Sistemul de mărimi de scurtcircuit este caracterizat de următoarele mărimi

1) tensiunea nominală medie a punctului de scurtcircuit K - $U_{n_{med_K}}$;

2) impedanța de scurtcircuit până în punctul de scurtcircuit K - Z_{sc_K};

$$Z_{sc_K} = \sqrt{X_{\pi\Sigma K}^2 + R_{\pi\Sigma K}^2} \cong X_{\pi\Sigma K}$$

3) Curentul de scurtcircuit în punctul K - I_{sc_K}

Raportând mărimile necunoscute la sistemul de referință nominal va rezulta:

1. $$U_n^* = \frac{U_{n_{med_k}}}{U_{n_{med_g}}} \tag{9.36}$$

2. $$X_n^* = \frac{X_{\pi_{\Sigma K}}}{X_{n_g}} = X_{calcul}^* \tag{9.37}$$

3. $$I_{sc_n}^* = \frac{I_{sc_K}^{(3)}}{I_{n_{\Sigma g}}} \text{ - necunoscut} \tag{9.38}$$

Dar, $$I_{sc_n}^* = \frac{U_n^*}{\sqrt{3}X_n^*} = \frac{U_n^*}{\sqrt{3}X_{calcul}^*} \tag{9.39}$$

Atunci: $$I_{sc_K}^{(3)} = I_{n_{\Sigma g}} \cdot \frac{U_n^*}{\sqrt{3}X_{calcul}^*} \tag{9.40}$$

Apoi $$S_{sc_K}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I_{sc_K}^{(3)} \cdot U_{n_{med_K}} \tag{9.41}$$

$$I_{soc_K}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot K_{soc} \cdot I_{sc_K}^{(3)} \tag{9.42}$$

Scurtcircuitele în funcție de mărimea reactanței de calcul pot fi:

- scurtcircuite apropiate: $X_{calcul}^* \le 0{,}6$;
- scurtcircuite îndepărtate: $X_{calcul}^* \ge 3$;
- pentru $0{,}6 \le X_{calcul}^* \le 3$, este dificil de stabilit dacă scurtcircuitul este depărtat sau apropiat.

Reactanța de calcul poate fi:
- supratranzitorie - pentru primul moment al scurtcircuitului;
- tranzitorie - pe perioada până la stabilizare;
- staționară - pentru regimul permanent de scurtcircuit.

La scurtcircuitele apropiate valoarea mărimilor de scurtcircuit depinde de timpul la care se consideră scurtcircuitul:
- timpul 0;
- timpul ∞;
- timpul de acționare al protecțiilor.

La scurtcircuitele îndepărtate reactanța generatoarelor este neglijabil de mică în raport cu reactanța echivalentă a celorlalte elemente care compun sistemul. În cazul scurtcircuitelor îndepărtate, mărimile de scurtcircuit nu variază nici în raport cu locul de scurtcircuit și nici în raport cu timpul.

Pentru scurtcircuitele îndepărtate se consideră că nu se cunosc generatoarele sistemului. Pentru aceste circuite se folosesc:
- metoda mărimilor absolute;
- metoda mărimilor raportate la mărimi de bază.

9.2.3. Calculul mărimilor de scurtcircuit folosind drept sistem de referință sistemul de bază

Prin sistem de bază se înțelege orice sistem de mărimi similare cu cele ale sistemului de calcul, arbitrar ales.

Mărimile de bază sunt:

1) Tensiunea de bază (U_b)

Se recomandă să se aleagă ca tensiune de bază:
- tensiunea nominală medie a generatoarelor dacă aceasta se cunoaște, $U_{n_{med_g}}$;
- tensiunea medie a punctului de scurtcircuit $U_{n_{med_K}}$;

În practică se alege de obicei $U_b = U_{n_{med_K}}$.

2) Puterea de bază (S_b)

Se recomandă să se aleagă:
- puterea nominală a generatorului dacă aceasta se cunoaște, $S_{n_{\Sigma g}}$;
- puterea de scurtcircuit în punctul K, dacă aceasta se cunoaște, S_{sc_K};
- putere de repere a echipamentelor montate în punctul K, S_r.

Dacă nu se cunoaște nici una din cele 3, se alege $S_b \geq S_{sc_{max}}$.

$S_{sc_{max}}$ =puterea de scurtcircuit maximă a sistemului;

S_b și U_b trebuie să fie numere întregi.

Se pot calcula apoi:

- reactanța de bază: $X_b = \dfrac{U_b^2}{S_b} \cong Z_b$ (9.43)
- curentul de bază: $I_b = \dfrac{S_b}{\sqrt{3}U_b}$ (9.44)

Se vor calcula apoi pentru fiecare element al schemei echivalente a sistemului reactanțele relative, raportate la sistemul de bază.

$X_g^* = \dfrac{X_d[\%]}{100} \cdot \dfrac{S_b}{S_{n_g}}$ - pentru generator; (9.45)

$X_S^* = \dfrac{S_b}{S_{sc_S}}$; S_{sc_S} = puterea de scurtcircuit a sistemului (pentru sistem) (9.46)

$X_T^* = \dfrac{u_{sc}[\%]}{100} \cdot \dfrac{S_b}{S_{NT}}$ - pentru transformator; (9.47)

$X_l^* = X_0 \cdot l \cdot \dfrac{S_b}{U_{n_l}^2}$ - pentru linie. (9.48)

Se calculează apoi reactanța echivalentă a sistemului considerat, X_{echiv}^*, raportată, prin realizarea transfigurărilor, serie, paralel, stea-triunghi etc.

