Estimace stavu elektrizační soustavy

- RNDr. Bohumil Sadecký, CSc.
- Specialista – skupina EMS ČEPS

- Doc. Ing. Eduard Janeček CSc.
- Vedoucí oddělení – Informační a řídící systémy,
- Katedra kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni

Obsah

- Úvod – co je estimace stavu ES
- Statická estimace stavového vektoru ES, matematický model a metoda
- Pozorovatelnost stavu ES a její ověření
- Detekce a identifikace chybných hodnot ve vektoru měření
- Možnosti využití synchronních měření fázorů napětí a proudu pro estimaci stavu ES
- Několik poznámek k možnosti dynamické estimace stavu ES
- Závěr - význam estimace v dispečerském řídicím systému

Úvod – co je estimace stavu ES

balancování, odhad

Estimace stavu ES - nutná součást informačního systému dispečinku

- Program pro **odhad stavu** (State Estimation), tzv. estimátor, je nezbytnou součástí informačního systému dispečinku (EMS).
- Zpracovává dálková měření ze soustavy, která jsou zatížena chybami různého druhu a velikosti, a provádí **verifikaci, filtraci a korekci** všech měřených veličin reálného času a dopočet veličin neměřených.
- Estimátor využívá **nadbytečnosti** souboru měření k tomu, aby odhalil a opravil velké chyby měření a chyby v topologii sítě, zpřesnil měřené hodnoty a dopočítal hodnoty neměřené.
- Vytváří **databázi estimovaných veličin**, která na rozdíl od databáze měření poskytuje spolehlivý, dostatečně přesný, úplný a fyzikálně konzistentní obraz o stavu řízené soustavy (odhad stavu).

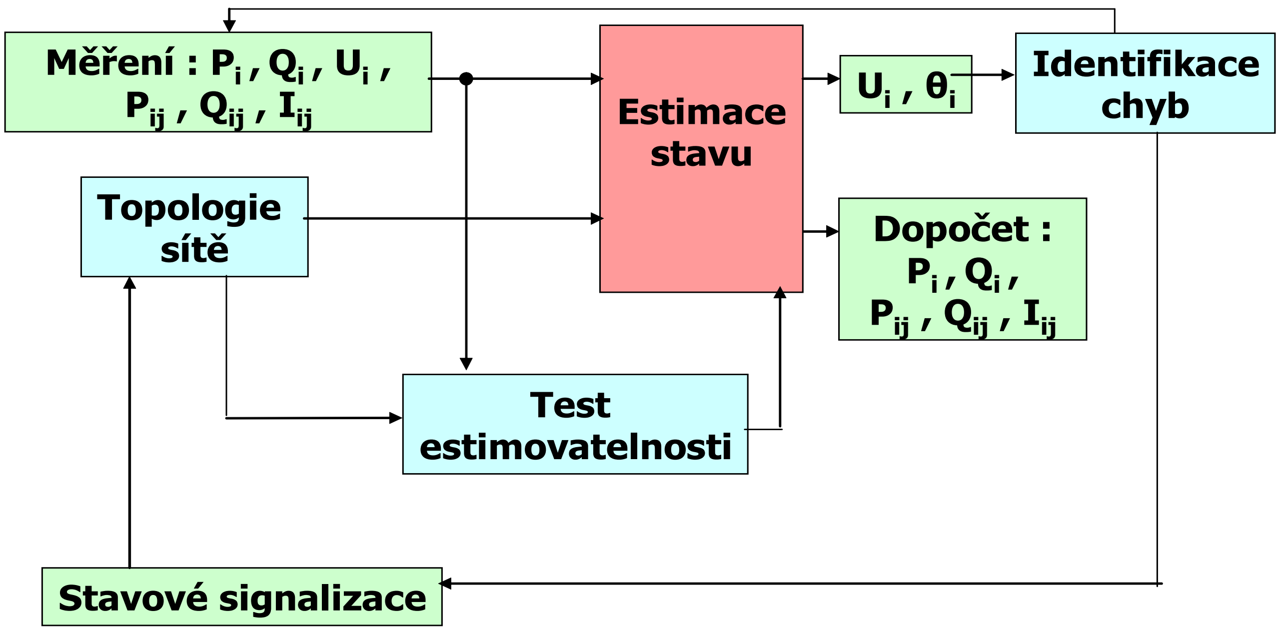
Estimace stavu ES - nutná součást informačního systému dispečinku

