STABILITATEA SI CONTROLUL SISTEMELOR ELECTROENERGETICE

Stabilitatea la mici perturbatii a sistemelor complexe

Modelul matematic general

Modelul matematic general

Dinamica SEE este descrisă de un sistem de ecuaţii algebro-diferenţiale:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x},\mathbf{y}) \text{ – ecuaţii diferenţiale}$$
$$0 = g(\mathbf{x},\mathbf{y}) \text{ – ecuaţii algebrice}$$

x -vectorul variabilelor dinamice de stare (unghiurile rotorice, vitezele unghiulare sau tensiunile electromotoare din înfăşurările statorică şi rotorică);
y -vectorul variabilelor algebrice de stare (modulele şi argumentele tensiunilor din nodurile reţelei electrice şi curenţii statorici).

Modelul matematic general

$0 = g(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – ecuaţii algebrice

Ecuaţiile algebrice prezintă:

- bilanţul puterilor active şi reactive în nodurile reţelei electrice.
- ecuaţiile statorice ale generatorului sincron, care exprimă legătura dintre tensiunile electromotoare şi tensiunile la bornele generatoarelor sincrone prin intermediul curenţilor statorici, folosind reprezentarea în coordonate (d,q).

Modelul matematic general

$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – ecuaţii diferenţiale

Ecuaţiile diferentiale prezintă:

- *regimul dinamic electromecanic*, care descrie variaţia în timp a vitezelor şi unghiurilor interne ale rotoarelor generatorului sincron, în funcţie de dezechilibrul între puterile mecanică şi electromagnetică.
- *regimul dinamic electromagnetic*, care descrie ecuaţiile de funcţionare ale înfăşurărilor statorice ale generatorului sincron în coordonate (d,q), în regim tranzitoriu.
- *regimul dinamic al sistemului de excitaţie şi al regulatorului automat de tensiune*, care descrie condiţiile de variaţie în timp a t.e.m. din înfăşurarea de excitaţie.

Modelul matematic general

În principiu, studiul stabilităţii la mici perturbaţii porneşte de la sistemul de ecuaţii algebro-diferenţiale:

$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – ecuaţii diferenţiale

$0 = g(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – ecuaţii algebrice

pe care îl transformă într-un sistem redus care va conţine numai ecuaţii diferenţiale.

Noua formă a sistemului se obţine prin eliminarea restricţiilor descrise de ecuaţiile algebrice şi includerea lor într-o matrice de stare unică a sistemului.

Modelul matematic general

Sistemul de ecuaţii algebro-diferenţiale se liniarizeaza prin trecerea de la valorile absolute ale variabilelor de stare la creşterile finite ale acestora:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \cdot \Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}_0 \cdot \Delta\mathbf{y}$$
$$0 = \mathbf{C}_0 \cdot \Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}_0 \cdot \Delta\mathbf{y}$$

unde indicele 0 se referă la forma iniţială a sistemului. Prin eliminarea variabilelor algebrice de stare $\Delta\mathbf{y}$ din sistemul originar, se obţin succesiv relatiile care urmeaza.

Modelul matematic general

$$\Delta\mathbf{y} = -\mathbf{D}_0^{-1} \cdot \mathbf{C}_0 \cdot \Delta\mathbf{x}$$
$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \cdot \Delta\mathbf{x} - \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{D}_0^{-1} \cdot \mathbf{C}_0 \cdot \Delta\mathbf{x} = (\mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{D}_0^{-1} \cdot \mathbf{C}_0) \cdot \Delta\mathbf{x}$$

Se introduce notatia:

$$\mathbf{A} \equiv \mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{D}_0^{-1} \cdot \mathbf{C}_0$$

care conduce la sistemul unic de ecuatii diferentiale:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \Delta\mathbf{x}$$

Matricea **A** – **matricea de stare** a sistemului initial de ecuatii algebro-diferentiale.

Modelul matematic general

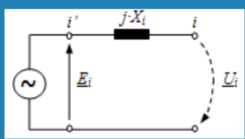
În funcţie de gradul de detaliere a modelului matematic, se deosebesc două cazuri:

- *stabilitate naturală* – se folosesc numai ecuaţiile diferenţiale asociate mişcării rotorului (cele care descriu regimul electromecanic) şi ecuaţiile algebrice generate pe baza bilanţului puterilor active şi reactive în nodurile reţelei electrice.
- *stabilitate artificială* – se adaugă şi restul ecuaţiilor menţionate: ecuaţiile diferenţiale asociate regimurilor dinamice electromagnetice şi regimului dinamic al sistemului de excitaţie şi RAT, respectiv ecuaţiile algebrice asociate înfăşurărilor statorice.