Ex: transfigurarea stea-triunghi

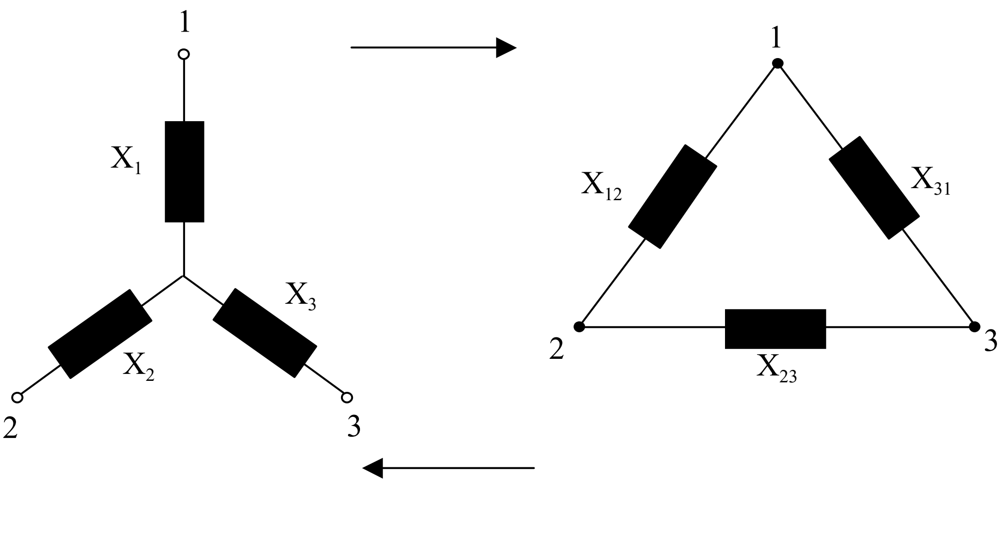

Fig.9.9. Schema transfigurării stea-triunghi

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3} \tag{9.49}$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1} \tag{9.50}$$

$$X_{31} = X_3 + X_1 + \frac{X_3 \cdot X_1}{X_2} \tag{9.51}$$

$$X_1 = \frac{X_{12} \cdot X_{31}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}} \tag{9.52}$$

$$X_2 = \frac{X_{12} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}} \tag{9.53}$$

$$X_3 = \frac{X_{23} \cdot X_{31}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}} \tag{9.54}$$

Se calculează apoi mărimile de scurtcircuit în punctul K considerat.

$$I^{(3)}_{sc_K} = \frac{I_b}{X^*_{echiv}} \tag{9.55}$$

$$S^{(3)}_{sc_K} = \sqrt{3} \cdot I^{(3)}_{sc_K} \cdot U_{n_{med_K}} \tag{9.56}$$

$$I^{(3)}_{soc} = \sqrt{2} \cdot I_{sc_K} \cdot K_{soc} \tag{9.57}$$

Pentru a se vedea care din metode se folosește se stabilește mai întâi reactanța de calcul și se vede dacă scurtcircuitul este îndepărtat sau apropiat.

Pentru scurtcircuite îndepărtate se folosesc:

- metoda mărimilor absolute;
- metoda mărimilor raportate la sistemul de bază.

Pentru scurtcircuite apropiate se folosesc:

- metoda mărimilor absolute;
- metoda mărimilor raportate la sistemul nominal de mărimi,
- metoda grafo-analitică.

9.2.4. Metoda grafo-analitică

Această metodă presupune cunoscute curbele de variație ale curentului de scurtcircuit, raportat la curentul nominal total al generatoarelor din cadrul sistemului în raport cu timpul și locul scurtcircuitului.

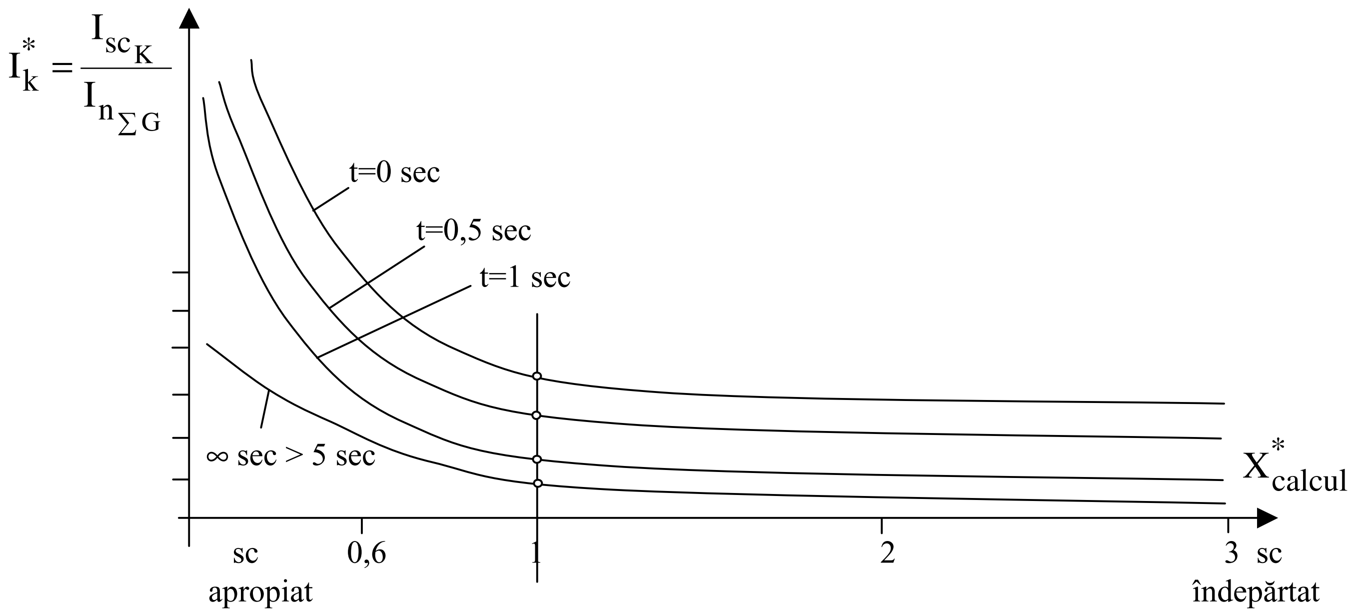

Fig.9.10. Curbele curentului de scurtcircuit raportat la curentul nominat total al generatoarelor