- **Vstup** : měření (P,Q,U,I,odbočky) -signály zatížené chybami
- **Výstup** :
  - ověřené, zpřesněné, dopočtené hodnoty veličin (P,Q,U,I,θ,odbočky)
  - seznamy chyb měření
  - verifikované stavy topologie

Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855)

Fred C. Schweppe (1970)

Estimace – schéma postupu



Základní funkční bloky estimátoru

- Sestavení **topologie** sítě
- Předběžná **verifikace měření** (filtr nejhorších chyb)
- Kontrola **pozorovatelnosti**
- Vlastní **estimace stavu**
- **Chod sítě** z esimovaných stavů
- **Detekce a identifikace chyb** analýzou reziduí
- **Analýza nekonzistence topologie** sítě
- **Statistiky** výsledků

Estimace - metody

- **Statická estimace** - metoda vážených nejmenších čtverců - zpracovává jeden časový snímek a používá rovnice ustáleného chodu sítě
- **Dynamická estimace** - Kalmanův filtr v různých modifikacích, zpracovává i historii stavu, trend a predikci, vyžaduje dynamický model

- Kam směřují implementace: využít rychlost současných algoritmů a použitého HW a provádět on-line estimaci každého datového vzorku v cyklu kolem 1 sekundy - **estimace jako SCADA funkce**

Statická estimace stavového vektoru ES
Matematické modely

Jednorázová bez apriorní informace

Použité matematické modely

- Modely jednotlivých **zařízení** (vedení, trafa – obvykle Π-článek, zdroje, pole rozvoden)
- Model **elektroenergetické sítě** (graf sítě, jednopólové schéma) - „breaker - oriented“ spínačový model se převádí na „bus - oriented“ model obvyklý pro výpočty
- Model **měření** (vztahy mezi měřenými a stavovými veličinami)
- Statistický model **reziduí** (náhodné chyby vznikající v měřicím řetězci,v nesoudobosti,chybě parametrů …, normální rozdělení)
- Model **dynamiky** (přechod t → t+1)

Model sítě – stavové veličiny

Stavový vektor – komplexní uzlová napětí

$$\overline{U}_i = U_i \exp(j\theta_i) = e_i + jf_i$$

$$\mathrm{i} = 1, \ldots, \mathrm{N}$$

N je počet uzlů

$$\theta_1 = f_1 = 0$$

Referenční uzel

$$x = (\mathrm{U}_1, \ldots \mathrm{U}_\mathrm{N}, \theta_2, \ldots \theta_\mathrm{N})^\mathrm{T}$$

Goniometrický tvar

$$x = (\mathrm{e}_1, \ldots \mathrm{e}_\mathrm{N}, \mathrm{f}_2, \ldots \mathrm{f}_\mathrm{N})^\mathrm{T}$$

Kartézský tvar

$$x = (x_1, \ldots, x_n)^T$$

Model vedení sítě a zařízení

- Závislé **měřené veličiny**
  - P_{ik}, Q_{ik} – toky P,Q na větvích sítě
  - P_i, Q_i – injektované výkony v uzlech
  - I_{ik} – proudy na větvích
  - U_i – napětí v uzlech
  - Θ_i – úhly uzlových napětí
- **Větve** (vedení, transformátory) jsou modelovány jako Π-článek s parametry

  $Z_{ik} = R_{ik} + jX_{ik}$ (podélná impedance)

  $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$ (příčná admitance)

- Modely **transformátorů** (dvou- a trojvinuťových)
- Modely **speciálních zařízení** (Phase - shifter, zařízení FACTS)

