# SISTEME ELECTROENERGETICE

## Capitolul 6

## ESTIMAREA STARII SISTEMELOR

## Generalitati

**Starea sistemului**

Descrierea completa a starii unui SEE este posibila atunci cand se cunoaste **vectorul de stare** format din $2*N-1$ componente, dintre care $N$ sunt modulele tensiunilor celor $N$ noduri, $U_i$, iar $N-1$ sunt argumentele aceloraşi tensiuni, $\theta_i$; unul dintre nodurile din reţea este considerat ca referinţă, al cărui argument este nul (origine de fază).

## Generalitati

**Evaluarea vectorului de stare prin: Calcul de regim vs. Estimare starii**

Calculel regimului permanent de functionare (metodele Seidel-Gauss, Newton-Raphson) - daca se cunosc puterile active si reactive din noduri.

Estimararea starii - aproximarea regimului de funcţionare al sistemului, pe baza unor măsurători efectuate in retea.

## Generalitati

Erori la nivelul datelor de masura

- imprecizia aparatelor şi traductoarelor de măsură;
- nesimultaneitatea efectuării şi transmiterii măsurărilor;
- imprecizia de modelare a elementelor sistemului;
- absenţa unor măsurători (defectarea unor aparate sau traductoare de măsură sau a unor canale de transmitere a datelor) sau a unor telesemnalizări greşite (erori de topologie).

## Generalitati

**Pseudo - masuratori**

- O pseudo-măsurătoare reprezintă o mărime care nu a fost măsurată în timp real, dar despre a cărei valoare există anumite informaţii.
- Exemple de pseudo-masuratori:
  - modulul tensiunii impuse într-un nod generator;
  - injecţiile nule de puteri activă/reactivă într-un nod de transfer, fără consum sau producţie;
  - valori prognozate.

## Generalitati

**Functiile estimatorului de stare**

- Procesorul de topologie a reţelei.
- Analizorul de observabilitate.
- Estimatorul de stare propriu-zis.
- Modulul de procesare a datelor eronate.
- Modulul de procesare a datelor legate de structura şi parametrii sistemului.

## Functiile estimatorului de stare

**Procesorul de topologie a rețelei**

… preia datele privind stările întrerupătoarelor şi separatoarelor, necesare configurării schemei monofilare a sistemului monitorizat.

## Functiile estimatorului de stare

**Analizorul de observabilitate**

… determină dacă, folosind setul de măsurători existente, se poate determina o soluție pentru starea sistemului în ansamblu sau pe componente ale acestuia, dacă o asemenea soluție există.

## Functiile estimatorului de stare

**Estimatorul de stare propriu-zis**

… determină cea mai bună estimare a mărimilor de stare (modulele şi argumentele tensiunilor din noduri), pe baza modelului sistemului analizat şi a unor măsurători realizate în acest sistem. Se indica estimări pentru circulațiile de puteri pe laturi, ploturile de funcționare al transformatoarelor, nivelul sarcinilor din noduri şi gradul de încărcare al generatoarelor.

## Functiile estimatorului de stare

**Modulul de procesare a datelor eronate**

… detectarea erorilor grosolane în setul de date măsurate, respectiv identificarea şi eliminarea datelor eronate, în condiţiile existenţei unui grad de redundanţă suficient de mare în setul de date.

## Functiile estimatorului de stare

**Procesarea datelor legate de structura şi parametrii sistemului**

… asigură estimarea parametrilor generali ai sistemului, cum ar fi parametrii liniilor electrice, ploturile de funcționare ale transformatoarelor, parametrii bateriilor de condensatoare sau a bobinelor de reactanţă. De asemenea, acest sistem detectează erorile structurale din configuraţia reţelei şi identifică stările întrerupătoarelor care pot afecta precizia estimatorului de stare.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

$$[z]=\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdots \\ z_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} h_1(x_1,x_2,\ldots,x_n) \\ h_2(x_1,x_2,\ldots,x_n) \\ \cdots \\ h_m(x_1,x_2,\ldots,x_n) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdots \\ e_m \end{bmatrix}=h([x])+[e]$$

$[h]^T=[h_1([x])h_2([x])..h_m([x])]$, $h_i([x])$ - funcție neliniară ce exprimă măsurătoarea $i$ în funcție de vectorul variabilelor de stare $[x]$;

$[x]^T=[x_1 x_2 \ldots x_n]$ - vectorul celor $n$ mărimi de stare;

