

REȚELE ELECTRICE TRIFAZATE ÎN REGIM SIMETRIC

Curs 11

06.10.2007

PTDEE - Curs 11 - prof. R.
TIRNOVAN

11.1. Analiza rețelelor sistemelor electrice

Analiza sistemelor rețelelor electrice este operația prin care rețeaua complexă se separă în subrețele, care se studiază separat.

11.1.1 Particularitățile rețelelor sistemelor electrice

A. Reprezentarea rețelelor trifazate prin rețele monofazate

□ rețele monofazate echivalente, datorită simetriei existente între cele trei faze. În cazul apariției unor nesimetrii, se păstrează aceeași reprezentare prin utilizarea componentelor simetrice, care permit păstrarea mai departe a reprezentării monofilare.

B. Lipsa cuplajelor mutuale între laturile rețelei

□ cazurile particulare în care este necesar să se examineze influențele mutuale între două linii paralele sunt limitate la porțiuni din sistem și nu sunt introduse în general în studiile de ansamblu.

C. Rețeaua liniară – pasivă

□ rețeaua propriu-zisă, care leagă generatoarele cu sarcinile, este alcătuită din ramuri liniare, formate din rețeaua pasivă a liniilor și transformatoarelor. Este în general o rețea buclată cu două categorii de laturi: *longitudinale*, care nu sunt incidente la pământul fictiv și *transversale*, care sunt incidente la pământul fictiv.

D. Rețeaua neliniară – activă

□ elementele active, generatoarele și consumatorii, sunt conectate între nodurile rețelei pasive și pământ, formând o rețea radială în care nodul comun este pământul fictiv al schemei. Generatoarele, producătoare de energie a sistemului, sunt așezate în laturi, ce au un punct legat la nodul respectiv al rețelei liniare iar al doilea punct la nodul corespunzător neutrului rețelei, denumit “neutru” sau pământ.

□ sarcinile sistemului sunt așezate de asemenea în laturi având o aceeași poziție ca și laturile generatoare.

□ rețeaua activă, neliniară, se reprezintă în general prin curenți injectați la nodurile rețelei pasive.

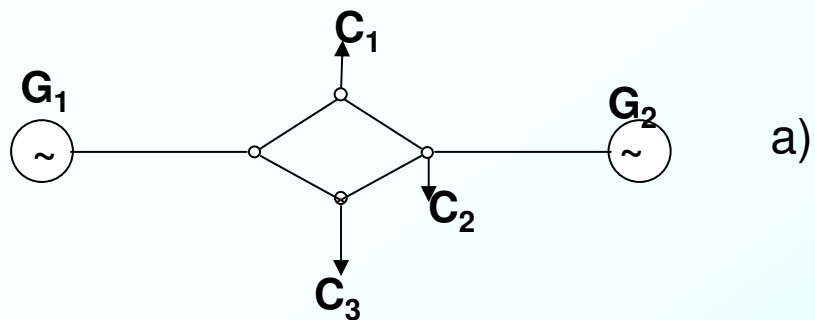
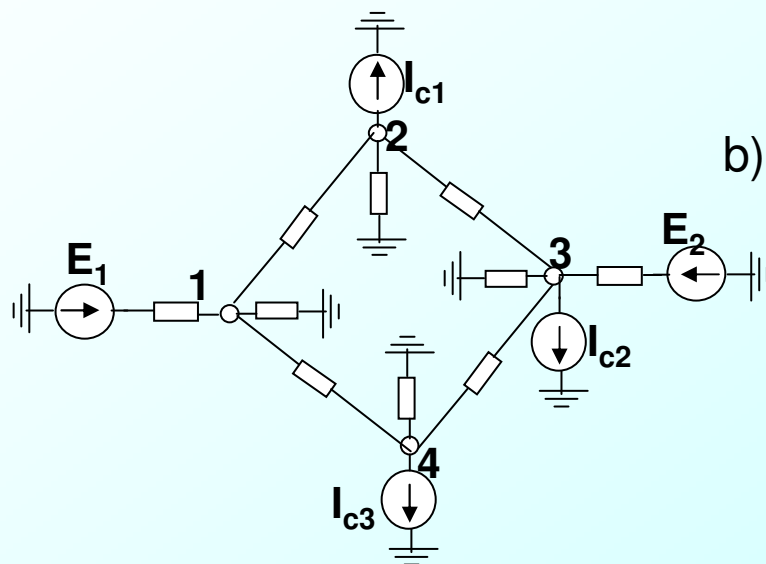


