SISTEME ELECTROENERGETICE

Capitolul 3

CALCULUL REGIMULUI PERMANENT DE FUNCTIONARE AL SEE

Terminologie

Definitie: *Calculul regimului permanent de funcţionare al SEE* urmareste determinarea tuturor mărimilor de stare caracteristice ale sistemului , pornind de la o anumită structură şi de la anumite condiţii de încărcare ale acestuia.

Terminologie

Istoric

Momentul	Soluţii tehnice
Până în 1930	Calcule efectuate manual (se foloseau pe scară largă modele ale curenţilor de buclă)
1930 – 1956	Modele fizice la scară ale sistemului electroenergetic. Aşa numitele „mese” sau „analizoare’ de curent alternativ. Două modele cu răspândire largă: analizorul Westinghouse (f_n = 440 Hz, U_n = 100 V, I_n = 1 A) şi analizorul General Electric (f_n = 480 Hz, U_n = 50 V, I_n = 50 mA).
1956	Prima soluţie bazată pe calculatoare numerice. Modelul dezvoltat de Ward şi Hale [Ward 56] foloseşte ecuaţia nodală şi o formă primară, simplă a metodei Newton-Raphson.
După 1956	Primele aplicaţii ale metodei Seidel-Gauss. Ajustarea tensiunilor se face folosind valori deja corectate ale tensiunilor din nodurile aflate în vecinătatea nodului de calcul. Astfel, propagarea corecţiilor de tensiune în întreaga reţea necesită un număr sporit de iteraţii. Metoda ridică şi probleme de convergenţă. Metoda Newton-Raphson, dezvoltată în anii 1960, este mai rapidă decât metoda Seidel-Gauss şi asigură o convergenţă mai bună.

Terminologie

Punctul de pornire: schema monofilară a sistemului, căreia i se ataşează un graf ale cărui noduri şi laturi descriu topologia sistemului analizat.

Terminologie

Latura modelează un element din structura sistemului (de exemplu, o linie, un transformator, un generator etc) şi corespunde unei scheme echivalente reprezentate printr-un dipol sau cuadripol liniar.
Nodul reprezintă extremitatea unei laturi sau punctul de întâlnire a două sau mai multe laturi şi este asociat barelor colectoare din stațiile şi posturile de transformare sau punctului neutru.

Terminologie

Noduri

- injecții de curent / putere.
- convenție: *injecție* – termen unic;
- sensul fluxului de curent / putere: semnul asociat („+” pentru curentul / puterea „*introdusă*” în nod de surse şi „-” pentru curentul / puterea „*extrasă*” din nod de consumatori.
- *nod de referință* – punctul neutru .,
- *noduri independente – restul nodurilor.*

Terminologie

Laturi

Schemele echivalente ale diferitelor elemente din sistem conţin:

- *laturi longitudinale* (definite între două noduri independente)
- *laturi transversale* (definite între un nod independent şi nodul de referinţă).

Terminologie

Reprezentarea prin vectori si matrice

Nodul *i* : tensiunea nodală $\underline{U}_i$, injecţia de curent $\underline{J}_i$ şi injecţia de putere $\underline{S}_i$.

Latura l (intre nodurile j si k): tensiunea la borne $\underline{UL}_l$, circulaţia de curent pe latura $\underline{I}_{l(jk)}$, notat pe scurt $\underline{I}_l$, circulatiile de puteri $\underline{S}_{jk}$ si $\underline{S}_{kj}$.

Terminologie

Reprezentarea prin vectori si matrice

$$[\underline{U}_n] = [\underline{U}_1 \quad \underline{U}_2 \quad \dots \quad \underline{U}_i \quad \dots \quad \underline{U}_N]^T$$
$$[\underline{J}_n] = [\underline{J}_1 \quad \underline{J}_2 \quad \dots \quad \underline{J}_i \quad \dots \quad \underline{J}_N]^T$$
$$[\underline{S}] = [\underline{S}_1 \quad \underline{S}_2 \quad \dots \quad \underline{S}_i \quad \dots \quad \underline{S}_N]^T$$
$$[\underline{U}] = [\underline{UL}_1 \quad \underline{UL}_2 \quad \dots \quad \underline{ULl} \quad \dots \quad \underline{UL}_L]^T$$
$$[\underline{I}] = [\underline{I}_1 \quad \underline{I}_2 \quad \dots \quad \underline{I}_l \quad \dots \quad \underline{I}_L]^T$$

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \cdot \underline{J}_i^* \qquad \underline{S}_{jk} = \underline{U}_j \cdot \underline{I}_{l(jk)}^* \qquad \underline{S}_{kj} = \underline{U}_k \cdot \underline{I}_{l(jk)}^*$$

Terminologie

Modelul matematic de baza

$$[\underline{Y}_n]\cdot[\underline{U}_n]=[\underline{J}_n]$$

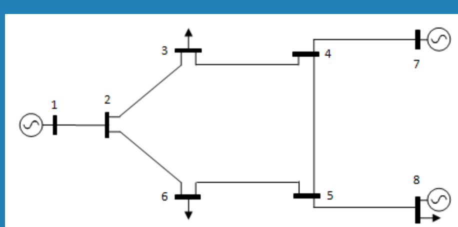
Modelul este liniar.