$[e]^T=[e_1 e_2 \ldots e_n]$ - vectorul erorilor de măsurare.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

Estimarea în sensul CMMP-P urmăreşte minimizarea funcției obiectiv:

$$J([x])=\sum_{i=1}^{m}[z_i-h_i([x])]^2\cdot w_i=[[z]-h([x])]^T\cdot[W]\cdot[[z]-h([x])]$$

unde $[W]$ este o matrice diagonală ale cărei elemente nenule coincid cu ponderile $w_i$ asociate fiecărei masuratori $z_i$.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

Se poate demonstra că cea mai bună estimare a variabilelor de stare $[x]$ se obține atunci când matricea de ponderare $[W]$ este egală cu inversa matricei de covarianță a erorilor de măsurare, în ipoteza că cele $m$ măsurători sunt independente:

$$[R]=Cov([e])=E([e]\cdot[e]^T)=diag(\sigma_1^2,\sigma_2^2,\dots,\sigma_m^2)$$

unde $\sigma_i$ este dispersia erorii măsurătorii $i$.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

În acest caz, funcția obiectiv devine:

$$J([x])=\sum_{i=1}^{m}[z_i-h_i([x])]^2/R_{ii}=[[z]-h([x])]^T\cdot[R]^{-1}\cdot[[z]-h([x])]$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

Minimizarea funcției obiectiv se poate realiza pe calea simplă a anulării simultane a derivatelor funcției $J$ în raport cu toate variabilele $x_i$, condiție care se poate scrie folosind notația matriceală:

$$g([x]) = \frac{\partial J([x])}{\partial [x]} = -2 \cdot H^T([x]) \cdot [R]^{-1} \cdot [[z] - h([x])]$$

unde $H([x]) = \left[\frac{\partial h([x])}{\partial [x]}\right]$ reprezintă matricea Jacobian a funcțiilor măsurătorilor.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Rezolvare pe cale iterativă**

Se consideră că la iterația $k$ se dispune de aproximația $[x]^k$ și se dorește deplasarea în soluția exactă $[x]$ prin aplicarea unei corecții $[\Delta x]^k$ la aproximația curentă: $[x] = [x]^k + [\Delta x]^k$.

Se admite că aproximația curentă se află în vecinătatea soluției exacte si se foloseste dezvoltarea în serii Taylor a funcției măsurătorilor $h$ în jurul aproximației curente, neglijând termenii neliniari:

$$h([x]) = h([x]^k + [\Delta x]^k) \approx h([x]^k) + H([x]^k) \cdot [\Delta x]^k$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Rezolvare pe cale iterativă - continuare**

Folosind această aproximare, abaterea între măsurătorile $[z]$ și valorile calculate $h([x])$ va fi:

$$[z] - h([x]) = [z] - h([x]^k) - H([x]^k) \cdot [\Delta x]^k$$

Notatie: $[z] - h([x]^k) \overset{not}{=} [\Delta z]^k$ - abaterea între măsurătorile $[z]$ și valorile calculate în iterația curentă. Rezulta:

$$H^T([x]^k) \cdot [R]^{-1} \cdot [[\Delta z]^k - H([x]^k) \cdot \Delta[x]^k] = 0$$

sau:

$$H^T([x]^k) \cdot [R]^{-1} \cdot H([x]^k) \cdot [\Delta x]^k = H^T([x]^k) \cdot [R]^{-1} \cdot [\Delta z]^k$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Rezolvare pe cale iterativă – continuare**

Notatie: $H^T([x]^k)\cdot[R]^{-1}\cdot H([x]^k)\overset{not}{=}G([x]^k)$

unde $G$ reprezintă *matricea de câştig* asociată aproximaţiei $[x]^k$. Prin rezolvarea acestui sistem de ecuaţii liniare se determină corecţiile $[\Delta x]^k$ care, aplicate aproximaţiei curente $[x]^k$, vor conduce la o nouă aproximaţie:

$$[x]^{k+1}=[x]^k+[\Delta x]^k$$

Procesul iterativ continua până la satisfacerea criteriului de oprire, de exemplu $Max\|[\Delta x]^k\|\leq\varepsilon$.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Algoritmul**