Model měření - rovnice

Rovnice **ustáleného stavu** pro toky na větvích sítě

$$\boxed{\begin{aligned}P_{ik} = U_i^2 G_{ik}/2 + U_i^2 \gamma_{ik} - \\ U_i U_k[\gamma_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k) + \beta_{ik}\sin(\theta_i - \theta_k)]\end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned}Q_{ik} = -U_i^2 B_{ik}/2 - U_i^2 \beta_{ik} - \\ U_i U_k[\gamma_{ik}\sin(\theta_i - \theta_k) - \beta_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k)]\end{aligned}}$$

$$\gamma_{ik} = \mathrm{R}_{ik} / (\mathrm{R}^2_{ik} + \mathrm{X}^2_{ik})$$

$$\beta_{ik} = -\mathrm{X}_{ik} / (\mathrm{R}^2_{ik} + \mathrm{X}^2_{ik})$$

Rovnice pro **injektované výkony** v uzlech

$$\mathrm{P_i} = \sum_{k \in \omega_i} P_{ik} \qquad \mathrm{Q_i} = \sum_{k \in \omega_i} Q_{ik}$$

ωi - množina všech uzlů incidentních s uzlem **i**

Rovnice pro **měření U a úhlů** jsou identity

Model měření a jeho rezidua

- **Vektor měření** $(\ldots P_{ik} \ldots Q_{ik} \ldots P_i \ldots Q_i \ldots U_i)$

  počet měření = m

  h = nelineární funkce – viz rovnice měření

  v = vektor rezidua

  - normální rozdělení
  - nulová střední hodnota
  - rozptyly – diagonála kovarianční matice $E(vv^T)$
  - m / (2N-1) je redundance měření

$$z = h(x) + v$$ Rovnice modelu měření

$$R = E(vv^T)$$ **Kovarianční matice** rezidua

$$R^{-1}$$ **Váhová matice** rezidua (diagonální při nekorelovaných reziduech)

Model dynamiky

Dynamická estimace pracuje s časovou posloupností měření $z(t_i)$ a potřebuje model dynamiky stavového vektoru

$$x(t_{i+1}) = G_i\left[x(t_i)\right] + w(t_i)$$

G … přechodová funkce

w … vektor šumu dynamiky

Jednorázová estimace stavového vektoru
Metoda a algoritmus

NR

Metoda vážených nejmenších čtverců (WLS)

Cíl metody WLS : najít estimovaný stavový vektor x,
který minimalizuje kriteriální funkci n proměnných J(x)

$$\hat{z} = h(\hat{x})$$

Estimace vektoru měření z

$$\left\| z - \hat{z} \right\| = \left\| z - h(\hat{x}) \right\|$$

Kvadratická norma rozdílu měření - estimace

$$J(x) = \left\| z - h(x) \right\| = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\sigma_i^2} \left[z_i - h_i(x) \right]^2$$

$$J(x) = \left[z - h(x) \right]^T R^{-1} \left[z - h(x) \right]$$

Kriteriální funkce

Minimalizace kriteriální funkce

Nutná podmínka – nulovost parciálních derivací

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x_i} = 0 \qquad \text{i = 1,…n}$$

$$gradJ\ (x) = \left(\frac{\partial J(x)}{\partial x_1}, \ldots, \frac{\partial J(x)}{\partial x_n} \right)^T = 0$$

Vede na systém nelineárních rovnic

$$H^T(x)R^{-1}\left[z - h(x)\right] = 0$$

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \qquad h_{ij}(x) = \frac{\partial h_i(x)}{\partial x_j}$$

H - Jakobián m/n , i = 1,…n, j =1,….m,   m>n

Algoritmus hledání minima (Newton – Raphson)

Joseph Raphson (1648-1715), Isaac Newton(1643-1727), Brook Taylor (1685-1731)

$$H^T(x^0)R^{-1}\left[z - h(x^0)\right] - \left[H^T(x^0)R^{-1}H(x^0)\right]\left(x - x^0\right) = 0$$

Linearizace systému rovnic v bodě x^0 (Taylor)

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

$$\Delta z^0 = z - h(x^0)$$

$$\Delta x^0 = x - x^0$$

z = známý vektor měření

x = neznámý vektor stavu

x^0 = počáteční iterace

Algoritmus hledání minima

Řešení systému lineárních rovnic

$$A(x^0) = H^T(x^0)R^{-1}H(x^0)$$ matice systému

$$\Delta x^0 = A(x^0)^{-1}H^T(x^0)R^{-1}\Delta z^0$$

Iterační proces

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + A(\hat{x}^k)^{-1}H^T(\hat{x}^k)R^{-1}\Delta z^k$$

$$\Delta z^k = z - h(\hat{x}^k)$$

Podmínka konvergence $\left\|\hat{x}^{\mathrm{k+1}} - \hat{x}^k\right\| < \varepsilon$