Cu ajutorul acestor nomograme se poate determina I_K^* pentru o valoare a lui X^*_{calc}.

Ca timp se adoptă de obicei timpul de stabilitate termică a echipamentelor de comutație sau timpul de acționare al protecțiilor. Metodele prezentate se referă la cazul scurtcircuitelor trifazate care sunt considerate simetrice. Pentru calculul circuitelor asimetrice se folosește metoda componentelor simetrice.

9.3. CALCULUL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT FOLOSIND METODA COMPONENTELOR SIMETRICE

Deoarece cele mai frecvente scurtcircuite întâlnite în rețelele electrice sunt nesimetrice, pentru calculul exact al valorilor curenților de scurtcircuit este necesar să se folosească metoda componentelor simetrice.

În cazul scurtcircuitelor nesimetrice, impedanțele pe faze nu mai sunt egale. Acestui sistem nesimetric de impedanțe i se aplică un sistem simetric de tensiuni electromotoare produs de generatoarele centralelor electrice, iar în rețea va rezulta un sistem nesimetric (dezechilibrat) de curenți.

Orice sistem trifazat de mărimi (curenți, tensiuni, fluxuri magnetice) nesimetric se poate descompune în trei sisteme trifazate simetrice independente de secvență directă, inversă și homopolară.

Cele trei sisteme se deosebesc între ele prin succesiunea fazelor.

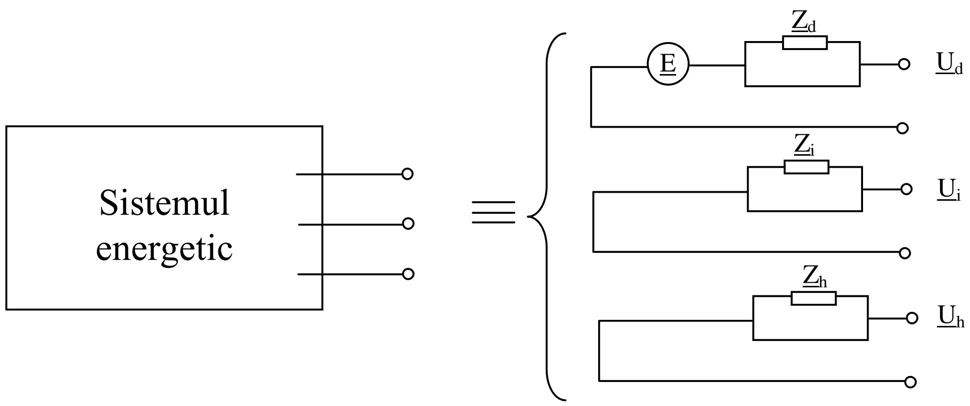

Fig.9.11. Schema echivalentă a unui sistem energetic

Pentru orice sistem nesimetric de tensiuni sau curenți se pot scrie următoarele relații:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i \qquad \underline{U}_R = \underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i$$
$$\underline{I}_S = \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i \qquad \underline{U}_S = \underline{U}_h + a^2\underline{U}_d + a\underline{U}_i \qquad (9.58)$$
$$\underline{I}_T = \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i \qquad \underline{U}_T = \underline{U}_h + a\underline{U}_d + a^2\underline{U}_i$$

Relațiile de transformare inversă:

$$\underline{I}_h = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T\right) \qquad \underline{U}_h = \frac{1}{3}\left(\underline{U}_R + \underline{U}_S + \underline{U}_T\right)$$
$$\underline{I}_d = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_R + a\underline{I}_S + a^2\underline{I}_T\right) \qquad \underline{U}_d = \frac{1}{3}\left(\underline{U}_R + a\underline{U}_S + a^2\underline{U}_T\right) \qquad (9.59)$$
$$\underline{I}_i = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_R + a^2\underline{I}_S + a\underline{I}_T\right) \qquad \underline{U}_i = \frac{1}{3}\left(\underline{U}_R + a^2\underline{U}_S + a\underline{U}_T\right)$$

Grafic transformarea arată astfel:

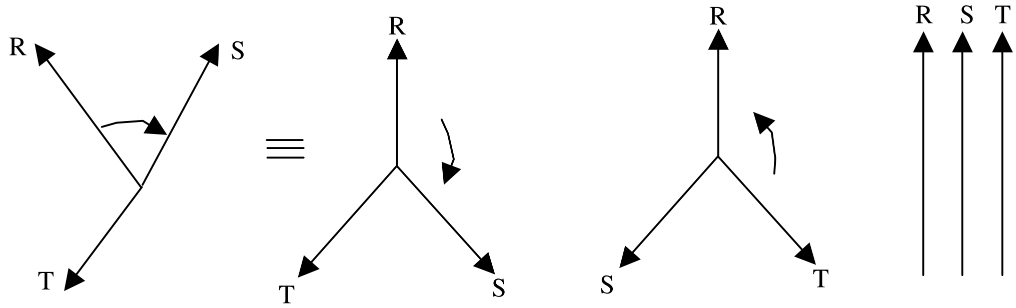

Fig.9.12. Transformarea sistemului asimetric în trei sisteme simetrice

Relațiile prezentate reprezintă ecuațiile de transformare liniară între componentele de secvență și fază ale curenților și tensiunilor, în care a este operatorul de rotire în sens trigonometric și are expresia:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{9.60}$$

