

8.1. EXPRIMAREA ÎN UNITĂȚI RELATIVE A MĂRIMILOR FIZICE CE CARACTERIZEAZĂ FUNCȚIONAREA REȚELELOR ELECTRICE

Principii generale

Mărimile fizice ce caracterizează funcționarea sistemelor/rețelelor electrice se exprimă, în mod natural, în unități de măsură absolute, corespunzătoare naturii acestora: tensiuni în V, intensitatea curentului în A etc. În ciuda faptului că această formulare are un caracter intuitiv, are și un dezavantaj major: comparația între mărimile similare ale unor echipamente de aceeași natură, dar cu caracteristici mult diferite se face greoi. Pe de altă parte însă, parametrii unui echipament, exprimați în Ω și calculați la tensiunea nominală nu pot fi operați (transfigurări și echivalențe serie-paralel) cu alți parametri exprimați tot în Ω , dar calculați la altă tensiune nominală (vezi seminarul anterior). Dezavantajul anterior este eliminat dacă parametrii fiecărui echipament se exprimă în unități relative la o bază proprie.

Pentru un element al rețelei ale cărui mărimi de stare (tensiuni, curenți, puteri) și parametri (impedanțe, admitanțe) sunt exprimați în mărimi relative, ecuația:

$$\underline{U}_{u.r.} = \underline{Z}_{u.r.} \underline{I}_{u.r.} \text{ nu mai include tensiunea nominală.}$$

Deci, prin exprimarea în unități relative, parametrii componentelor de rețea devin independenți de tensiune, putând fi supuși operațiilor conforme cu teoria circuitelor.

Exprimarea mărimilor în u.r.

Exprimarea în u.r. se face prin raportarea valorii mărimii în unități absolute la o valoare de bază sau de referință, exprimată în aceleași u.a.

$$X[u.r.] = \frac{X[u.a.]}{X_{baza}[u.a.]}$$

Un set de mărimi de bază trebuie să includă, de aceea, patru mărimi (dependente două câte două): U_{baza} , I_{baza} , S_{baza} , Z_{baza} . Din cele șase baze posibile, doar una este folosită în practică: U_{baza} , S_{baza} – mărimi independente (se aleg); I_{baza} , Z_{baza} – mărimi dependente (se calculează):

$$I_{baza} = \frac{S_{baza}}{\sqrt{3}U_{baza}}$$

$$Z_{baza} = \frac{U_{baza}^2}{S_{baza}}$$

La alegerea mărimilor independente, se recomandă alegerea câte unei baze individuale pentru fiecare zonă a rețelei cu tensiunea omogenă – toate bazele individuale au aceeași putere de bază (100 MVA sau 1000 MVA); tensiunea de bază a fiecărei zone este egală cu tensiunea nominală a zonei.

Componentă de rețea	Parametru			
	R [u.r.]	X [u.r.]	G [u.r.]	B [u.r.]
Linii	$R[\Omega] \frac{S_{baza}}{U_n^2}$	$X[\Omega] \frac{S_{baza}}{U_n^2}$	-	$B[S] \frac{U_n^2}{S_{baza}}$
Trafo	$\Delta P_{sc} \frac{S_{baza}}{S_n^2}$	$\frac{u_{sc}}{100} \frac{S_{baza}}{S_n}$	$\frac{\Delta P_0}{S_{baza}} 10^{-3}$	$\frac{i_0}{100} \frac{S_n}{S_{baza}}$

Schimbarea bazei:

$$Z_{baza,noua} = Z_{baza,veche} \left(\frac{U_{baza,veche}}{U_{baza,noua}} \right)^2$$

8.2. METODE TOPOLOGICE ȘI MATRICEALE PENTRU STUDIUL RE

Studiul RE complexe necesită scrierea și rezolvarea unui număr mare de ecuații de funcționare, care trebuie să se desfășoare după reguli simple, într-o ordine determinată, ușor de urmărit și de modificat. Metodele topologice și matriceale răspund în mare măsură necesităților menționate, permițând în plus elaborarea unor algoritmi în vederea implementării pe calculator.