Fig.11.1. Elementele structurale ale unei rețele:
a) graful rețelei; b) schema echivalentă.



11.2. Schemele de calcul ale sistemelor electrice

□ schema de calcul cu surse de tensiuni în laturi, dar fără curenți injectați la noduri – este recomandabilă la calculul regimurilor nesimetrice și de scurtcircuit. Consumatorii se înlocuiesc prin admitanțe/impedanțe constante și se efectuează calculul rețelei liniare.

□ schema de calcul cu puteri injectate/ejectate la noduri, dar fără tensiuni electromotoare în laturi, este recomandabilă la calculul regimurilor normale de funcționare.

A. Rețeaua cu surse de tensiune în laturi

□ în graful rețelei directe se alege pământul ca nod de referință, iar mulțimea nodurilor se numerează de la 1 la n – pentru nodurile independente și de la 1 la g nodurile generatoare.

□ arborele grafului se alege în așa fel încât laturile generatoare să fie laturi coarde.

Rețeaua se studiază cu metoda curenților ciclici:

$$\underline{I}_c = \underline{Z}_c^{-1} \underline{E}_c, \quad (11.1)$$

Iar

$$\underline{I}_g = \underline{B}_g^T \underline{I}_c; \quad \underline{E}_c = \underline{B}_g \underline{E}_g \quad (11.2)$$

Matricile \underline{I}_g și \underline{E}_g au ca termeni curenții și tensiunile generatoarelor:

$$\begin{aligned} \underline{I}_g &= \underline{Y}_s \cdot \underline{E}_g \\ \underline{Y}_s &= \underline{B}_g^T \underline{Z}_c^{-1} \cdot \underline{B}_g. \end{aligned} \quad (11.3)$$

Relațiile (9.1) se folosesc la calculul curenților de scurtcircuit în ipoteza că tensiunile electromotoare sunt cunoscute din regimul normal, anterior.

B. Rețeaua cu puteri la noduri

Se consideră o rețea pasivă cu curenți injectați/ ejectați la noduri. Din mulțimea nodurilor rețelei, se alege un nod pentru care se fixează tensiunea în modul și argument. Acest nod se numește nod de echilibrare a rețelei.

Rețeaua se studiază cu metoda potențialelor la noduri:

$$\underline{Y}_{mm} \cdot \underline{V}_m = \underline{I}_m \quad (11.4)$$

Care se partiționează, scoțând în evidență nodul de echilibrare:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{nn} & -\underline{Y}_{ne} \\ \dots & \dots \\ -\underline{Y}_{en} & \underline{Y}_{ee} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_n \\ \dots \\ \underline{V}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_n \\ \dots \\ \underline{I}_e \end{bmatrix}, \quad (11.5)$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{nn}\underline{V}_n - \underline{Y}_{ne}\underline{V}_e &= \underline{I}_n, \\ -\underline{Y}_{en}\underline{V}_n + \underline{Y}_{ee}\underline{V}_e &= \underline{I}_e \end{aligned} \quad (11.6)$$

Curenții injectați la noduri se determină din relații de forma:

$$\underline{Y}_k = -\underline{y}_{ko}\underline{V}_k + \frac{\underline{S}_k^*}{\sqrt{3}\underline{V}_k^*} \quad (11.7)$$

□ \underline{y}_k este admitanța laturii transversale de la nodul K;

□ \underline{S}_k – puterea injectată la nodul K.