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Modelul matematic pentru sistemele complexe

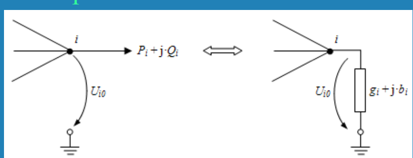
Reprezentarea generatorului sincron



Reprezentarea generatorului sincron în studiile de stabilitate, printr-o t.e.m. ($E_i = E_{q,i}$ sau $E'_{q,i}$) în spatele unei reactanțe ($X_i = X_{d,i}$ sau $X'_{d,i}$). $\underline{U}_i$ este tensiunea complexă la bornele generatorului sincron.

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Reprezentarea consumatorilor

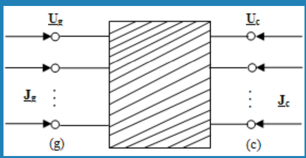


Liniarizarea sarcinilor (admitante sunt):

$$g_i = \frac{P_{i,0}}{U_{i,0}^2} \qquad b_i = -\frac{Q_{i,0}}{U_{i,0}^2} \qquad (\underline{y}_i = g_i + j \cdot b_i)$$

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Reprezentarea retelei de transport

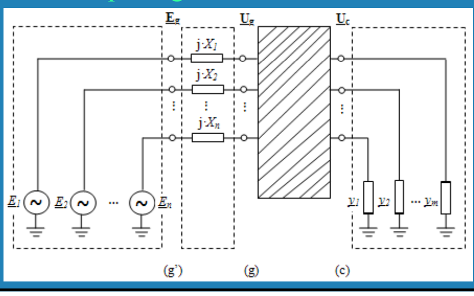


Ecuatia nodala partitionata dupa nodurile generatoare (g) si consumatoare (c).

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{gg} & \underline{\mathbf{Y}}_{gc} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{cg} & \underline{\mathbf{Y}}_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{g} \\ \underline{\mathbf{U}}_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{J}}_{g} \\ \underline{\mathbf{J}}_{c} \end{bmatrix}$$

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Multipolul generic al SEE în studiu



Modelul matematic pentru sistemele complexe

Noua forma a ecuatiei nodale (1/2):

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{g'g'} & \underline{\mathbf{Y}}_{g'g} & 0 \\ \underline{\mathbf{Y}}_{gg'} & \underline{\mathbf{Y}}^{R}_{gg} & \underline{\mathbf{Y}}_{gc} \\ 0 & \underline{\mathbf{Y}}_{cg} & \underline{\mathbf{Y}}^{R}_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{E}} \\ \underline{\mathbf{U}}_{g} \\ \underline{\mathbf{U}}_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{J}}_{g} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- $\mathbf{Y}_{g'g'}$ - matricea diagonală a admitanţelor generatoarelor conectate în nodurile (g'), cu proprietatea Y_{ii}=1/X_{ii}.
- $\mathbf{Y}_{gg'}$, $\mathbf{Y}_{g'g}$ - matricele admitanţelor interne ale generatoarelor, conectate între nodurile (g) şi (g'), cu proprietatea $(\mathbf{Y}_{gg'})^{T} = \mathbf{Y}_{g'g}$. În principiu, elementele matricelor $\mathbf{Y}_{g'g'}$ şi $\mathbf{Y}_{gg'}$, respectiv $\mathbf{Y}_{g'g}$ sunt egale şi cu semn schimbat.

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Noua forma a ecuatiei nodale (2/2):

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{g'g'} & \underline{\mathbf{Y}}_{g'g} & 0 \\ \underline{\mathbf{Y}}_{gg'} & \underline{\mathbf{Y}}^{R}_{gg} & \underline{\mathbf{Y}}_{gc} \\ 0 & \underline{\mathbf{Y}}_{cg} & \underline{\mathbf{Y}}^{R}_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{E}} \\ \underline{\mathbf{U}}_{g} \\ \underline{\mathbf{U}}_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{J}}_{g} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- $\mathbf{Y}^{R}{}_{gg}$ - forma recalculată a matricei de admitanţe $\mathbf{Y}_{gg}$ din relaţia initiala. Matricele $\mathbf{Y}^{R}{}_{gg}$ şi $\mathbf{Y}_{gg}$ diferă prin admitanţele asociate impedanţelor generatoarelor, $j \cdot X'_{g}$.
- $\mathbf{Y}^{R}{}_{cc}$ - forma recalculată a matricei de admitanţe $\mathbf{Y}_{cc}$ din relaţia initiala. Matricele $\mathbf{Y}^{R}{}_{cc}$ şi $\mathbf{Y}_{cc}$ diferă prin admitanţele $\underline{y}_{c}$ care înlocuiesc injecţiile de curenţi din nodurile consumatoare $\mathbf{J}_{c}$.