Date nodale uzuale: injectii de puteri active si reactive.

Modelul este neliniar.

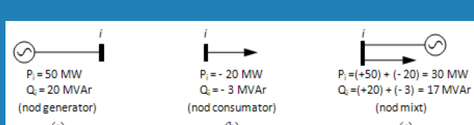
Reprezentarea nodurilor

Dupa natura nodurilor



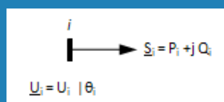
Reprezentarea nodurilor

Conventia de semn pentru injectii



Reprezentarea nodurilor

Caracterizarea nodurilor unui SE



Se pot scrie 2 ecuatii: balantele de putere activa si reactiva.

Consecinta: 2 marimi nodale sunt precizate apriori, 2 marimi nodale rezulta din calcul.

Reprezentarea nodurilor

Clasificarea dupa tip

În funcție de care dintre mărimile nodale sunt impuse, nodurile se clasifică în trei categorii:

- Nod de tip PQ;
- Nod de tip PU şi
- Nod de echilibru, notat NE.

Reprezentarea nodurilor

Noduri de tip PQ

Se impun a priori: P si Q
Rezulta din calcul: U si θ.

De regula: noduri consumatorare sau generatoare fara reglaj de tensiune.

Nodurile de transfer: noduri de tip PQ cu P = Q = 0.

Reprezentarea nodurilor

Noduri de tip PU

Se impun a priori: P si U
Rezulta din calcul: Q si θ.

De regula: noduri generatoare sau noduri cu tensiune reglata.

Se impun restrictii pentru puterea reactiva: Q_{min} si Q_{max}.

Reprezentarea nodurilor

Noduri de echilibru

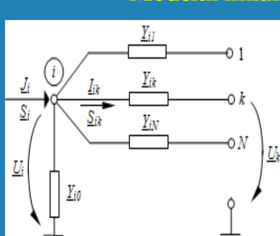
Se impun a priori: U si θ (θ = 0).
Rezulta din calcul: P si Q.

De regula: nodul cel mai puternic din sistem.

Asigura balanta puterilor activa si reactiva produse si consumate in sistem.

Modele neliniare de regim permanent

Modelul liniar de baza



$$[\underline{Y}_n]\cdot[\underline{U}_n]=[\underline{J}_n]$$

$$\underline{J}_i=\underline{Y}_{ii}\cdot\underline{U}_i-\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{N}\underline{Y}_{ik}\cdot\underline{U}_k$$

$$\underline{Y}_{i,0}=\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{N}\underline{y}_{ik,0}$$

$$i=1\ldots N$$

Modele neliniare de regim permanent

Modelul liniar de baza - continuare

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{i,0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{N} \underline{Y}_{ik} = \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{N} \underline{Y}_{ik,0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{N} \underline{Y}_{ik} \qquad i = 1\ldots N$$

$$\underline{J}_i = \frac{\underline{S}_i^*}{\underline{U}_i^*} \qquad i = 1\ldots N$$

Modele neliniare de regim permanent

Tipuri de modele neliniare

- modelul ecuațiilor nodale neliniare (în mărimi complexe);
- modelul bilanțului de curenți în noduri (în mărimi reale) și
- modelul bilanțului de puteri în noduri (în mărimi reale).

Modelul ecuatiilor nodale neliniare, in marimi complexe

$$\frac{\underline{S}_i^*}{\underline{U}_i^*} = \frac{P_i - j\cdot Q_i}{\underline{U}_i^*} = \underline{Y}_{ii}\cdot\underline{U}_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i,e}}^{N} \underline{Y}_{ik}\cdot\underline{U}_k - \underline{Y}_{ie}\cdot\underline{U}_e$$

$$i = 1..N \qquad i \neq e$$

$$\frac{\underline{S}_e^*}{\underline{U}_e^*} = \frac{P_e - j\cdot Q_e}{\underline{U}_e^*} = \underline{Y}_{ee}\cdot\underline{U}_e - \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq e}}^{N} \underline{Y}_{ek}\cdot\underline{U}_k$$

Modele bazate pe bilanturi nodale

Reprezentari algebrica si trigonometrica

← r. algebrică →

$$\underline{Y}_{ii} = G_{ii} + j \cdot B_{ii}$$
$$\underline{Y}_{ik} = G_{ik} + j \cdot B_{ik}$$
$$\underline{U}_{i} = U_i' + j \cdot U_i''$$