Detekce a identifikace chybných hodnot ve vektoru měření

rezidua

Typy chyb v informacích o stavu ES

- **Náhodné chyby měření** v rámci přesnosti měřících přístrojů
- **Chyby v parametrech** použitých modelů, především chyby některých konstant, jako admitance větví, převody transformátorů
- **Velké neočekávané chyby měření**; příčinou jejich vzniku mohou být výpadky a poruchy dálkových měření, nesynchronnosti měření, …
- **Chyby ve struktuře** použitých modelů, především chyby v konfiguraci sítě.
- Chybějící zařízení v modelu, **neadekvátní model** (ekvivalent okolí)

Detekce, identifikace a korekce velkých chyb měření

- **Detekce** - je či není v souboru měření hrubá chyba?
- **Identifikace** - které měření má hrubou chybu?
- **Korekce** - jak dopočítat správnou hodnotu?

- Vše závisí na úrovni **pozorovatelnosti** (estimovatelnosti) soustavy - globální a lokální.
- Soustava je **pozorovatelná**, když lze ze souboru měření pomocí estimace jednoznačně určit její stavový vektor.

Detekce a identifikace velkých chyb měření

$$J(\hat{x}) < \chi^2_{m-n,\alpha/2}$$

Detekce – **chí kvadrát test**

$$r = z - \hat{z}$$

Reziduální vektor

$$r_i = \frac{\left| z_i - \hat{z}_i \right|}{\sigma_i}$$

Identifikace – **test vážených reziduí**

$$\left| r_i \right| < N_{\alpha/2}$$

Gaussovo rozdělení
N(0,1)

Detekce anomálií v topologii

úloha analyzuje :

- **Rozpad rozvodny** na více uzlů
- **Izolované uzly** a **ostrovy** sítě
- **Nesoulad měření** se stavem zapojení
- **Vypnuté větve** sítě
- Podezřelé hodnoty **převodů traf**

- Anomální stavy jsou prezentovány a uživatel rozhodne o jejich příčině (skutečný stav nebo chyba)

Verifikace topologie, oprava chyb stavů spínacích prvků

Modul identifikuje **topologické chyby**, jako jsou nezaznamenané změny stavu spínacích prvků , nesynchronnosti mezi časem příchodu změny stavu a změny analogové hodnoty, atd. Tyto chyby se obvykle projeví jako skupina podezřelých hodnot měření.

V případě zjištění skupiny podezřelých hodnot měření se provádí **lokální analýza** spínačového modelu v postižené zóně s cílem nalézt a opravit eventuelní chybu topologie.

Kontrola plausibility měření

- Jednoduchými kontrolami před vlastní estimací lze odhalit část topologických chyb i chyb měření a prověřit **konzistenci dat** (dokončení spínacích postupů).

- Kontrolní prostředky :
  - diskriminační schopnost ruziduálního vektoru
  - uzlové bilance P,Q
  - porovnání hodnot měření na protilehlých koncích větve
  - porovnání hodnot výkonů a stavů zapojení
  - kontrola podmínek ve tvaru rovností a nerovností.

Pozorovatelnost stavu ES a její ověření

invertovatelnost

Test pozorovatelnosti

- **Globální redundance** měření = m/n = m/(2N-1) > 1,   (např.ČEPS kolem 2.5 = 3000 / 1200)
- Globální redundance nestačí pro pozorovatelnost, záleží na rozložení měření v síti, mění se v závislosti na stavu telemetrií.
- Síť je **pozorovatelná**, když soubor měření postačuje k estimaci všech komplexních uzlových napětí a toků P,Q po větvích. Všechny její uzly a větve jsou pozorovatelné.
- **Pozorovatelný ostrov** = podmnožina uzlů a větví sítě, která je pozorovatelná.
- Testem pozorovatelnosti se v síti vymezí pozorovatelné a nepozorovatelné ostrovy. Ideální stav – celá síť je jeden pozorovatelný ostrov.
- Některé uzly patří do pozorovatelného i nepozorovatelného ostrova (**mezní uzly**)
- Nelze estimovat síť, která nesplňuje test pozorovatelnosti ($\Rightarrow$ **singularita** v matici soustavy rovnic)