Rezolvarea ecuațiilor (10.7) reprezintă calculul regimului permanent, și se poate efectua prin mai multe metode.

11.3. Sinteza topologică a rețelelor electrice

□ se înțelege formarea unei rețele din elementele sale componente, cum pot fi subrețele sau grupuri de laturi și noduri;

□ se referă la obținerea ecuațiilor de funcționare a unei rețele complexe plecând de la ecuațiile de funcționare ale unei rețele simple;

□ se poate efectua fie prin extinderea rețelei inițiale, fie prin interconectarea unor subrețele.

A. Sinteza topologică a ramurilor

Se consideră o rețea n noduri, unde O este nodul de referință. Rețeaua inițială se extinde cu noi ramuri incidente cu nodurile inițiale și cu noile noduri:

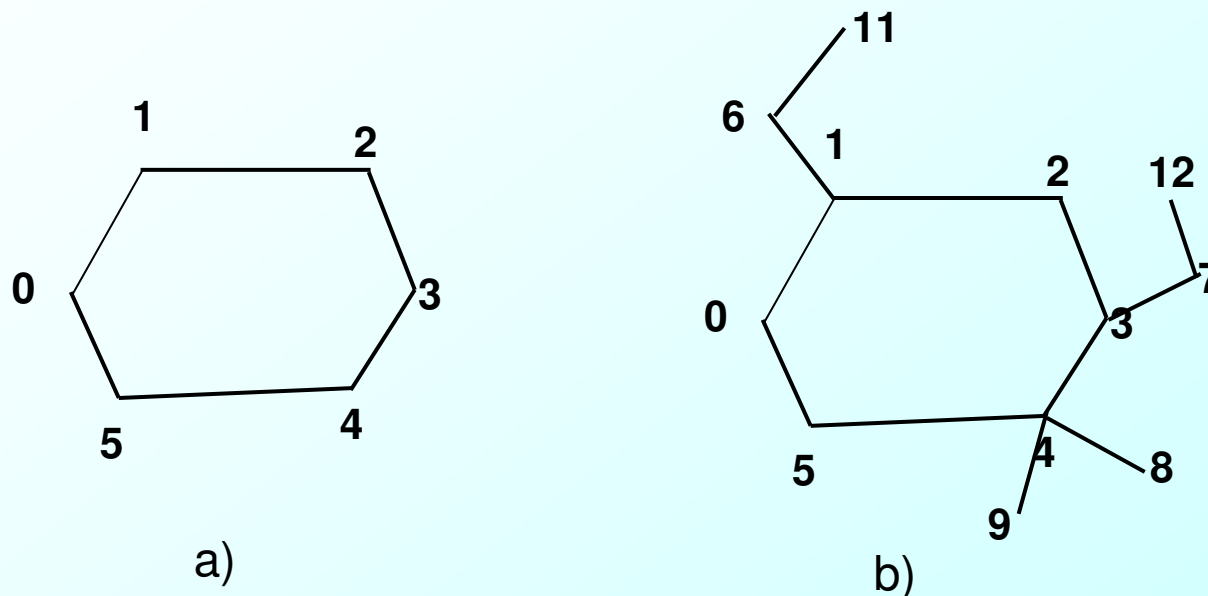


Fig.11.2. Rețea cu 6 noduri: rețea inițială a) și rețea extinsă b).

Se scriu matricile A' și y' pentru rețeaua extinsă cu noi ramuri:

$$A' = \begin{matrix} & n & \begin{bmatrix} \ell & r' \\ A & A'_{nr} \\ \dots & \dots \\ s & -U' \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11.8)$$

$$y' = \begin{matrix} & e & \begin{bmatrix} \ell & r' \\ y & \dots \\ r' & y_{r'r'} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11.9)$$