Analiza RE presupune modelarea relațiilor fizice dintre mărimile care descriu fenomenele caracteristice. Modelarea matematică (cu ecuații diferențiale sau integrale) uneori dezavantajul că nu exprimă explicit structura sistemului fizic studiat. Dacă relațiile funcționale între variabile pot fi exprimate prin desene figurative, se poate constitui o algebră grafică ce permite o interpretare intuitivă mai rapidă a rezultatelor.

Metoda grafurilor de fluentă este una din aceste algebre grafice.

Noțiuni de teoria grafului

Reprezentarea grafică a unui graf este analoagă cu reprezentarea schematică a unei RE. O RE este constituită din elemente separate, conectate între ele conform unei scheme de conexiuni.

Elementele RE (pasive sau active) se reprezintă prin scheme echivalente, care se conectează între ele conform schemei de conexiuni, obținându-se astfel schema electrică echivalentă a rețelei în ansamblu, caracterizată cu ajutorul matricilor de sistem.

Având în vedere studiul regimurilor de funcționare sunt necesare două categorii de informații referitoare la schema echivalentă a rețelei:

- i. privind caracteristicile de material înglobate în matricile de material (matrici primitive de rețea);
- ii. privind caracteristicile topologice, înglobate în matricile topologice (matrici de incidentă).

Caracteristicile de material are rețelei sunt reprezentate de impedanțele proprii și mutuale din schema echivalentă, precum și de sursele de tensiune și curent.

Caracteristicile topologice sunt determinate de schema de conexiuni a elementelor din schema echivalentă. Dacă schema de conexiuni este eliberată de caracteristicile electrice,

atunci ea poate fi considerată ca o configurație geometrică de laturi și noduri, numită *graful rețelei*.

Definiții

Graful este un ansamblu format din două mulțimi disjuncte (N - noduri, L - laturi) între care s-a stabilit o corespondență, astfel încât fiecărui element din L îi corespunde o pereche unică de elemente din N.

Noduri: - neesențiale (le sunt asociate max. 2 laturi)
- esențiale (le sunt asociate min.3 laturi)

Latura – element asociat unei perechi unice de noduri.

Arcul – element asociat unei perechi unice de noduri la care mai sunt asociate și alte arcuri; mulțimea arcurilor asociate aceleiași perechi de noduri formează o latură.

Calea – este un șir de arcuri, la care extremitățile arcurilor din aval coincid cu extremitățile celor din amonte.

Ciclul reprezintă o cale finită a cărei extremitate inițială coincide cu extremitatea finală.

Arborele este un subgraf fără cicluri (complet dacă include toate nodurile); laturile sale se numesc laturi-arbore.

Coarborele este un subgraf complementar unui arbore complet; laturile sale se numesc coarde.

Matrici de incidență (topologice)

Noțiunea de incidență are în teoria grafurilor următoarele semnificații:

- o latură este incidentă la un nod când nodul este o extremitate a sa;
- o latură este incidentă la un ciclu când latura face parte din ciclu;
- o latură este incidentă la o secționare când latura face parte din secționare.

Incidența unei laturi la un nod este:

(+) dacă nodul este extremitate inițială (latura iese din nod)

(-) dacă nodul este extremitate finală (latura intră în nod).

La relațiile de incidență definite mai sus se pot asocia trei clase de matrici de incidență:

1. matrici de incidență laturi-noduri [A]
2. matrici de incidență laturi-cicluri [B]
3. matrici de incidență laturi-secționări [C]

Nodurile cu toate laturile incidente divergente sunt noduri surse.

Nodurile cu toate laturile incidente convergente sunt noduri consumatori (puțuri)

Fiecărui nod i se asociază o variabilă numită *semnal*. Fiecărui arc i se asociază un parametru numit *transmitanță*.

Matricea de incidență a nodurilor [A] este matricea de bază care conține toate informațiile referitoare la caracteristicile topologice ale unui graf. Celelalte două tipuri sunt auxiliare și pot fi determinate în funcție de matricea [A].