1. Precizarea datelor de intrare (pragul de convergenţă $\varepsilon$ şi numărul maxim de iteraţii $k_{max}$).
2. Stabilirea aproximaţiei iniţiale pentru vectorul de stare iniţial $[x^0]$ folosind valorile nominale sau 1 u.r. şi argumente nule pentru tensiunile nodale şi iniţializarea procesului iterativ ($k=0$);
3. Dacă $k > k_{max}$, procesul iterativ se încheie fără asigurarea convergenţei. În caz contrar, procesul de calcul se transferă la pasul 4.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Algoritmul - continuare**

4. Se calculează funcţiile măsurătorilor , matricea Jacobian a măsurătorilor şi matricea de câştig .
5. Se determină corecţiile $[\Delta x]^k$, prin rezolvarea sistemului de ecuaţii liniare.
6. Dacă $Max\|[\Delta x]^k\|\leq\varepsilon$ , se incrementează contorul de iteraţii ($k \leftarrow k + 1$) şi se revine la pasul 2. În caz contrar, algoritmul se încheie cu asigurarea convergenţei.

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic**

**Obiectiv**: stabilirea expresiilor de calcul pentru :

- Marimile masurate
- Termenii jacobianului

**Structura** vectorului de stare:

$$[x]^T = \left[ |\underline{U}_1| \;\; |\underline{U}_2| \;\; \ldots \;\; |\underline{U}_N| \;\; \theta_1 \;\; \theta_2 \;\; \ldots \;\; \theta_N \right]$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic - continuare**

**Puteri active si reactive nodale**

$$P_i = U_i \cdot \sum_{k=1}^{N} U_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik}) =$$
$$= G_{ii} \cdot U_i^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} U_i \cdot U_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

$$Q_i = U_i \cdot \sum_{k=1}^{N} U_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik}) =$$
$$= -B_{ii} \cdot U_i^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} U_i \cdot U_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic - continuare**

**Circulatii de puteri active si reactive pe laturi**

$$P_{ik} = U_i^2 \cdot (g_{io} + g_{ik}) - U_i \cdot U_k (g_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + b_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

$$Q_{ik} = -U_i^2 \cdot (b_{io} + b_{ik}) - U_i \cdot U_k (g_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - b_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic - continuare**

**Termenii Jacobianului (pentru masuratori P_i)**

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

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = U_i \cdot U_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} U_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik}) + 2 \cdot U_i \cdot G_{ii} = (P_i + G_{ii} \cdot U_i^2)/U_i$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_k} = U_i \cdot (G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic - continuare**

**Termenii Jacobianului (pentru masuratori Q_i)**

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

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = U_i \cdot U_k \cdot (-G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} U_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik}) - 2 \cdot U_i \cdot B_{ii} = (Q_i - B_{ii} \cdot U_i^2)/U_i$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_k} = U_i \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic - continuare**

**Termenii Jacobianului (pentru masuratori P_ik)**

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} = U_i \cdot U_k \cdot (g_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - b_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} = -U_i \cdot U_k \cdot (g_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - b_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial U_i} = -U_k \cdot (g_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + b_{ik} \cdot \sin\theta_{ik}) + 2 \cdot (g_{ik} + g_{i0}) \cdot U_i$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial U_k} = -U_i \cdot (g_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + b_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

## ES cu metoda celor mai mici pătrate ponderate

**Model matematic - continuare**

**Termenii Jacobianului (pentru masuratori P_ik)**

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_i} = -U_i \cdot U_k \cdot (g_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + b_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_k} = U_i \cdot U_k \cdot (g_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + b_{ik} \cdot \sin\theta_{ik})$$

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial U_i} = -U_k \cdot (g_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - b_{ik} \cdot \cos\theta_{ik}) - 2 \cdot (b_{ik} + b_{i0}) \cdot U_i$$

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial U_k} = -U_i \cdot (g_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - b_{ik} \cdot \cos\theta_{ik})$$

## Estimarea starii folosind masurari fazoriale

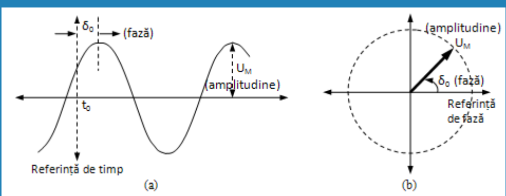
**Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate**

Una din cele mai moderne şi eficiente abordări folosite pentru monitorizarea şi controlul SEE.

