

# Návrh robustných stabilizačných spätných väzieb – PSS – k regulátorom turboagregátu

Vojtech Veselý, Ladislav Harsányi

Elektrizačná sústava je veľmi náchylná ku vzniku trvalých netlmených kmitov, ktoré ohrozujú kvalitu dodávanej elektrickej energie, stabilitu systému ako celku a skracujú aj životnosť technologických zariadení. Veľmi účinne sa dá týmto javom predísť napr. návrhom parametrov regulátorov jednotlivých podsystémov na základe dominantnosti (aktivity) podsystémov a doplnením regulačných obvodov budenia synchronných generátorov a regulátorov výkonu turbín stabilizačnými spätnými väzbami.

## Úvod

Elektrizačná sústava patrí v súčasnosti medzi najväčšie a najzložitejšie technické systémy. V tejto práci budeme venovať pozornosť otázkam zabezpečenia stability elektrizačnej sústavy a návrhu robustných stabilizačných spätných väzieb, ktoré významným spôsobom zvyšujú spoľahlivosť prevádzky elektrizačnej sústavy. Jednotlivé prístupy k riešeniu daného problému sú:

- a) Na základe vlastností matematického modelu zložitej sústavy sa uskutoční jednak analýza stability a zároveň aj syntéza príslušných regulátorov.
- b) Riešenie danej úlohy sa uskutoční s využitím princípu dominantnosti subsystémov a pomocou znalosti matematického modelu iba subsystémov. Pomocou modelovania a simulácie alebo experimentom na reálnom systéme sa overia očakávané výsledky.
- c) Využívajú sa inžinierske metódy nastavovania parametrov regulátorov, a to najprv na modeli, a potom, pomocou experimentu, aj na reálnom procese. Tam sa postupne dolaďujú parametre regulátorov tak, aby sa dosiahla želaná kvalita regulácie. Je potrebné zdôrazniť, že v tomto prípade sa „intuitívne“ využíva najmä princíp dominantnosti subsystémov.

Aj v tomto príspevku využijeme princíp dominantnosti subsystémov na návrh robustných stabilizačných spätných väzieb, a to pre regulátory budenia synchronných generátorov, ako aj pre regulátory výkonu turbín. Matematické modely subsystémov získame experimentálnou cestou.

Princíp dominantnosti podsystémov využíva skutočnosť, že aktívnymi zložkami v zložitom systéme sú práve podsystémy. Interakčné väzby medzi podsystémami sú sice pasívne, ale ide o dynamické väzby, a preto môžu na základe svojich veľkostí a nimi vyvolaných fázových posunov vyvolať nestabilitu celého systému aj v prípade, keď všetky podsystémy sú stabilné. Výberom parametrov regulátorov je však možné významným spôsobom meniť kvalitatívne vlastnosti jednotlivých podsystémov, a tým potlačiť vplyv interakčných väzieb na celkovú stabilitu systému. Ak sa bude zvyšovať kvalita dynamických procesov v jednotlivých podsystémoch, tak sa v danom zložitom systéme budú stávať dominantnými. Zvyšovanie kvality

dynamických procesov v podsystémoch pri nezmenených vlastnostiach interakčných väzieb vedie zároveň k zvyšovaniu kvality dynamických procesov v celom zložitom systéme.

Reálna prax ukazuje, že v elektrizačnej sústave môžu vznikaf oscilácie v širokom rozsahu zmien frekvencie (od 0,2 Hz až do 3 Hz). Genéza ich vzniku je však veľmi zložitá. Ak sa na vstup podsystému pripojí harmonický signál zadanej frekvencie a amplitúdové zosilnenie podsystému pri danej frekvencii je väčšie ako jedna, potom na výstupe podsystému sa objaví tento harmonický signál so zväčšenou amplitúdou. Obdobne, ak v elektrizačnej sústave vzniknú oscilácie určitej frekvencie a zosilnenie turboagregátu pri danej frekvencii je väčšie ako jedna, je prirodzené, že uvedený turboagregát bude tieto oscilácie zosilňovať. V prípade že zosilnenie turboagregátu je menšie ako jedna, potom tento turboagregát bude oscilácie v elektrizačnej sústave potláčať. Preto cieľom návrhu stabilizačných spätných väzieb k regulátorom budenia synchronných generátorov a regulátorom výkonu turbín je, aby amplitúdová frekvenčná charakteristika daného turboagregátu v elektrizačnej sústave v predpokladanom rozsahu frekvencií ležala pod jednotkovou hodnotou zosilnenia.

Návrh stabilizačných spätných väzieb má byť realizovaný tak, aby v predpokladaných režimoch prevádzky turboagregátu jeho amplitúdová frekvenčná charakteristika vyhovovala vyššie uvedenej požiadavke.