Možnosti využití synchronních měření fázorů napětí a proudu pro estimaci stavu ES

Pevné body (i po posuvech v důsledku rozdělování reziduí)

Možnosti dekompozice na estimaci části sítí

Je současná estimace dostatečně spolehlivá ?

Ze zkušeností s klasickými estimátory v USA
se uvádí v průměru cca 90 % spolehlivost ⇒
hledají se cesty k přiblížení 100 % spolehlivosti

Nadějná cesta : využití synchronních měření fázorů
napětí a proudů

Varianty:

1 – Rozšíření klasické statické estimace – **hybridní algoritmus**
2 – Následná estimace (**postprocessing**)
3 – **Decentralizovaná** estimace

V ideálním případě přechod:
estimace stavu ➔ měření stavu

Synchronní měření fázorů U,I

- Primárně určeno pro usnadnění detekce nebezpečných stavů v soustavě a beznárazové spínání
- Fázorová měření z instalovaných PMU mají v distribučních sítích výrazný přínos pro estimaci, protože rezidum se rovná skutečné chybě měření nezvýšené o chyby soudobosti měření a chybu vlivu nepřesných parametrů admitance v „rovnici měření“.
- Jejich význam je zásadní pro identifikaci parametrů (impedancí, admitancí) modelů větví sítě a tím na přesnost následných výšších dispečerských fukcí (optimalizace ztrát, kontigenční analýza N-1)
- Měří se obvykle napětí a proudy v jednotlivých fázích
- Synchronizace s přesností 1 μs
- Synchronní fázory se převádějí na relativní vůči zvolenému referenčnímu bodu
- Měřené fázory (velikost U, úhel θ) se přidávají k běžným dispečerským měřením
- Měření fázorů má nesrovnatelně větší váhu v důsledku malé hodnoty rezidua

Synchronní měření fázorů napětí

$$U_m\left[\cos(\omega t+\theta)+j\sin(\omega t+\theta)\right]=X_{\mathrm{Re}}+jX_{\mathrm{Im}}$$

$$\mathbf{z}_p = \begin{bmatrix} \mathrm{P}_{\mathrm{ij}} \\ \mathrm{P}_{\mathrm{i}} \\ \theta_{\mathrm{i}} \end{bmatrix}$$

P_{ij} ... toky P na větvích

P_i ... injekce P na uzlech

θ_i ... fázové úhly napětí

$$\mathbf{z}_q = \begin{bmatrix} \mathrm{Q}_{\mathrm{ij}} \\ \mathrm{Q}_{\mathrm{i}} \\ \mathrm{U}_{\mathrm{i}} \end{bmatrix}$$

