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 şi 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 porneşte 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.

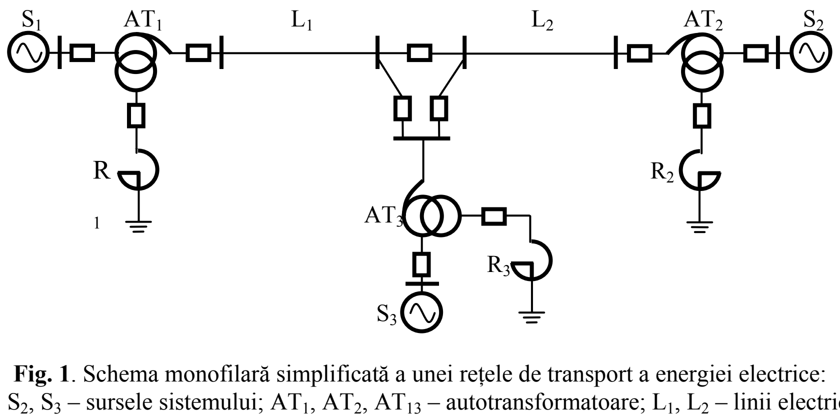

Fig. 1. Schema monofilară simplificată a unei rețele de transport a energiei electrice: S_1, S_2, S_3 – sursele sistemului; AT_1, AT_2, AT_{13} – autotransformatoare; L_1, L_2 – linii electrice; R_1, R_2, R_3 – reactoare de compensare transversală (reactoare şunt).

Pentru întocmirea schemei echivalente a rețelei, fiecare dintre elementele acesteia se înlocuieşte 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 şi longitudinale este necesar să se întocmească şi schemele echivalente de secvență inversă şi 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) şi 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})

$$X_{sc} = \frac{U_m^2}{S_{sc}}; \tag{1}$$

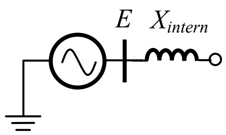

Fig. 2. Schema echivalentă de secvență directă a unei surse

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

În schemele de secvență inversă şi 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, aşa cum există pe armonicele superioare.

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

$$X_{Gi} < X_{Gd} < X_{Gh}. \tag{2}$$

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 şi autotransformatoarele*

Aceste echipamente se pot înlocui prin schemele lor clasice „**T**”, „**Γ**” sau „**Γ**-răsturnat”. Elementele schemei modelează magnetizarea, dispersia, pierderile în cupru şi în fier, raportul de transformare regăsindu-se, implicit, în valorile calculate ale parametrilor schemei echivalente. Toate autotransformatoarele ca şi unele transformatoare care fac parte din reţelele de transport a energiei electrice au trei înfăşurări, întotdeauna existând o înfăşurare 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.

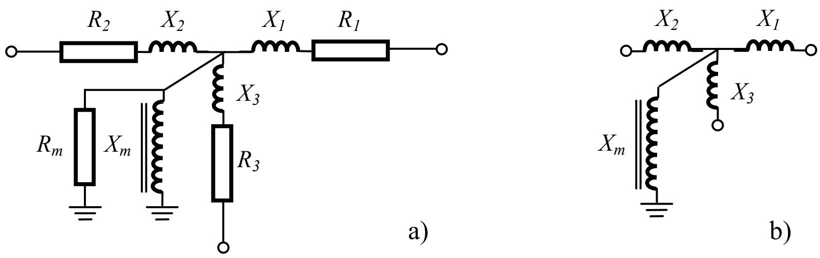

Fig. 3. Schema echivalentă a unui transformator cu trei înfăşurări, pentru cazul în care sunt luate în considerare pierderile – a), respectiv neglijate – b):
R_1, R_2, R_3 – rezistenţe corespunzătoare pierderilor în cuprul înfăşurărilor; R_m – rezistenţa corespunzătoare pierderilor în fier; X_1, X_2, X_3 – reactanţe de dispersie; X_{1m} – reactanţa de magnetizare.

În cazul transformatoarelor mari componenta activă a tensiunii de scurtcircuit este mult mai mică decât componenta reactivă, astfel încât rezistenţele R_1, R_2 şi R_3 pot fi neglijate, în raport cu reactanţele echivalente de dispersie. De asemenea, conductanţa ramurii transversale este mult mai mică decât susceptanţa acesteia, valoarea foarte mare a rezistenţei R_m, în raport cu reactanţa X_m, permiţând neglijarea acesteia. Astfel, datorită puterilor mari ale transformatoarelor şi autotransformatoarelor din reţelele de transport a energiei electrice, se pot utiliza scheme echivalente simplificate, de tipul celor din fig. 3,b. Neglijarea rezistenţelor conduce la rezultate uşor acoperitoare, însă pe deplin acceptabile în calculele inginereşti. 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, impedanţele de scăpări se calculează cu o relaţie de forma

