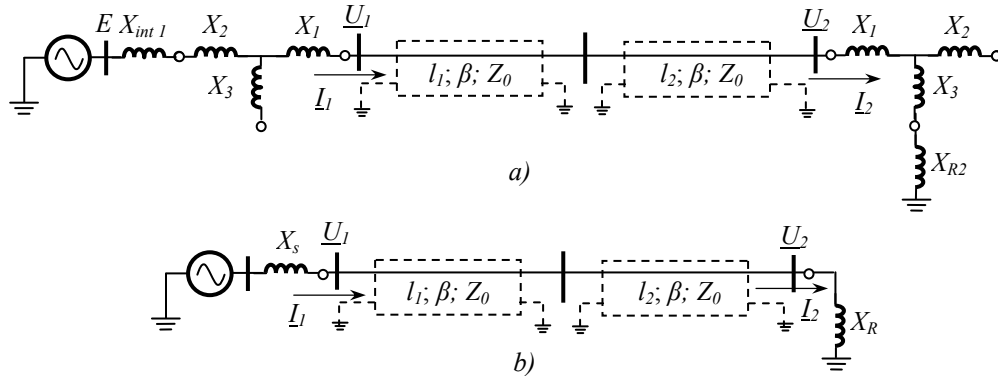


Fig. 15. Schemele echivalente pentru studiul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv – cazul 2 din tabelul 2

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.

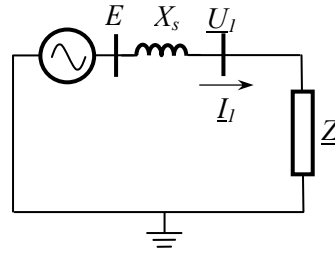


Fig. 16. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

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  $X_2$ .

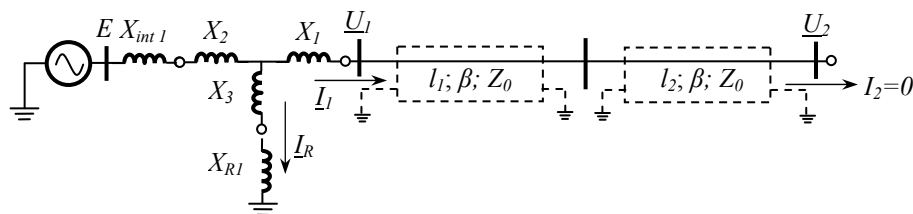


Fig. 17. Schemele echivalente pentru studiul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv – cazul 3 din tabelul 2

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.

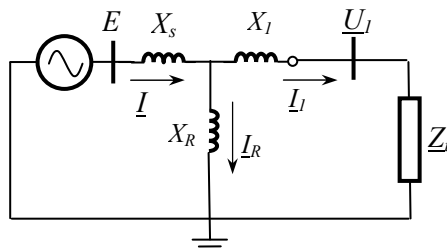


Fig. 18. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

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:

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

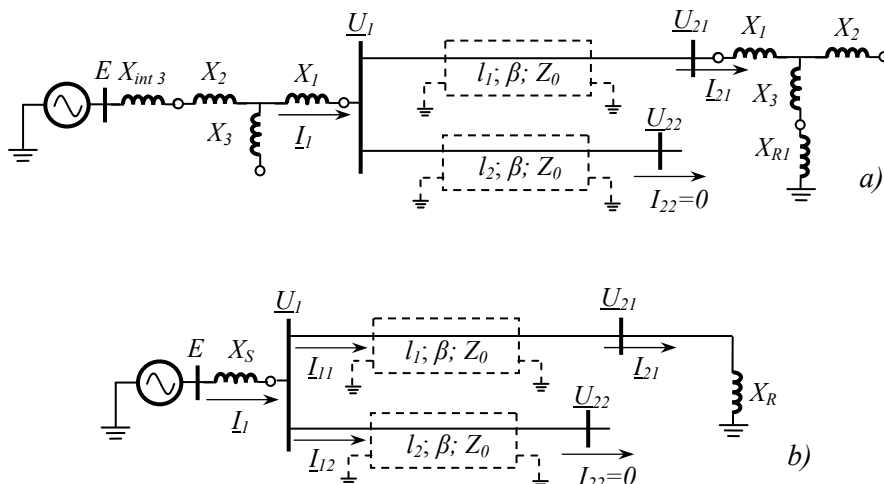


Fig. 19. Schemele echivalente pentru studiul supratensiunilor temporare datorate efectului capacitiv – cazul 6 din tabelul 2

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.

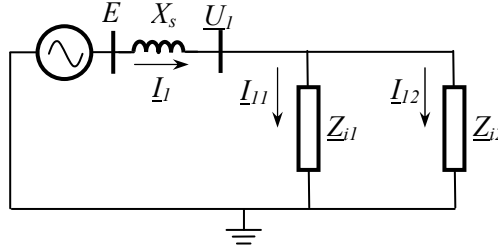


Fig. 20. Schema electrică omogenă utilizată pentru calculul creșterii tensiunii la începutul liniei

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.