Alte relații ale operatorului a sunt:

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{9.61}$$

$$a^3=1 \tag{9.62}$$

$$a^4 = a^3 \cdot a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{9.63}$$

$$a^2+a+1=0 \tag{9.64}$$

Utilizarea metodei componentelor simetrice simplifică analiza proceselor nesimetrice, deoarece componentele simetrice ale curenților sunt legate prin legea lui Ohm numai de componentele de tensiune de aceeași succesiune.

Cunoscând impedanțele proprii $\underline{Z}_d$, $\underline{Z}_i$ și $\underline{Z}_h$ ale unui element de rețea, se pot calcula componentele simetrice ale căderilor de tensiune de la o sursă până la locul de scurtcircuit pe acest element.

$$\begin{aligned} \underline{U}_d &= \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \\ \underline{U}_i &= \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \\ \underline{U}_h &= \underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h \end{aligned} \tag{9.65}$$

Pe baza schemei echivalente a sistemului prezentată se pot scrie pentru orice scurtcircuit nesimetric, ecuațiile tensiunilor pentru fiecare succesiune (componentele simetrice ale tensiunilor) la locul de scurtcircuit:

$$\begin{aligned} \underline{U}_d &= \underline{E} - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \\ \underline{U}_i &= 0 - \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \\ \underline{U}_h &= 0 - \underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h \end{aligned} \tag{9.66}$$

unde $\underline{E}$ este tensiunea electromotoare rezultantă a surselor (generatoarelor) în raport cu locul de scurtcircuit.

Cu ajutorul componentelor se pot calcula valorile curenților de scurtcircuit, pentru toate tipurile de scurtcircuite.

9.3.1. Scurtcircuit monofazat

Pentru simplificare se consideră că legătura la pământ are rezistență zero.

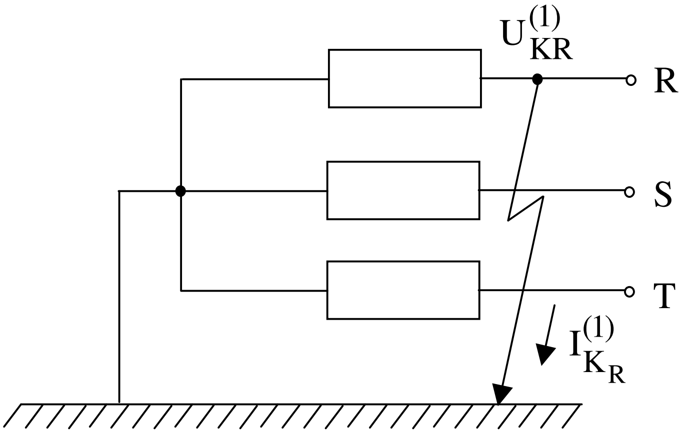

Fig.9.12. Scurtcircuit monofazat

- Se consideră cunoscute impedanțele echivalente în raport cu punctul de scurtcircuit de secvență directă, inversă și homopolară.
- Se calculează valorile curenților de secvență directă inversă și homopolară.
- Se calculează apoi valorile curenților de scurtcircuit pe fazele rețelei.

Condițiile inițiale:

1. $\underline{I}_{K_S}^{(1)} = \underline{I}_{K_T}^{(1)} = 0$ (9.67)
2. $\underline{U}_{K_R}^{(1)} = 0$ (9.68)

1. Folosim prima condiție inițială.

Descompunem curenții de scurtcircuit $\underline{I}_{K_S}^{(1)}$ și $\underline{I}_{K_T}^{(1)}$ în componentele simetrice.

$$\underline{I}_{K_S}^{(1)} = \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i \tag{9.69}$$

$$\underline{I}_{K_T}^{(1)} = \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i \tag{9.70}$$

Adunăm cei doi curenți $\underline{I}_{K_S}^{(1)}$ și $\underline{I}_{K_T}^{(1)}$ (9.71)

$$\underline{I}_{K_S}^{(1)} + \underline{I}_{K_T}^{(1)} = 0 \tag{9.72}$$

$$\underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i + \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i = 0 \tag{9.73}$$

$$2\underline{I}_h + \underline{I}_d \underbrace{(a^2 + a)}_{-1} + \underline{I}_i \underbrace{(a^2 + a)}_{-1} = 0 \tag{9.74}$$

$$2\underline{I}_h - \underline{I}_d - \underline{I}_i = 0 \tag{9.75}$$

Scădem cei doi curenți $\underline{I}_{K_S}^{(1)}$ și $\underline{I}_{K_T}^{(1)}$:

$$\underline{I}_{K_S}^{(1)} - \underline{I}_{K_T}^{(1)} = 0 \tag{9.76}$$

$$\cancel{\underline{I}_h} + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i - \cancel{\underline{I}_h} - a\underline{I}_d - a^2\underline{I}_i = 0 \tag{9.77}$$

$$\underline{I}_d(a^2 - a) - \underline{I}_i(a^2 - a) = 0 /: (a^2\text{-}a) \neq 0$$

rezultă: $\underline{I}_d - \underline{I}_i = 0 \Rightarrow \underline{I}_d = \underline{I}_i$ (9.78)

$$2\underline{I}_h - 2\underline{I}_d = 0 \Rightarrow \underline{I}_h = \underline{I}_d \tag{9.79}$$

rezultă: $\underline{I}_h = \underline{I}_d = \underline{I}_i$ (9.80)