Se exprimă matricea admitanțelor nodale a rețelei extinse cu noi ramuri:

$$Y_{mm} = A' \cdot y' \cdot A'^T = \begin{bmatrix} A_{nr}, y_{r'r'}, A_{r'n} \dots - A_{nr'}, y_{r'r'} \\ \dots \\ - y_{r'r'}, A_{r'n} \dots y_{r'r'} \end{bmatrix} \quad (11.10)$$

$$Y_{mm} = \begin{matrix} & n & \begin{bmatrix} n & s \\ Y_{nn} & Y_{ns} \\ \dots & \dots \\ s & Y_{sn} & Y_{ss} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11.11)$$

Matricele Y_{mm} și $Z_{mm} = Y_{mm}^{-1}$ se partiționează în corespondență cu partiționarea mulțimii nodurilor $m = n_{us}$:

$$Z_{mm} = \begin{matrix} & n & s \\ \begin{matrix} n \\ s \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{nn} & Z_{ns} \\ \dots\dots\dots \\ Z_{sn} & Z_{ss} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11.12)$$

$$\begin{aligned} Z_{ns} &= Z_{nn} A_{ns_t} \\ Z_{ss} &= A_{ns_t} Z_{nn} A_{ns} + Z_{ss} \end{aligned} \quad (11.13)$$

Dacă se introduce o singură ramură $p - q \in r'$, atunci relațiile (11.13) devin:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{nq} &= \underline{Z}_{np}, & n=1,2,\dots,m; n \neq q \\ \underline{Z}_{qn} &= \underline{Z}_{pn} \\ \underline{Z}_{qq} &= \underline{Z}_{pp} + \underline{Z}_{p-q} \end{aligned} \quad (11.14)$$

La introducerea unei ramuri $p - q \in r'$ ordinul matricei Z_{mm} crește cu o unitate. Noua matrice Z_{mm} se obține din matricea inițială Z_{nn} prin bordarea cu o linie și o coloană.

B. Sinteza topologică a coardelor

Rețeaua inițială se extinde cu noi laturi q , care sunt laturi coarde:

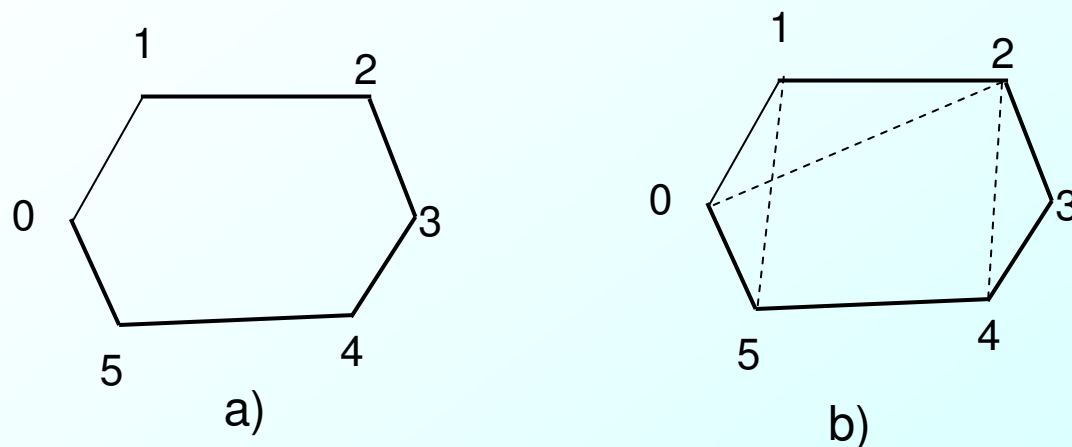


Fig.11.3. Sinteza topologică a coardelor: a) rețeaua inițială, b) rețeaua extinsă.

$$A' = \begin{bmatrix} \ell & q \\ A_{n\ell} & A_{nq} \end{bmatrix} \quad (11.15)$$

$$y' = \begin{bmatrix} \ell & q \\ y & \\ \dots & \\ q & y_{qq} \end{bmatrix} \quad (11.16)$$

Noua matrice Y'_{nn} , pentru rețeaua extinsă se calculează cu relațiile:

$$Y'_{nn} = A' \cdot y' \cdot A'^T = Y_{nn} + A_{nq} y_{qq} A_{qn}, \quad (11.17)$$

Noua matrice $Z'_{nn} = Y'^{-1}_{nn}$, se calculează din relația (9.15) cu formula lui Woodbury

$$Z'_{nn} = Z_{nn} - Z_{nn} A_{nq} Z^{-1}_{qq} A_{qn} Z_{nn}, \quad (11.18)$$

în care:

$$Z_{qq} = z_{qq} + A_{qn} Z_{nn} A_{nq}.$$

Relațiile (11.18) permit sinteza simultană a q coarde.