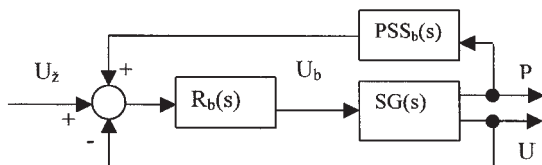
## 1. Formulácia úlohy

Pri návrhu robustných stabilizačných spätných väzieb (robust PSS – power system stabilizer) sa vychádza z definovania súboru  $N$  pracovných režimov turboagregátu, v ktorých a medzi ktorými majú efektívne fungovať stabilizačné spätné väzby (PSS). Druhou vážnou otázkou je výber prevádzkových veličín synchronného generátora a výber štruktúry stabilizačnej spätnej väzby, ktoré pre všetky režimy prevádzky zabezpečia turboagregátu vyžadovanú amplitúdovú frekvenčnú charakteristiku. Teoretické výsledky spolu s praxou jednoznačne ukazujú, že pre väčšinu turboagregátov v elektrizačnej sústave veľmi vhodnou stabilizačnou spätnou väzbou je činný výkon agregátu a štruktúra stabilizačnej spätnej väzby je v tvare

$$PSS(s) = \frac{k_s s}{T_s + 1} \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (1)$$

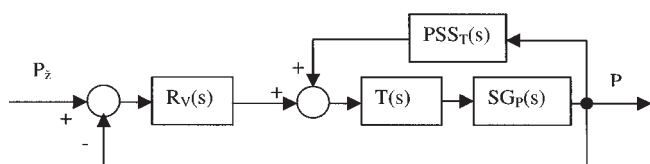
Bloková schéma zapojenia stabilizačnej spätnej väzby  $PSS_b(s)$  k regulátoru budenia  $R_b(s)$  synchronného generátora  $SG(s)$  ukazuje (obr. 1), kde  $U$  je svorkové (regulované) napätie synchronného generátora,  $U_z$  – žiadaná hodnota regulovaného napätia,  $U_b$  – budiacie napätie synchronného generátora a  $P$  – činný výkon synchronného generátora.

Amplitúdová frekvenčná charakteristika regulačného obvodu na obr. 1 pre prípad, ak výstupnou veličinou je činný výkon  $P$  a vstupnou veličinou je  $U_z$ , určuje vlastnosti turboagregátu najmä z hľa-



Obr.1 Bloková schéma regulačného obvodu budenia SG so stabilizátorom  $PSS_b(s)$

diska útlmu oscilácií v elektrizačnej sústave a kvality prechodných procesov. Spravidla amplitúdová frekvenčná charakteristika turboagregátu má jednu alebo viac maximálnych hodnôt (rezonančných vrcholov), ktoré pomocou stabilizačnej spätnej väzby  $PSS_b(s)$  je potrebné potlačiť. V prípade viacerých vrcholov amplitúdovej frekvenčnej charakteristiky s veľmi vzdialenými frekvenciami vrcholov je pri malej hodnote frekvencie vrcholu možné použiť stabilizačnú spätnú väzbu pre turbínu s prenosovou funkciou  $PSS_T(s)$ . Tá je zapojená k regulátoru výkonu turbíny  $R_T(s)$  s prenosovou funkciou turbíny  $T(s)$  a s prenosovou funkciou synchronného generátora  $SG_P(s)$  (kedy jeho výstupnou veličinou je činný výkon  $P$ ), podľa obr. 2 a kde  $P_z$  je žiadaná hodnota činného výkonu  $P$ .



Obr.2 Bloková schéma regulačného obvodu výkonu turbíny so stabilizátorom  $PSS_T(s)$

## 2. Návrh robustných stabilizačných spätných väzieb

Predpokladáme, že bol definovaný súbor  $N$  pracovných bodov turboagregátu, v ktorých a medzi ktorými sa má zabezpečiť požadovaná vlastnosť frekvenčnej charakteristiky. Vo zvolených  $N$  pracovných bodoch je potrebné experimentálnou cestou uskutočniť identifikáciu synchronného generátora (t. j. určiť jeho prenosovú funkciu  $SG(s)$ ) pri paralelnej činnosti regulátora budenia. Získané prenosové funkcie sú:

$$\frac{\Delta P_i(s)}{\Delta U_{zi}(s)} = SG_i(s) = \frac{B_i(s)}{A_i(s)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Nominálny model a model aditívnej neurčitosti sa získa pomocou nasledovných vzťahov:

$$SG_0(s) = \frac{\sum_{i=1}^N B_i(s) \frac{1}{N}}{\sum_{i=1}^N A_i(s) \frac{1}{N}} \quad (3)$$

$$l(\omega) = \max_i \left\{ \left| SG_0(j\omega) - SG_i(j\omega) \right| \right\} \quad (4)$$