2. Folosim a doua condiție inițială

$$\underline{U}_{K_R}^{(1)} = 0 \qquad \underline{U}_h = 0 - \underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h \tag{9.81}$$

$$\underline{U}_{K_R}^{(1)} = \underline{U}_h + \underline{U}_d \cdot \underline{U}_i \qquad \underline{U}_d = E - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \tag{9.82}$$

$$\underline{U}_i = 0 - \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \tag{9.83}$$

$$-\underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h + \underline{E} - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d - \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i = 0 \tag{9.84}$$

dar $\underline{I}_h = \underline{I}_d = \underline{I}_i$ (9.85)

$$\underline{E} - \underline{I}_h(\underline{Z}_h + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i) = 0 \tag{9.86}$$

$$\underline{I}_h = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \text{ și } \underline{I}_h = \underline{I}_d = \underline{I}_i \tag{9.87}$$

Am calculat astfel componentele simetrice ale curenților de scurtcircuit monofazat. Calculăm acum curenții de scurtcircuit monofazat.

$$\underline{I}_{K_R}^{(1)} = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = \frac{3\underline{E}}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \tag{9.88}$$

$$\underline{I}_{K_R}^{(1)} = \frac{3\underline{E}}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \tag{9.89}$$

$$\underline{I}_{K_S}^{(1)} = \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i = \underline{I}_h(a^2 + a + 1) = 0 \tag{9.90}$$

$$\underline{I}_{K_T}^{(1)} = \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i = \underline{I}_h(a^2 + a + 1) = 0 \tag{9.91}$$

Schema echivalentă este următoarea:

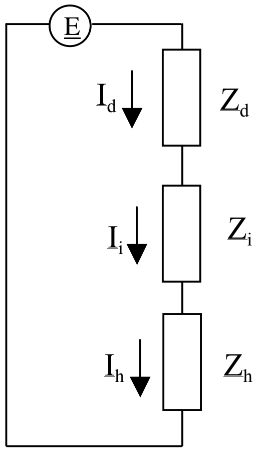

Fig.9.13. Schema echivalentă a scurtcircuitului monofazat

9.3.2. Scurtcircuit bifazat

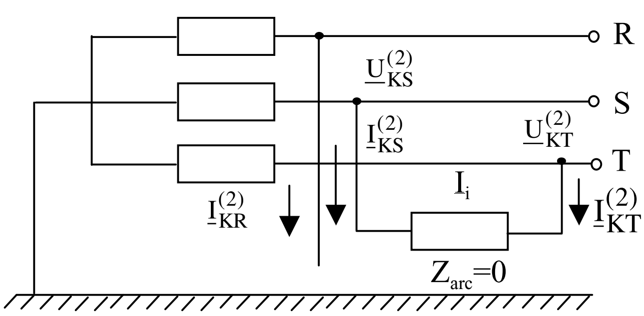

Fig.9.14. Scurtcircuit bifazat

Condiții inițiale:

$$\begin{cases} 1.\ \ \underline{I}_{KR}^{(2)} = 0 & (9.92) \\ 2.\ \ \underline{I}_{KS}^{(2)} + \underline{I}_{KT}^{(2)} = 0 & (9.93) \\ 3.\ \ \underline{U}_{KS}^{(2)} = \underline{U}_{KT}^{(2)} = \underline{U} & (9.94) \end{cases}$$

1. Folosim prima condiție

$$\underline{I}_{KR}^{(2)} = 0$$

$$\underline{I}_{KR}^{(2)} = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 \qquad (9.95)$$

rezultă: $\underline{I}_h + \underline{I}_d = -\underline{I}_i$ (9.96)

$$\underline{I}_h = -(\underline{I}_d + \underline{I}_i) \qquad (9.97)$$

2. Folosim a doua condiție:

$$\underline{I}_{KS}^{(2)} + \underline{I}_{KT}^{(2)} = 0$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2)} = \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i \quad (9.98)$$

$$\underline{I}_{KT}^{(2)} = \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i \quad (9.99)$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2)} + \underline{I}_{KT}^{(2)} = 2\underline{I}_h + \underline{I}_d\underbrace{(a^2 + a)}_{-1} + \underline{I}_i\underbrace{(a^2 + a)}_{-1} = 0 \quad (9.100)$$

rezultă: $2\underline{I}_h - (\underline{I}_d + \underline{I}_i) = 0$ (9.101)

rezultă: $\underline{I}_h = \dfrac{\underline{I}_d + \underline{I}_i}{2}$ (9.102)

dar $\underline{I}_h = -(\underline{I}_d + \underline{I}_i)$ (9.103)

rezultă: $2\underline{I}_h + \underline{I}_h = 0$ (9.104)

$\underline{I}_h = 0$

dacă $\underline{I}_h = 0$

reultă: $\underline{I}_d = -\underline{I}_i$ (9.105)