Liniile [A] → nodurile grafului

Coloanele [A] → laturile grafului

Elemente: 0 - latura nu este incidentă la nod

1 - latura iese din nod

-1 - latura intră în nod

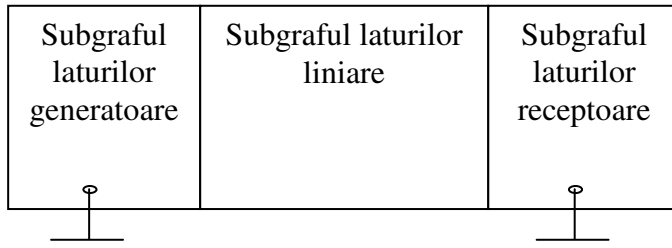
Suma termenilor pe coloanele [A] este 0.

Matricea inițială poate fi redusă prin eliminarea unei linii corespunzătoare nodului referință de potențial, rezultând matricea de incidență nodală redusă, care include doar nodurile independente ale grafului.

Relații între matricile de incidență

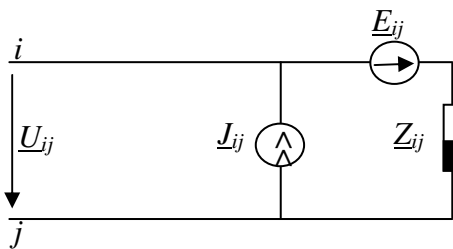
$$[A][B]_t = 0$$

$$[B][C]_t = 0$$



Matrici primitive de rețea și ecuațiile de material ale unei RE

Circuitul elementar care stă la baza structurii unei RE este constituit din triada impedanță/admitanță, sursă (generator de t.e.m./curent), cu interconexiunile și orientările date mai jos.



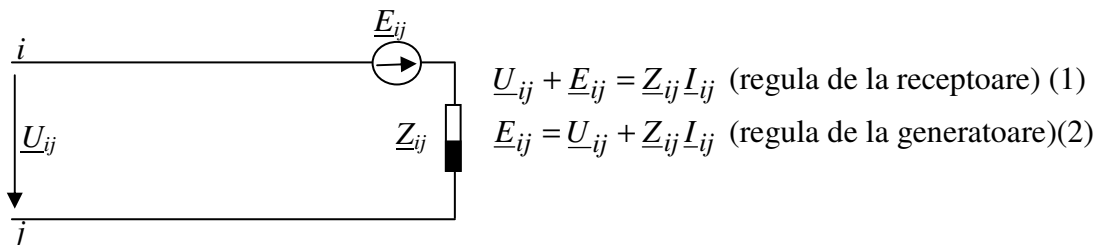
Definiția implică posibilitatea reprezentării complete a unei rețele oarecare.

Observații

Dacă elementele RE sunt pasive, ele se vor reprezenta cu ajutorul unor cuadripoli care includ doar impedanțe/admitanțe ($\underline{E}_{ij} = 0$, $\underline{J}_{ij} = 0$).

Dacă elementele RE sunt active, ele pot fi reprezentate doar cu un singur tip de generator (\underline{E}_{ij} sau \underline{J}_{ij}).

1. O latură activă de RE, reprezentată de diada ce include un generator de tensiune, este descrisă de o ecuație de forma:



Dacă relațiile anterioare se aplică pentru fiecare latură componentă a grafului ce modelează RE, se obține o ecuație matriceală de forma (în ipoteza absenței cuplajelor între laturile rețelei):

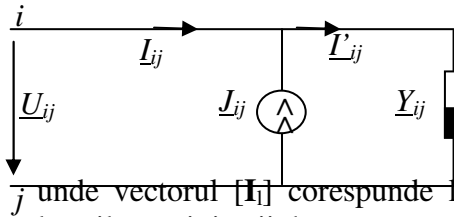
$$[\underline{U}_l] + [\underline{E}_l] = [\underline{Z}_l][\underline{I}_l] \quad (3)$$

$[\underline{U}_l]$, $[\underline{E}_l]$ – vectorii coloană ai tensiunilor la borne, respectiv t.e.m. pe laturile RE

$$[\mathbf{Z}_l] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{l1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{l2} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & \underline{Z}_{lN} \end{bmatrix} - \text{matricea impedanțelor laturilor RE (matrice diagonală, pentru}$$