Ea are la bază urmărirea fazorilor de tensiune în anumite noduri ale sistemului, corelate în cazul unor aplicaţii specifice şi cu măsurători ale fazorilor de curenţi.

## Estimarea starii folosind masurari fazoriale

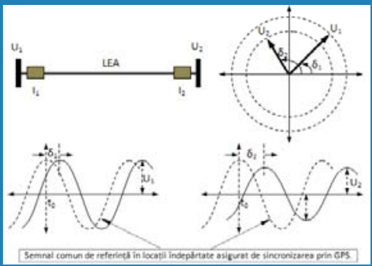
**Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate**



Reprezentarea fazorială (b) a unei mărimi sinusoidale (a).

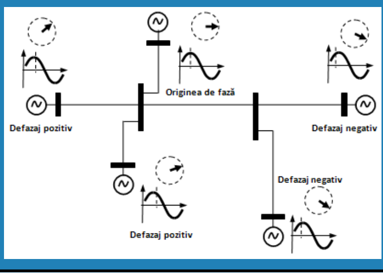
## Estimarea starii folosind masurari fazoriale

### Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate



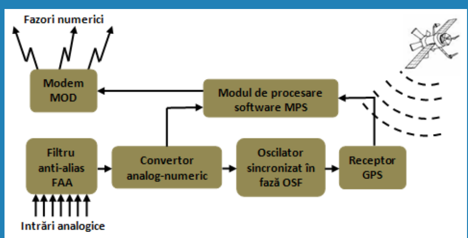

## Estimarea starii folosind masurari fazoriale

### Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate



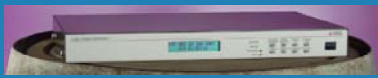

## Estimarea starii folosind masurari fazoriale

### Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate



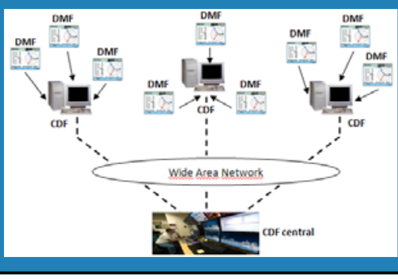
# Estimarea starii folosind masurari fazoriale

**Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate**



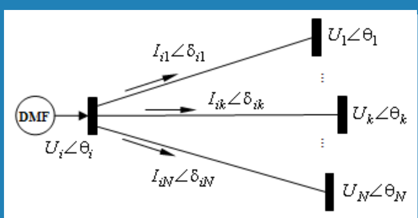
# Estimarea starii folosind masurari fazoriale

**Introducere in tehnologia masurarilor fazoriale sincronizate**



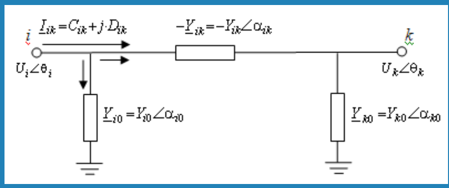

# Includerea DMF in estimatorul de stare

**Cazul utilizării unui DMF într-o rețea generică cu *N* noduri.**



## Includerea DMF in estimatorul de stare

**Includerea masuratorilor de curenti pe laturi**




## Includerea DMF in estimatorul de stare

**Includerea masuratorilor de curenti pe laturi**

$$C_{ik}=I_{ik}\cdot\cos\delta_{ik}=\mathrm{Re}(\underline{U}_i\cdot\underline{Y}_{i0}-\underline{Y}_{ik}\cdot(\underline{U}_i-\underline{U}_k))=$$
$$=U_i\cdot Y_{i0}\cdot\cos(\theta_i+\alpha_{i0})+U_k\cdot Y_{ik}\cdot\cos(\theta_k+\alpha_{ik})-$$
$$-U_i\cdot Y_{ik}\cdot\cos(\theta_i+\alpha_{ik})$$
$$D_{ik}=I_{ik}\cdot\sin\delta_{ik}=\mathrm{Im}(\underline{U}_i\cdot\underline{Y}_{i0}-\underline{Y}_{ik}\cdot(\underline{U}_i-\underline{U}_k))=$$
$$=U_i\cdot Y_{i0}\cdot\sin(\theta_i+\alpha_{i0})+U_k\cdot Y_{ik}\cdot\sin(\theta_k+\alpha_{ik})-$$
$$-U_i\cdot Y_{ik}\cdot\sin(\theta_i+\alpha_{ik})$$

# SFARSIT