Q_{ij} ... toky Q na větvích

Q_i ... injekce Q v uzlech

U_i ... moduly napětí

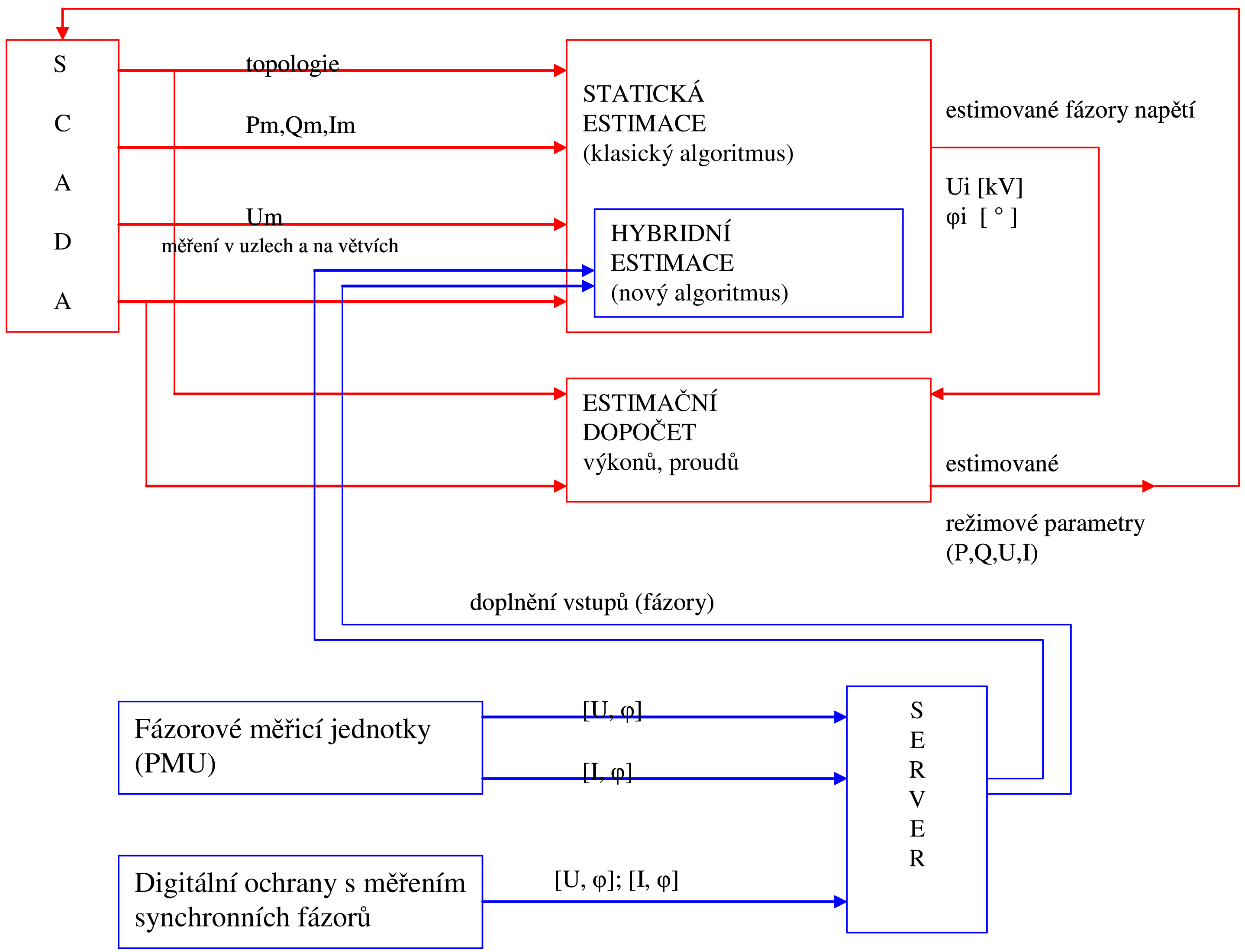
Vektor měření je rozšířen o U_i, θ_i

Složky vektoru h(x) jsou identity

Prvky jakobiánu jsou jedničky a nuly, případně -1

Je-li měřen fázor proudu i napětí, lze z nich určit pseudoměření výkonů P,Q

Rozšíření estimace – hybridní algoritmus



Možné další aplikace – decentralizovaná estimace („Superkalibrátor“)

- Estimuje se paralelně na jednotlivých rozvodnách v rámci jejich řídicího systému, vždy oblast obsahující rozvodnu a její okolí 1.řádu
- V každé takové oblasti musí být aspoň jedna PMU
- Okamžik sejmutí dat na rozvodnách je synchronizován pomocí PMU
- Využívají se všechna dostupná měření – synchronní fázory, klasická SCADA měření
- Estimované stavy jednotlivých oblastí se přenášejí na dispečink a tam spojují do estimovaného stavu soustavy s kontrolou konzistence, možnost převedení z třífázového modelu na model sousledné složky
- Je dosaženo globální synchronizace estimovaných hodnot