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Prin eliminarea necunoscutelor $\underline{\mathbf{U}}_{g}$ şi $\underline{\mathbf{U}}_{c}$ se obţine o formă redusă a sistemului de ecuatii nodale, care conţine ecuaţii numai pentru nodurile interne ale generatoarelor (g').

$$\underline{\mathbf{Y}}_{R} \cdot \underline{\mathbf{E}} = \underline{\mathbf{J}}_{g}$$

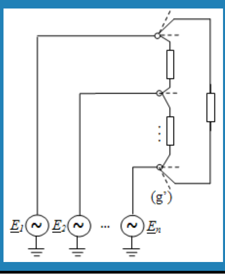
unde prin:

$$\underline{\mathbf{Y}}_{R} \overset{not}{=} \underline{\mathbf{Y}}_{g'g'} - \underline{\mathbf{Y}}_{g'g} \cdot [\underline{\mathbf{Y}}^{R}_{gg} - \underline{\mathbf{Y}}_{gc} \cdot (\underline{\mathbf{Y}}^{R}_{cc})^{-1} \cdot \underline{\mathbf{Y}}_{cg}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{Y}}_{gg'}$$

s-a notat matricea de admitante nodala redusa.

Modelul matematic pentru sistemele complexe

Schema echivalentă redusă la nodurile interne ale generatoarelor (g').



Caracteristicile unghiulare de putere ale GS în sistemele complexe

Caracteristicile unghiulare de putere ale GS în sistemele complexe

$$\underline{\mathbf{Y}}_R \cdot \underline{\mathbf{E}} = \underline{\mathbf{J}}_g \Rightarrow \underline{J}_i = \underline{Y}_{ii} \cdot \underline{E}_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{E}_k \qquad i = 1 \ldots n$$

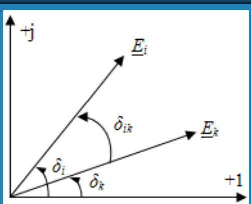
Notatii:

$$\underline{E}_i = E_i \angle \delta_i ; \quad \underline{E}_k = E_k \angle \delta_k ; \quad \underline{Y}_{ii} = Y_{ii} \angle -\psi_{ii} ; \quad \underline{Y}_{ik} = Y_{ik} \angle -\psi_{ik}$$

$$\underline{Z}_{ik} = Z_{ik} \angle \psi_{ik} \Rightarrow \underline{Y}_{ik} = 1 / \underline{Z}_{ik} = Y_{ik} \angle -\psi_{ik}$$

$$\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$$

Caracteristicile unghiulare de putere ale GS în sistemele complexe



Notatie:

$$\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$$

În aceste condiţii, puterea activă debitată de generatorul *i* se obţine ca:

$$P_i = \mathrm{Re}(\underline{S}_i) = \mathrm{Re}(\underline{E}_i \cdot \underline{J}_i^*) = \mathrm{Re}\left[\underline{E}_i \cdot (\underline{Y}_{ii}^* \cdot \underline{E}_i^* - \sum_{k=1, k \neq i}^{n} \underline{Y}_{ik}^* \cdot \underline{E}_k^*)\right]$$

Caracteristicile unghiulare de putere ale GS în sistemele complexe

$$P_i = \mathrm{Re}\left[Y_{ii} \cdot E_i^2 \cdot e^{j \cdot \psi_{ii}} - \sum_{k=1, k\neq i}^{n} Y_{ik} \cdot E_i \cdot E_k \cdot e^{j \cdot (\psi_{ik} + \delta_i - \delta_k)} \right]$$

$$P_i = Y_{ii} \cdot E_i^2 \cdot \cos \psi_{ii} - \sum_{k=1, k\neq i}^{n} Y_{ik} \cdot E_i \cdot E_k \cdot \cos(\psi_{ik} + \delta_{ik})$$

Caracteristicile unghiulare de putere ale celor n generatoare din sistem:

$$P_{e,i} = P_i = Y_{ii} \cdot E_i^2 \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{k=1, k\neq i}^{n} Y_{ik} \cdot E_i \cdot E_k \cdot \sin(\delta_{ik} - \alpha_{ik}) \qquad i = 1 \ldots n$$

Stabilitatea naturala a SEE

Stabilitatea naturala a SEE

... urmeaza ...

STABILITATEA LA MICI PERTURBATII A SISTEMELOR COMPLEXE