RE fără cuplaje magnetice între laturi sau RE echivalentă fără cuplaje magnetice)

2. O latură activă de RE, reprezentată de diada ce include un generator de tensiune, este descrisă de o ecuație de forma:



$$\underline{I}_{ij} + \underline{J}_{ij} = \underline{Y}_{ij} \underline{U}_{ij} \quad (4)$$

Ecuția matriceală corespunzătoare a RE:

$$[\mathbf{I}_l] + [\mathbf{J}_l] = [\mathbf{Z}_l][\mathbf{U}_l] \text{ sau } [\mathbf{I}_l] + [\mathbf{J}_l] = [\mathbf{I}'_l] \quad (5)$$

unde vectorul $[\mathbf{I}_l]$ corespunde laturilor pasive sau cu t.e.m., iar vectorul $[\mathbf{J}_l]$ corespunde laturilor cu injecții de curent;

$$[\mathbf{Y}_l] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{l1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{l2} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & \underline{Y}_{lN} \end{bmatrix} - \text{matricea admitanțelor laturilor RE (matrice diagonală, pentru}$$

RE fără cuplaje magnetice între laturi sau RE echivalentă fără cuplaje magnetice)

Ecuțiile topologice ale unei RE

Pot fi exprimate sub o formă generală cu ajutorul matricei de incidență $[\mathbf{A}]$:

$$[\mathbf{A}][\mathbf{I}'] = 0 \text{ Teorema I a lui Kirchhoff (6)}$$

$$[\mathbf{A}]_l[\mathbf{U}_n] = [\mathbf{U}_l] \text{ Teorema a II a lui Kirchhoff (7)}$$

$$[\mathbf{A}](\mathbf{I}_l + \mathbf{J}_l) = 0 \Rightarrow [\mathbf{A}][\mathbf{I}_l] = [\mathbf{I}_n] \quad (8)$$

$$\text{Unde } [\mathbf{I}_n] = -[\mathbf{A}][\mathbf{J}_l] \quad (9)$$

Ecuția de material (5) pentru rețeaua cu surse de curent pe laturi a fost înlocuită cu ecuația (8) topologică, ce corespunde unei RE cu curenți în noduri.

Scrierea generalizată:

$$[\mathbf{I}_n] = [\mathbf{T}_l][\mathbf{I}_l] \quad (10)$$

$$[\mathbf{U}_l] = [\mathbf{T}_U][\mathbf{U}_n] \quad (11)$$

Ecuțiile de funcționare ale RE

$$[\mathbf{Z}_l][\mathbf{I}_l] = [\mathbf{U}_l] + [\mathbf{E}_l] \mid \cdot [\mathbf{Z}_l]^{-1} = [\mathbf{Y}_l] \Rightarrow \quad (12)$$

$$[\mathbf{I}_l] = [\mathbf{Y}_l][\mathbf{U}_l] + [\mathbf{Y}_l][\mathbf{E}_l] \mid \cdot [\mathbf{A}] \xrightarrow{(8)+(7)} [\mathbf{I}_n] = [\mathbf{A}][\mathbf{Y}_l][\mathbf{A}]_l[\mathbf{U}_n] + [\mathbf{A}][\mathbf{Y}_l][\mathbf{E}_l]$$

sau

$$[\mathbf{I}_n] = [\mathbf{Y}_n][\mathbf{U}_n] + [\mathbf{A}][\mathbf{Y}_l][\mathbf{E}_l] \quad (13)$$

unde $[\mathbf{Y}_n] \stackrel{def}{=} [\mathbf{A}][\mathbf{Y}_l][\mathbf{A}]_t$ - matricea admitanțelor nodale a RE

$$\Rightarrow [\mathbf{U}_n] = [\mathbf{Y}_n]^{-1}[\mathbf{I}_n] - [\mathbf{Y}_n]^{-1}[\mathbf{A}][\mathbf{Y}_l][\mathbf{E}_l] \quad (14)$$