$\Rightarrow$ **Základním cílem je eliminovat vliv chyb v měřicích řetězcích**

Několik poznámek k možnosti dynamické estimace stavu ES

Kalman

Apriorní informace a aposteriorní korekce

Kontinuální estimace v reálném čase

- Cíl: monitorovat stav ES s intervalem kolem 1 s
- Opakování statické estimace při několika stech až tisících uzlů je časově náročné
- Statická estimace – pracuje jen se snímkem $z(t) \rightarrow x(t)$
- **Dynamická estimace** – model dynamiky + historie

  …..$x(t-2), x(t-1), z(t) \quad \rightarrow \quad x(t)$
- Výhody DSE:
  - Pracuje kontinuálně s malým $\Delta t \approx 1$ s
  - Schopnost krátkodobé predikce x,z $\Rightarrow$ prevence nebezpečných stavů, identifikace náhlých změn v soustavě $\times$ chyby topologie
  - Vyšší redundance $\Rightarrow$ lepší detekce chyb měření
  - Lepší přesnost odhadu
  - Snížení vlivu chyb měření $\Rightarrow$ větší robustnost

Model dynamiky

Dynamická estimace pracuje s časovou posloupností měření $z(t_i)$ a potřebuje model dynamiky stavového vektoru

$$x(t_{i+1}) = f_i\left[x(t_i)\right] + w(t_i)$$

$$z(t_i) = h(x(t_i)) + v(t_i)$$

f … přechodová funkce

w … šumu dynamiky

Zjednodušení na lineární modvektor el:

$$x_{k+1} = F_k x_k + \Gamma_k \xi_k$$
$$z_{k+1} = H_k x_{k+1} + \Delta_k \eta_k$$

Kalmanův filtr (Rudolf Emil Kalman , *1930]

Model apriorní $\hat{x}_0$ a jeho chyba Σ_0

Predikce stavu $$\bar{x}_{k+1} = F_k \hat{x}_k$$

$$K_{k+1} = (F_k \ \Sigma_k H^T + \Gamma_k \Delta_k{}^T \left[H \ \Sigma_k H^T + \Delta_k \Delta_k{}^T \right]^{-1}$$

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1} \left[z_{k+1} - h(\bar{x}_{k+1}) \right]$$

Kovarianční matice v k+1

$$\Sigma_{p(k+1)} = F_k \Sigma_k F^T{}_k + \Gamma_k . \Gamma_k^T$$

$$\Sigma_{k+1} = \Sigma_{p(k+1)} - K_k \left[H \ \Sigma_k H^T + \Delta_k \Delta_k{}^T \right]$$

Závěr - význam estimace v dispečerském řídicím systému

Nejméně rozporné veličiny z hlediska bilancí

Požadované vlastnosti estimátoru

- Spolehlivost – vždy dá výsledky
- Robustnost
- Rychlost
- Nenáročná obsluha
- Prezentační vrstva
- Využití existujících modelů a dat
- Adaptivita
- Možnost zařadit do Scady
- Nástroje pro dohled a údržbu
- Využitelnost výsledků

Co ovlivňuje robustnost estimace :

- Vliv hrubých chyb měření (výpadky, ruční vstupy, chyby převodníků,…)
- Nižší přesnost a kvalita některých měření (Q)
- Vliv chyb topologie (práce v síti, výpadky signálů)
- Nedostatky modelu (ekvivalenty,…)
- Vliv chyb v parametrech sítě (závislost na teplotě, stáří, spojky, vlhkost vzduchu, korona, dvojpotahy, parametry transformátorů)
- Nepozorovatelné oblasti uvnitř soustavy
- Nesoudobost vstupů (vliv delta kritérií, data ze zahraničí)
- Kritická měření
- Statistika chyb a korekce rozptylů (váhy měření)

Estimace - přínosy pro uživatele

- Spolehlivá, úplná, dostatečně přesná a konzistentní **databáze hodnot „reálného času“**

  a) pro přímé uživatele - **monitorování** reálného stavu

  b) pro navazující **EMS funkce** - simulace nad reálnými daty

  - optimalizace, regulace
  - **kontingenční analýza**

- Možnost získat i **neměřené údaje** (fázové úhly, ztráty)
- Eliminace rizika zkreslení výsledků výpočtů v RČ
- Možnost cílené **údržby telemechaniky** na základě detekce velkých chyb měření
- Využívání snímků reálného času v jiných systémech