Dacă se introduce o singură coardă α , cu extremitățile $p - q \in \alpha$, din (11.16) se obține:

$$\underline{Z}'_{ik} = \underline{Z}_{ik} - \frac{(\underline{Z}_{ip} - \underline{Z}_{iq})(\underline{Z}_{ph} - \underline{Z}_{qk})}{\underline{Z}_{p-q} + \underline{Z}_{pp} + \underline{Z}_{qq} - 2\underline{Z}_{pq}} \quad (11.19)$$

Dacă nodul p este confundat cu nodul de referință, atunci în relația (11.17) toți termenii afectați de indicii p sunt nuli:

$$\underline{Z}'_{ik} = \underline{Z}_{ik} - \frac{-\underline{Z}_{iq} \cdot \underline{Z}_{qk}}{\underline{Z}_{p-q} + \underline{Z}_{qq}} \quad (11.20)$$

Rangul matricei \underline{Z}'_{nn} rămâne același, în schimb introducerea unei coarde modifică toți termenii matricei.

11.4. Aplicații ale metodelor de sinteză topologică

A. Generarea prin sinteză topologică a matricei impedanțelor nodale

Utilizarea acestei metode în calculul matricei Z_{nn} a apărut ca o necesitate a reducerii volumului și timpului de calcul. Este o metodă directă, topologică, care ține seama de structura rețelei.

Ca urmare a acestui fapt, această metodă este mai eficientă decât metodele matematice de inversare a matricei Y_{nn} , care neținând seama de topologia rețelei operează cu informații redundante.

Metoda prezintă următoarele etape:

- ❑ se descompune rețeaua în elemente componente de rețea – laturi. Din punct de vedere topologic aceste laturi pot aparține fie unei secvențe homologice (ramuri) fie unei secvențe cohomologice (coarde);
- ❑ se recompilează rețeaua inițială prin conectarea succesivă a laturilor componente. Recompunerea rețelei constă într-o arie de interconexiuni succesive între rețeaua deja sintetizată și noile elemente ce se introduc, care se determină prin efectuarea unei sinteze topologice a ramurilor sau a coardelor. Sinteza topologică a coardelor se efectuează cât mai repede posibil, pe măsura apariției lor.

B. Recalcularea matricii impedanțelor nodale în urma unor modificări neesențiale ale rețelei – manevre operative în schema de conexiuni a sistemului electroenergetic

În timpul exploatării sistemului electroenergetic, apar abateri de la schema normală în urma unor deranjamente în rețea, fie planificat, pentru revizuirea unor echipamente. În aceste situații se pune problema recalculării noii matrici Z'_{nn} în noua situație apărută, în funcție de vechea matrice Z_{nn} . În urma manevrelor executate în sistem pot avea loc:

- ☐ cuplări și decuplări de elemente componente în rețea;
- ☐ modificarea caracteristicilor de material a unor elemente componente.

La cuplarea unor elemente de rețea, noua matrice Z'_{nn} se calculează astfel: în paralel cu latura $p - q$, ce urmează a se deconecta se conectează o coardă cu impedanța $Z'_c = Z_{p-q}$ și se efectuează sinteza topologică a corzii Z'_c .

Dacă în urma manevrelor operative are loc modificarea parametrilor unor laturi, recalcularea matricii Z'_{nn} se efectuează prin sinteza succesivă a coardelor introduse în paralel cu laturile ce urmează a se modifica.