3. Folosim a treia condiție

$$\underline{U}_{KS}^{(2)} - \underline{U}_{KT}^{(2)} = 0$$

$$\underline{U}_{KS}^{(2)} = \underline{U}_h + a^2\underline{U}_d + a\underline{U}_i \quad (9.106)$$

$$\underline{U}_{KT}^{(2)} = \underline{U}_h + a\underline{U}_d + a^2\underline{U}_i \quad (9.107)$$

$$\underline{U}_{KS}^{(2)} - \underline{U}_{KT}^{(2)} = \underline{U}_d(a^2 - a) - \underline{U}_i(a^2 - a) = 0 \ /: (a^2-a) \quad (9.108)$$

rezultă: $\underline{U}_d - \underline{U}_i = 0$ (9.109)

$$\underline{U}_d = \underline{E} - \underline{Z}_d\underline{I}_d \quad (9.110)$$

$$\underline{U}_i = 0 - \underline{Z}_i\underline{I}_i \quad (9.111)$$

$$\underline{E} - \underline{Z}_d\underline{I}_d + \underline{Z}_i\underline{I}_i = 0 \quad (9.112)$$

dar $\underline{I}_d = -\underline{I}_i$

$$\underline{E} + \underline{I}_i(\underline{Z}_d + \underline{Z}_i) = 0$$

rezultă: $\underline{I}_i = -\dfrac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}$ (9.113)

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad (9.114)$$

și $\underline{I}_h = 0$ (9.115)

Schema echivalentă este:

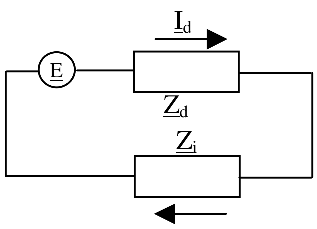

Fig.9.15. Schema echivalentă a scurtcircuitului bifazat

Curenții de scurtcircuit pe cele trei faze vor fi:

$$\underline{I}_{KR}^{(2)} = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 + \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} - \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} = 0 \tag{9.116}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2)} = \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i = 0 + a^2\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} - a\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \tag{9.117}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2)} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}(a^2 - a) \tag{9.118}$$

$$a^2 - a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -j\sqrt{3}$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{9.119}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2)} = -\frac{j\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \tag{9.120}$$

$$\underline{I}_{KT}^{(2)} = \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i = 0 + a\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} - a^2\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \tag{9.121}$$

$$\underline{I}_{KT}^{(2)} = -\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}(a^2 - a) \tag{9.122}$$

rezultă: $$\underline{I}_{KT}^{(2)} = \frac{j\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \tag{9.123}$$

9.3.3. Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ

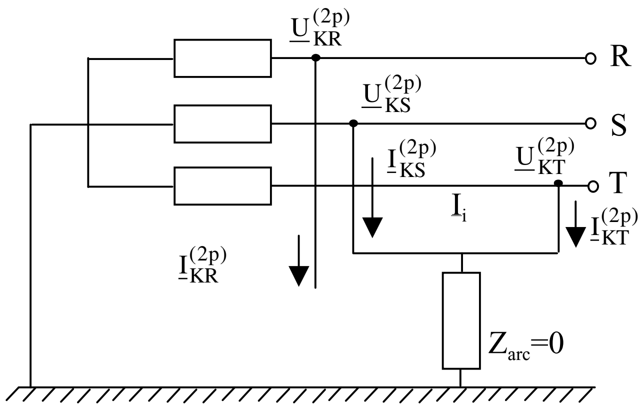

Fig.9.16. Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ

Condițiile inițiale:

1. $$\underline{U}_{KS}^{(2p)} = \underline{U}_{KT}^{(2p)} = 0 \tag{9.124}$$

2. $$\underline{I}_{KR}^{(2p)} = 0 \tag{9.125}$$

3. $$\underline{I}_{KS}^{(2p)} + \underline{I}_{KT}^{(2p)} = 0 \tag{9.126}$$

1. Folosim prima condiție și scădem cele două tensiuni

$$\underline{U}_{KS}^{(2p)} - \underline{U}_{KT}^{(2p)} = 0 \qquad (9.127)$$

$$\underline{U}_{KS}^{(2p)} = \underline{U}_h + a^2\underline{U}_d + a\underline{U}_i \qquad (9.128)$$

$$\underline{U}_{KT}^{(2p)} = \underline{U}_h + a\underline{U}_d + a^2\underline{U}_i \qquad (9.129)$$

$$\underline{U}_{KS}^{(2p)} - \underline{U}_{KT}^{(2p)} = \underline{U}_d(a^2 - a) - \underline{U}_i(a^2 - a) = 0 \ /: (a^2\text{-}a) \neq 0 \qquad (9.130)$$

$$\underline{U}_d - \underline{U}_i = 0 \qquad (9.131)$$

$$\underline{U}_d = \underline{E} - \underline{Z}_d\underline{I}_d \qquad (9.132)$$

$$\underline{U}_i = 0 - \underline{Z}_i\underline{I}_i \qquad (9.133)$$

$$\underline{E} - \underline{Z}_d\underline{I}_d + \underline{Z}_i\underline{I}_i = 0 \qquad (9.134)$$

1. Folosim prima relație și adunăm pe $\underline{U}_{KS}^{(2p)}$ cu $\underline{U}_{KT}^{(2p)}$ înmulțită cu (-a)

$$\underline{U}_{KS}^{(2p)} + (-a)\underline{U}_{KT}^{(2p)} = 0 \qquad (9.135)$$

$$\underline{U}_h + a^2\cancel{\underline{U}_d} + -a\underline{U}_i - a\underline{U}_h - a^2\cancel{\underline{U}_d} - \underbrace{a^3}_{1}\underline{U}_i = 0$$

$$\underline{U}_h(1-a) - \underline{U}_i(1-a) = 0 \ /:(1\text{-}a) \neq 0$$

$$\underline{U}_h = \underline{U}_i \qquad (9.136)$$

$$\underline{U}_h = -\underline{Z}_h\underline{I}_h \qquad\qquad -\underline{Z}_h\underline{I}_h = -\underline{Z}_i\underline{I}_i$$

$$\underline{U}_i = -\underline{Z}_i\underline{I}_i$$

rezultă: $\underline{I}_h = \dfrac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_h} \cdot \underline{I}_i$ (9.137)

2. Folosim a doua condiție inițială

$$\underline{I}_{KR}^{(2p)} = 0$$

$$\underline{I}_{KR}^{(2p)} = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 \qquad (9.138)$$

$$\frac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_h}\underline{I}_i + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 \qquad (9.139)$$

$$\underline{I}_i\frac{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h}{\underline{Z}_h} = -\underline{I}_d \qquad (9.140)$$

sau: $\underline{I}_i = -\underline{I}_d\dfrac{\underline{Z}_h}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h}$ (9.141)

Folosim cele două relații (9.134) și (9.141).