Estimace a trh s elektrickou energií

“.... Estimace stavu elektrizační soustavy bude hrát klíčovou roli ve vznikajících scénářích deregulované elektroenergetiky. Důležitá tržní rozhodnutí budou založena na přesné znalosti aktuálního stavu soustavy...„

Alcir Monticelli (1946 – 2001) : z úvodu ke knize

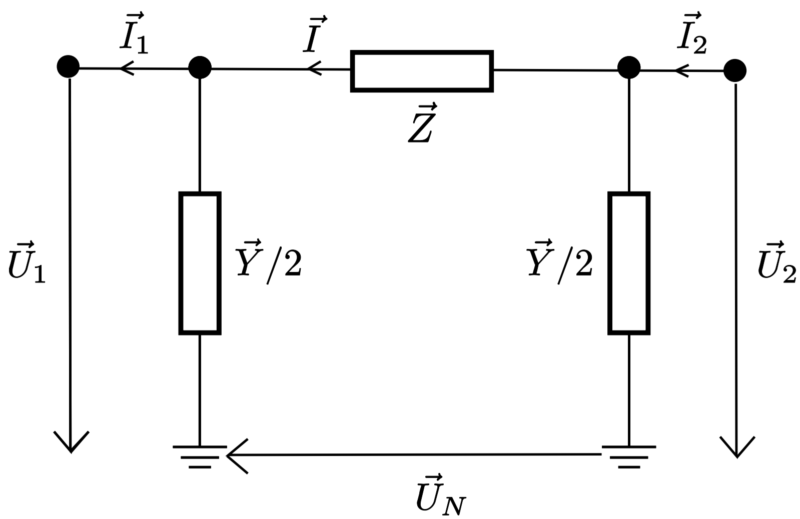
STATE ESTIMATION IN ELECTRIC POWER SYSTEMS,

Význam spolehlivé estimace v tržních podmínkách vzrůstá

- Variabilní výkonové transakce
- Kruhové toky , neobvyklé přenosy
- Vyšší zatížení větví
- Větší význam kontroly statické i dynamické bezpečnosti – blackouty
- Vyšší význam přesné znalosti aktuálního stavu soustavy
- Nutno sledovat propojení – koordinační centrum propojených soustav
- Výměna dat mezi soustavami

$\Rightarrow$ Možnost maximálně využít přenosovou kapacitu
$\Rightarrow$ Nutnost kontrolovat podmínky bezpečnosti – odolnost vůči událostem
$\Rightarrow$ Pro obojí je estimace nepostradatelným zdrojem vstupních dat

Identifikace parametrů vedení



- Měření $\vec{U}_1, \vec{U}_2, \vec{I}_1, \vec{I}_2$
- Neznámé $\vec{Z}, \vec{Y}, \vec{I}, \vec{U}_N$
- Rovnice pro identifikaci:

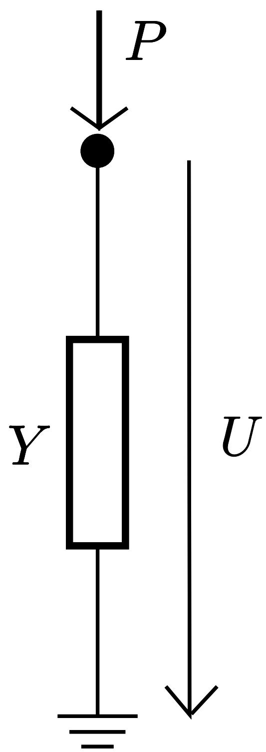
$$\vec{I}_2 - \vec{I}_1 - \frac{\vec{Y}}{2}\left(\vec{U}_1 + \vec{U}_2\right) = 0$$

$$\vec{Z} \cdot \vec{I} + \vec{U}_1 - \vec{U}_2 - \vec{U}_N = 0$$

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \frac{\vec{Y}}{2}\vec{U}_1$$

$$\vec{I} = \vec{I}_2 - \frac{\vec{Y}}{2}\vec{U}_2$$

Příklad klasické metody



- Měřené *P*, estimované *U*

  $$YU^2 - P = e$$

- *Numerické řešení*