← r. trigonometrică →

$$\underline{Y}_{ii} = Y_{ii} \cdot e^{j \cdot \Psi_{ii}} = Y_{ii} \cdot (\cos \Psi_{ii} + j \cdot \sin \Psi_{ii})$$
$$\underline{Y}_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j \cdot \Psi_{ik}} = Y_{ik} \cdot (\cos \Psi_{ik} + j \cdot \sin \Psi_{ik})$$
$$\underline{U}_{i} = U_{i} \cdot e^{j \cdot \theta_i} = U_{i} \cdot (\cos \theta_i + j \cdot \sin \theta_i)$$

Modelul bilantului de curenti in noduri

Ecuatia nodala de baza

$$\underline{Y}_{ii} \cdot \underline{U}_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{U}_k - \frac{P_i - j \cdot Q_i}{\underline{U}_i^{*}} = 0$$

$$i = 1 \ldots N;\ i \neq e$$

Modelul bilantului de curenti in noduri

Reprezentarea algebrica

$$G_{ii} \cdot U_i' - B_{ii} \cdot U_i'' - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} (G_{ik} \cdot U_k' - B_{ik} \cdot U_k'') - \frac{P_i \cdot U_i' + Q_i \cdot U_i''}{(U_i')^2 + (U_i'')^2} = 0$$

$$G_{ii} \cdot U_i'' + B_{ii} \cdot U_i' - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} (G_{ik} \cdot U_k'' + B_{ik} \cdot U_k') - \frac{P_i \cdot U_i'' - Q_i \cdot U_i'}{(U_i')^2 + (U_i'')^2} = 0$$

$$i = 1..N \quad i \neq e$$

Modelul bilantului de curenti in noduri

Reprezentarea trigonometrica

$$Y_{ii} \cdot U_i \cdot \cos(\theta_i + \Psi_{ii}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} Y_{ik} \cdot U_k \cdot \cos(\theta_k + \Psi_{ik}) - \frac{P_i \cdot \cos\theta_i + Q_i \cdot \sin\theta_i}{U_i} = 0$$

$$Y_{ii} \cdot U_i \cdot \sin(\theta_i + \Psi_{ii}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} Y_{ik} \cdot U_k \cdot \sin(\theta_k + \Psi_{ik}) - \frac{P_i \cdot \sin\theta_i - Q_i \cdot \cos\theta_i}{U_i} = 0$$

$i = 1..N$

$i \neq e$

Modelul bilantului de puteriin noduri

Explicitarea puterii aparente nodale

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \cdot \underline{J}_i^* = \underline{U}_i \cdot (\underline{Y}_{ii}^* \cdot \underline{U}_i^* - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} \underline{Y}_{ik}^* \cdot \underline{U}_k^*)$$

$i = 1..N$

$i \neq e$

$$\underline{Y}_{ii}^* \cdot U_i^2 - \underline{U}_i \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} \underline{Y}_{ik}^* \cdot \underline{U}_k^* - (P_i + j \cdot Q_i) = 0$$

Modelul bilantului de puteri in noduri

Reprezentarea algebrica

$$G_{ii} \cdot [(U_i')^2 + (U_i'')^2] - U_i' \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} (G_{ik} \cdot U_k' - B_{ik} \cdot U_k'') - U_i'' \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} (G_{ik} \cdot U_k'' + B_{ik} \cdot U_k') - P_i = 0$$

$$-B_{ii} \cdot [(U_i')^2 + (U_i'')^2] + U_i' \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} (G_{ik} \cdot U_k'' + B_{ik} \cdot U_k') - U_i'' \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} (G_{ik} \cdot U_k' - B_{ik} \cdot U_k'') - Q_i = 0$$

$i = 1..N$

$i \neq e$

Modelul bilantului de puteri in noduri

Reprezentarea trigonometrica

$$Y_{ii}\cdot U_i^2\cdot\cos\Psi_{ii}-U_i\cdot\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{N}Y_{ik}\cdot U_k\cdot\cos(\Theta_i-\Theta_k+\Psi_{ik})-P_i=0$$

$$i=1..N$$

$$i\neq e$$

$$-Y_{ii}\cdot U_i^2\cdot\sin\Psi_{ii}-U_i\cdot\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{N}Y_{ik}\cdot U_k\cdot\sin(\Theta_i-\Theta_k+\Psi_{ik})-Q_i=0$$