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

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

$$\begin{cases} U_{sc,1} = \dfrac{U_{sc,1-2} + U_{sc,3-1} - U_{sc,2-3}}{2} \\ U_{sc,2} = \dfrac{U_{sc,1-2} + U_{sc,2-3} - U_{sc,3-1}}{2} \\ U_{sc,3} = \dfrac{U_{sc,3-1} + U_{sc,2-3} - U_{sc,1-2}}{2} \end{cases}, \tag{4}$$

în care tensiunile de scurtcircuit $U_{sc,\ 1\text{-}2}$, $U_{sc,\ 2\text{-}3}$ şi $U_{sc,\ 3\text{-}1}$ rezultă din încercările la scurt-circuit efectuate pe grupuri de câte două înfăşurări, a treia rămânând în gol.

Reactanța de magnetizare se calculează cu relația

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

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 aceleaşi valori ale parametrilor. Parametrii schemei de secvență homopolară ai transformatoarelor şi autotransformatoarelor depind de tipul constructiv şi 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 înfăşurări reactanța de magnetizare nu poate fi, întotdeauna, neglijată în calculul reactanței echivalente homopolare, în cazul transformatoarelor cu trei înfăşurări, deoarece acestea au întotdeauna o înfăşurare în triunghi, influența reactanței de magnetizare poate fi neglijată. Funcție de schema de conexiuni, reactanța homopolară se calculează astfel:

- $\mathbf{Y_0YD}$ $\rightarrow X_h = X_1 + X_3$;
- $\mathbf{Y_0Y_0D}$ $\rightarrow X_h = X_1 + X_2$; (6)
- $\mathbf{Y_0DD}$ $\rightarrow X_h = X_1 + \dfrac{X_2 X_3}{X_2 + X_3}$,

X_1, X_2 şi 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 componenţa reţelelor de transport a energiei electrice există, practic, numai linii electrice aeriene, referirile ulterioare vor fi făcute numai la acest tip constructiv de linii.

Funcţie de tipul constructiv al liniei, evident, în strânsă legătură cu tensiunea nominală a acesteia, şi de natura regimului ce urmează a fi analizat există mai multe posibilităţi de înlocuire a unei linii electrice aeriene într-o schemă echivalentă. Astfel, dacă liniile electrice din reţelele de distribuţie pot fi înlocuite prin cuadripoli unici, de tip „**T**” sau „**Π**”, cu elemente concentrate şi parametri nominali (calculaţi prin înmulţirea parametrilor lineici cu lungimea liniei modelate), în cazul liniilor lungi o asemenea modelare conduce la erori inacceptabil de mari. O soluţie de micşorare a erorii poate fi aceea a înlocuirii liniilor lungi prin lanţuri de cuadripoli cu elemente de circuit concentrate şi parametri nominali, fiecare dintre cuadripoli modelând un tronson de linie având lungimea de ordinul a 50 ÷ 100 km. Chiar dacă o asemenea abordare permite determinarea valorilor tensiunilor şi curenţilor în mai multe puncte, schemele echivalente ale reţelelor de transport pot deveni foarte complexe.

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

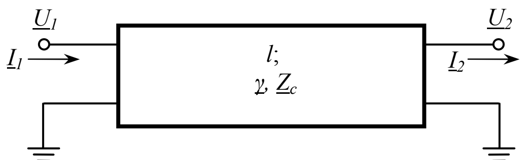

Fig. 4. Schema echivalentă cu parametri uniform distribuiţi a liniilor lungi

Variaţia tensiunii şi curentului, în timp şi de-a lungul liniilor, este descrisă de *ecuaţiile telegrafiştilor*, ecuaţii diferenţiale de ordinul 2 cu derivate parţiale. Deoarece supratensiunile temporare sunt supratensiuni la frecvenţă industrială, în modelele matematice se utilizează *ecuaţiile liniilor lungi*, formă particulară a ecuaţiilor telegrafiştilor, pentru regim armonic staţionar:

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

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

Parametrii de propagare sunt dați de relațiile:

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

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

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

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot ch\underline{\gamma}l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \cdot sh\underline{\gamma}l \\ \underline{I}_1 = \dfrac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \cdot sh\underline{\gamma}l + \underline{I}_2 \cdot ch\underline{\gamma}l \end{cases}. \tag{9}$$

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

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos\beta l + jZ_0 \underline{I}_2 \cdot \sin\beta l \\ \underline{I}_1 = j\dfrac{\underline{U}_2}{Z_0} \cdot \sin\beta l + \underline{I}_2 \cdot \cos\beta l \end{cases}, \tag{10}$$

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:

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

Atunci când tensiunea creşte cu 15 ÷ 20 % peste valoarea de vârf a tensiunii celei mai ridicate a rețelei, se aprinde descărcarea corona. Descărcarea corona determină modificarea parametrilor transversali ai liniei, creşterea capacității şi 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.