Rezultă:

$$\begin{cases} \underline{E} = -\underline{Z}_d \underline{I}_d + \underline{Z}_i \underline{I}_i = 0 & (9.142) \\ \underline{I}_i = -\underline{I}_d \dfrac{\underline{Z}_h}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h} & (9.143) \end{cases}$$

$$\underline{E} - \underline{Z}_d \underline{I}_d - \underline{I}_d \frac{\underline{Z}_i \underline{Z}_h}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h} = 0$$

$$\underline{E} - \underline{I}_d \frac{\underline{Z}_i \underline{I}_h + \underline{Z}_h \underline{Z}_d + \underline{Z}_d \underline{I}_i}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_h} = 0$$

rezultă: $$\underline{I}_d = \frac{\underline{E}(\underline{Z}_i + \underline{Z}_h)}{\underline{Z}_i \underline{Z}_h + \underline{Z}_h \underline{Z}_d + \underline{Z}_d \underline{Z}_i} \tag{9.144}$$

$$\underline{I}_h = -\frac{\underline{E}\underline{Z}_i}{\underline{Z}_i \underline{Z}_h + \underline{Z}_h \underline{Z}_d + \underline{Z}_d \underline{Z}_i} \tag{9.145}$$

$$\underline{I}_i = -\frac{\underline{E}\underline{Z}_h}{\underline{Z}_i \underline{Z}_h + \underline{Z}_h \underline{Z}_d + \underline{Z}_d \underline{Z}_i} \tag{9.146}$$

Schema echivalentă este următoarea:

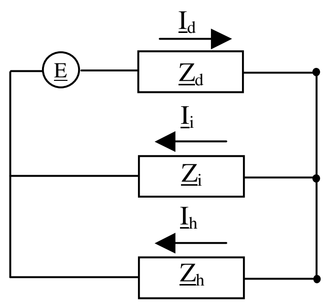

Fig.9.17. Schema echivalentă

Calculăm curenții de scurtcircuit pe faze:

$$\underline{I}_{KR}^{(2p)} = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 \tag{9.147}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = \underline{I}_h + a^2 \underline{I}_d + a\underline{I}_i \tag{9.148}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = \frac{\underline{E}\underline{Z}_i}{\underline{N}} + \frac{a^2 \underline{E}(\underline{Z}_i + \underline{Z}_h)}{\underline{N}} - \frac{\underline{E}\underline{Z}_h}{\underline{N}} \tag{9.149}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = \frac{\underline{E}}{\underline{N}}(-\underline{Z}_i + a^2 \underline{Z}_i + a^2 \underline{Z}_h - a\underline{Z}_h) \tag{9.150}$$

dar $a^3=1$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = \frac{\underline{E}}{\underline{N}}(-a^3 \underline{Z}_i + a^2 \underline{Z}_i + a^2 \underline{Z}_h - a\underline{Z}_h) \tag{9.151}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = \frac{\underline{E}}{\underline{N}}\left[a^2(\underline{Z}_h - a\underline{Z}_i) - a(\underline{Z}_h - a\underline{Z}_i)\right] \tag{9.152}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = \frac{\underline{E}}{\underline{N}}\left[(\underline{Z}_h - a\underline{Z}_i)(a^2 - a)\right] \tag{9.153}$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{9.154}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

rezultă: $$a^2 - a = -j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{9.155}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} = -\frac{\underline{E}j\sqrt{3}(\underline{Z}_h - a\underline{Z}_i)}{\underline{Z}_i\underline{Z}_h + \underline{Z}_h\underline{Z}_d + \underline{Z}_d\underline{Z}_i} \tag{9.156}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(2p)} + \underline{I}_{KT}^{(2p)} = 0 \tag{9.157}$$

rezultă: $$\underline{I}_{KT}^{(2p)} = \frac{\underline{E}j\sqrt{3}(\underline{Z}_h - a\underline{Z}_i)}{\underline{Z}_i\underline{Z}_h + \underline{Z}_h\underline{Z}_d + \underline{Z}_d\underline{Z}_i} \tag{9.158}$$

9.3.4. Scurtcircuit trifazat

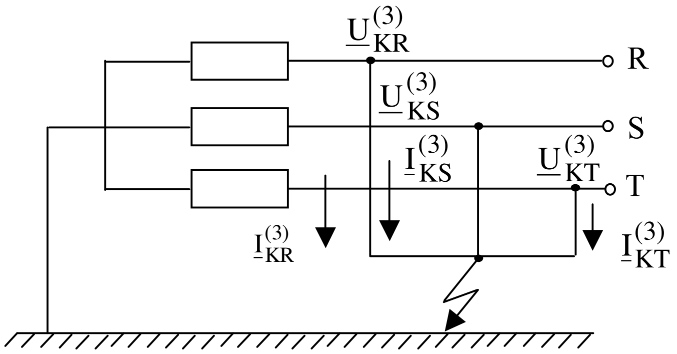

Fig.9.18. Scurtcircuit trifazat

Condițiile inițiale sunt:

1. $$\underline{I}_{KR}^{(3)} + \underline{I}_{KS}^{(3)} + \underline{I}_{KT}^{(3)} = 0 \tag{9.159}$$
2. $$\underline{U}_{KR}^{(3)} = \underline{U}_{KS}^{(3)} = \underline{U}_{KT}^{(3)} = 0 \tag{9.160}$$

Folosim prima condiție

$$\underline{I}_{KR}^{(3)} = \underline{I}_{KS}^{(3)} = \underline{I}_{KS}^{(3)} = 0$$

$$\underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i + \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i = 0 \tag{9.161}$$

$$3\underline{I}_h + \underline{I}_d\underbrace{(a^2 + a + 1)}_{0} + \underline{I}_i\underbrace{(a^2 + a + 1)}_{0} = 0$$

$$3\underline{I}_h = 0$$

Rezultă: $\underline{I}_h = 0$ (9.162)

2. Folosim a doua condiție:

$$\underline{U}_{KR}^{(3)} = \underline{U}_{KS}^{(3)} = \underline{U}_{KS}^{(3)} = 0$$

Dar: $\underline{U}_{KR}^{(3)} = \underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i$

$\underline{U}_{KS}^{(3)} = \underline{U}_h + a^2\underline{U}_d + a\underline{U}_i$ iar: $\begin{cases} \underline{U}_h = \frac{1}{3}(\underline{U}_{KR}^{(3)} + \underline{U}_{KS}^{(3)} + \underline{U}_{KT}^{(3)}) \\ \underline{U}_d = \frac{1}{3}(\underline{U}_{KR}^{(3)} + a\underline{U}_{KS}^{(3)} + a^2\underline{U}_{KT}^{(3)}) \\ \underline{U}_i = \frac{1}{3}(\underline{U}_{KR}^{(3)} + a^2\underline{U}_{KS}^{(3)} + a\underline{U}_{KT}^{(3)}) \end{cases}$ (9.163)

$\underline{U}_{KT}^{(3)} = \underline{U}_h + a\underline{U}_d + a^2\underline{U}_i$

Din a doua condiție inițială, rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{U}_h &= 0 \\ \underline{U}_d &= 0 \\ \underline{U}_i &= 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \underline{U}_h = 0 - \underline{Z}_h\underline{I}_h \\ \underline{U}_d = \underline{E} - \underline{Z}_d\underline{I}_d \\ \underline{U}_i = 0 - \underline{Z}_i\underline{I}_i \end{cases} \tag{9.164}$$

Rezultă: $-\underline{Z}_h\underline{I}_h = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_h = 0$ (9.165)

$$\underline{E} - \underline{Z}_d\underline{I}_d = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_d = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d} \tag{9.166}$$

$$-\underline{Z}_i\underline{I}_i = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_i = 0 \tag{9.167}$$

$$\underline{I}_{KR}^{(3)} = \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d} \tag{9.168}$$

$$\underline{I}_{KS}^{(3)} = \underline{I}_h + a^2\underline{I}_d + a\underline{I}_i = \frac{a^2\underline{E}}{\underline{Z}_d} \tag{9.169}$$

$$\underline{I}_{KT}^{(3)} = \underline{I}_h + a\underline{I}_d + a^2\underline{I}_i = \frac{a\underline{E}}{\underline{Z}_d} \tag{9.170}$$

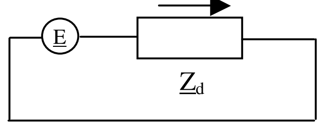

Fig.9.19. Schema echivalentă

9.4. METODOLOGIA DE CALCUL A CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT PRIN METODA COMPONENTELOR SIMETRICE

1. Se întocmește schema de principiu.

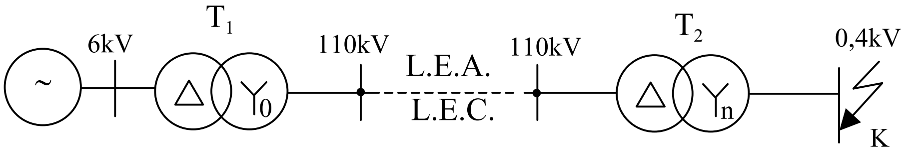

Fig.9.20. Schema de principiu a sistemului

2. Pe baza schemei de principiu se calculează impedanțele de secvență directă inversă și homopolară pentru toate elementele din schemă.

a) Impedanțele de secvență directă sunt egale cu impedanțele calculate în regim staționar.
b) Impedanțele de secvență inversă sunt egale cu impedanțele de secvență directă.

$$\underline{Z}_i = \underline{Z}_d \tag{9.171}$$

pentru linii și transformatoare.
Pentru generatoare se dă tensiunea de scurtcircuit de secvență inversă.

$$\left(u_{sc}(i)\right)_G \Rightarrow X_{iG} = \frac{u_{sc}\%}{100} \cdot \frac{U_G^2}{S_{NG}} \tag{9.172}$$

c) Impedanța de secvență homopolară este aceeași cu cea directă pentru transformator

$$\underline{Z}_{hT} = \text{în funcție de grupa de conexiuni} \tag{9.173}$$

d) Pentru LEA cu simplu circuit

$$\underline{Z}_{hLEA} = 2 \div 3\underline{Z}_{dLEA} \tag{9.174}$$

Pentru LEA cu dublu circuit:

$$\underline{Z}_{hLEA} = (4 \div 5)\underline{Z}_{dLEA} \tag{9.175}$$

3. Cunoscând aceste impedanțe se întocmesc 3 scheme de secvență directă inversă și homopolară.