Modelul bilantului de puteri in noduri

Reprezentarea mixta

$$\underline{Y}_{ii}=G_{ii}+j\cdot B_{ii}\qquad \underline{Y}_{ik}=G_{ik}+j\cdot B_{ik}$$

$$\underline{U}_i=U_i\cdot e^{j\cdot\Theta_i}=U_i\cdot(\cos\Theta_i+j\cdot\sin\Theta_i)$$

$$G_{ii}\cdot U_i^2-U_i\cdot\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{N}U_k\cdot[G_{ik}\cdot\cos(\Theta_i-\Theta_k)+B_{ik}\cdot\sin(\Theta_i-\Theta_k)]-P_i=0$$

$$i=1..N\qquad i\neq e$$

$$-B_{ii}\cdot U_i^2-U_i\cdot\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{N}U_k\cdot[G_{ik}\cdot\sin(\Theta_i-\Theta_k)-B_{ik}\cdot\cos(\Theta_i-\Theta_k)]-Q_i=0$$

Modelul general de calcul al regimului permanent

Metode de rezolvare

- Metode iterative pentru rezolvarea sistemelor de ecuații liniare (Jacobi, Seidel – Gauss sau Seidel – Gauss modificată) - sistem liniar de forma [$\underline{Y}_n$] · [$\underline{U}_n$] = [$\underline{J}_n$], în care curenții sunt calculați la fiecare iterație în funcție de injecțiile de putere și tensiunile nodale.
- Metoda iterativă Newton – Raphson pentru rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare - se rezolvă un sistem de ecuații neliniare format pe baza balanței de puteri sau curenți în noduri

Modelul general de calcul al regimului permanent

Recomandari

- Modelul neliniar în numere complexe – metoda iterativa Seidel – Gauss.
- Modelele neliniare bazate pe bilanţul de curenţi sau puteri în noduri - metode iterative de tip Newton.
- Se recomandă folosirea reprezentării algebrice pentru numerele complexe, în locul celei trigonometrice, pentru a reduce timpii de calcul asociaţi evaluării funcţiilor trigonometrice *sin* şi *cos*.

Modelul general de calcul al regimului permanent

Algoritm generic

1. Precizarea datelor de intrare.
2. Formarea matricei admitanţelor nodale.
3. Determinarea necunoscutelor principale:
    3.1. Stabilirea aproximaţiei iniţiale (U_i, θ_i pentru nodurile PQ şi θ_i pentru nodurile PU)
    3.2. Formarea modelului de regim permanent.
    3.3. Rezolvarea modelului de regim permanent şi determinarea necunoscutelor principale (proces iterativ):
4. Determinarea necunoscutelor auxiliare (circulaţii de puteri pe laturi; pierderi de puteri pe laturi; injecţiile de puteri în NE).
5. Furnizarea datelor de ieşire.

Modelul general de calcul al regimului permanent

Data de intrare

1. *Date generale*: N, L, e, E_{max}.
2. *Date noduri* - vectori de dimensiuni (1,N): [*TipN*] (0 – NE, 1 – PQ, 2 – PU); [U] ; [P_G], [Q_G] ; [P_C], [Q_C] ; [Q_{min}], [Q_{max}]
3. *Date laturi* - vectori de dimensiuni (1,L) : [N_1], [N_2] ; [*TipL*] (de exemplu: 0 – linie; 1 – transformator); [R], [X], [G], [B] ; [*Plot*] (pentru laturile de *TipL* = 1).

Modelul general de calcul al regimului permanent

Aproximatia initiala

Pentru stabilirea aproximațiilor inițiale ale modulelor tensiunilor nodale se folosesc, de regulă, direct valorile din vectorul [*U*], în timp ce pentru argumentele tensiunilor se recomandă inițializarea cu valoarea 0.

O practică curentă o reprezintă așa numita inițializare *plată*, caz în care pentru modulele tensiunilor din noduri se folosesc valori identice, egale cu o valoare de referință (de exemplu, tensiunea nominală a nodului).

Modelul general de calcul al regimului permanent

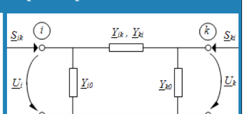
Calculul necunoscutelor auxiliare

Circulatii si pierderi de puteri pe laturi

$$\underline{S}_{ik} = U_i^2 \cdot \underline{Y}_{i0}^* + \underline{U}_i \cdot (\underline{U}_k - \underline{U}_i)^* \cdot \underline{Y}_{ik}^*$$

$$\underline{S}_{ki} = U_k^2 \cdot \underline{Y}_{k0}^* + \underline{U}_k \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_k)^* \cdot \underline{Y}_{ki}^*$$

$$\Delta\underline{S}_{ik} = \Delta\underline{S}_{ki} = \underline{S}_{ik} + \underline{S}_{ki}$$



Injectia de putere in nodul de echilibru:

$$\underline{S}_e = U_e^2 \cdot \underline{Y}_{ee}^* - U_e \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq e}}^{N} \underline{Y}_{ek}^* \cdot \underline{U}_k^*$$

SFARSIT