keď platí:

$$l(\omega) \geq \left| w_a(j\omega) \Delta_a(j\omega) \right| \quad \forall \omega \quad (5)$$

kde:

$$\left| \Delta_a(j\omega) \right| \leq 1 \quad \forall \omega$$

Rodinu modelov opisujúcich objekt (2) potom možno zapísať prenosovou funkciou:

$$SG(s) = SG_0(s) + w_a(s) \Delta_a(s) \quad (6)$$

Stabilitu rodiny prenosových funkcií s  $PSS_b(s)$  určuje charakteristická rovnica uzavretého regulačného obvodu:

$$1 + PSS_b(s)SG(s) = 0 \quad (7)$$

ktorú môžeme upraviť do tvaru:

$$1 + PSS_b(s) \left[ SG_0(s) + w_a(s) \Delta_a(s) \right] = \left[ 1 + PSS_b(s)SG_0(s) \right] \left[ 1 + \frac{w_a(s) \Delta_a(s)}{SG_0(s)} F_u(s) \right] \quad (8)$$

kde

$$F_u(s) = \frac{PSS_b(s)SG_0(s)}{1 + PSS_b(s)SG_0(s)}$$

je prenosová funkcia uzavretého regulačného obvodu so stabilizačnou spätnou väzbou pre regulátor budenia synchronného generátora.

Rodina charakteristických rovníc (7) bude stabilná vtedy a len vtedy, ak nominálna prenosová funkcia so stabilizačnou väzbou bude stabilná a súčasne bude pre všetky  $\omega$  splnená nerovnosť:

$$\left| \frac{w_a(j\omega) \Delta_a(j\omega)}{SG_0(j\omega)} F_u(j\omega) \right| < 1$$

alebo

$$\left| F_u(j\omega) \right| < \left| \frac{SG_0(j\omega)}{w_a(j\omega)} \right| = M_0(\omega) \quad (9)$$

t. j. modul frekvenčného prenosu  $F_u(j\omega)$  celý bude ležať pod krivkou  $M_0(\omega)$ . Na základe rovnice (9) ďalej uskutočníme návrh stabilizačných spätných väzieb  $PSS(s)$  tak pre regulátor budenia synchronného generátora [ $PSS_b(s)$ ], ako aj pre regulátor výkonu turbíny [ $PSS_T(s)$ ].

Identifikáciu prenosovej funkcie (2) sme uskutočnili v troch pracovných bodoch:

Prvý pracovný bod:  $P = 0.5$  p. j.

$$SG_1(s) = \frac{-0,0062s^2 + 0,2404s - 0,0034}{s^3 + 0,1861s^2 + 0,7357s + 0,1040}$$

Druhý pracovný bod:  $P = 0.7$  p. j.

$$SG_2(s) = \frac{-0,0077s^2 + 0,2998s - 0,0043}{s^3 + 0,1825s^2 + 0,7321s + 0,1089}$$

Tretí pracovný bod:  $P = 1$  p. j.

$$SG_3(s) = \frac{-0,0091s^2 + 0,3522s - 0,0051}{s^3 + 0,1796s^2 + 0,6636s + 0,1077}$$

Podľa rovnice (3) sa určil nominálny model  $SG_0(s)$ , z ktorého možno zistiť, že nominálny model má malú hodnotu tlmiacej konštanty  $b = 0.0178$ , preto regulačný obvod je veľmi kmitavý. Želanú kvalitu regulácie získame vhodným výberom tlmiacej konštanty  $b$ . V našom prípade sme ho zvýšili na hodnotu  $b = 0.05$ . Z rovnice (8) a z predpokladu

$$F_u(s) = SG_z(s)$$

môžeme určiť želanú prenosovú funkciu stabilizačnej spätnej väzby  $PSS_{bz}(s)$  v tvare:

$$PSS_{bz}(s) = \frac{SG_z(s) - SG_0(s)}{SG_z(s)SG_0(s)} = \frac{0,05367s^2 + 0,00829s}{0,00765s^2 - 0,2963s + 0,0042}$$

Pretože v reálnej praxi prenosovú funkciu  $PSS_b(s)$  určujeme napr. podľa rovnice (1), je potrebné vybrať hľadané parametre v (1) tak, aby priblíženie sa frekvenčnej charakteristiky  $PSS_b(j\omega)$  k  $PSS_{bz}(j\omega)$  bolo čo najlepšie, resp. vyberieme si ich na základe kvadratického kritéria:

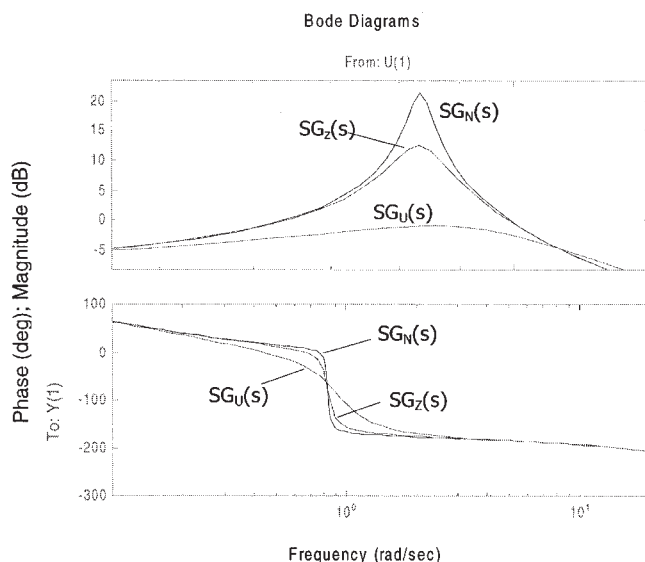
$$J = \left[ PSS_{bz}(j\omega) - PSS_b(j\omega) \right]^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

Na základe riešenia, ktoré spĺňa kritérium (10) a kontroly stability regulačného obvodu s blokovoú schémou na obr. 1, prenosová funkcia  $PSS_b(s)$  nadobúda nasledovný číselný tvar:

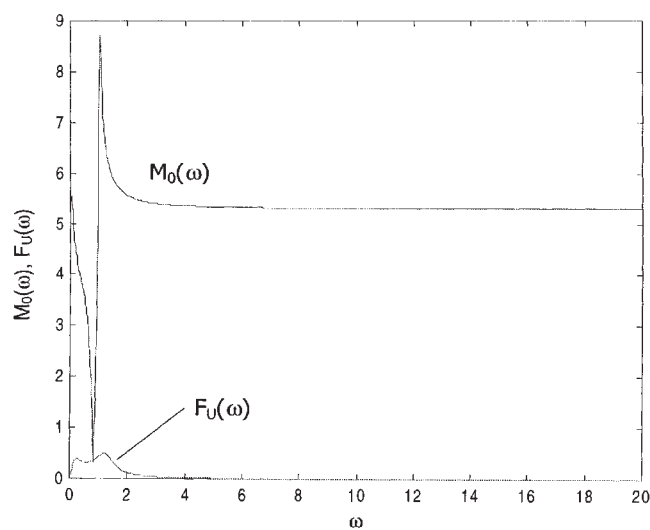
$$PSS_b(s) = \frac{-2,6s}{0,3s + 1} \frac{0,32s + 1}{0,29s + 1} \quad (11)$$

Na obr. 3 sú uvedené priebehy amplitúdových frekvenčných charakteristík objektu a želané prenosové funkcie  $SG_z(j\omega)$  pri použití reálnej stabilizačnej spätnej väzby (11). Na obr. 4 vidíme potvrdenie platnosti vzťahu (9).

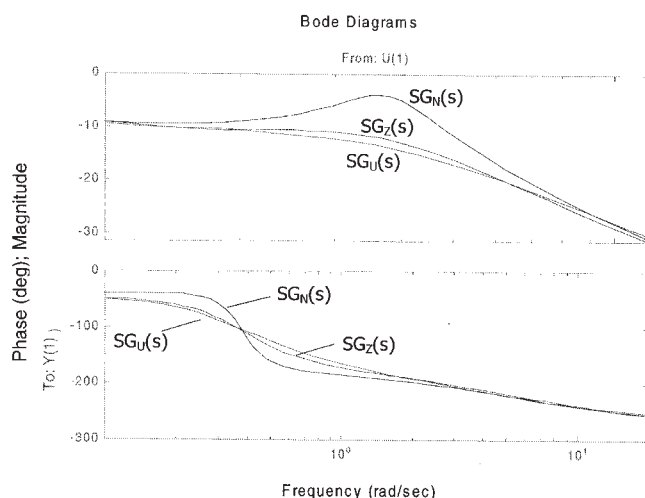
Obdobným spôsobom, ako sme navrhovali stabilizačnú spätnú väzbu k regulátoru budenia synchronného generátora  $PSS_b(s)$ , sme navrhli aj stabilizačnú spätnú väzbu k regulátoru výkonu turbíny  $PSS_T(s)$ . Na obr. 5 je uvedená frekvenčná charakteristika pre nominálnu prenosovú funkciu  $SG_0(s)$  s koeficientom útlmu  $b = 0.192$ , pre želanú amplitúdovú frekvenčnú charakteristiku  $SG_0(j\omega)$  s útlmom  $b = 0.5$  a pre reálnu stabilizačnú spätnú väzbu s prenosovou funkciou  $PSS_T(s)$ .



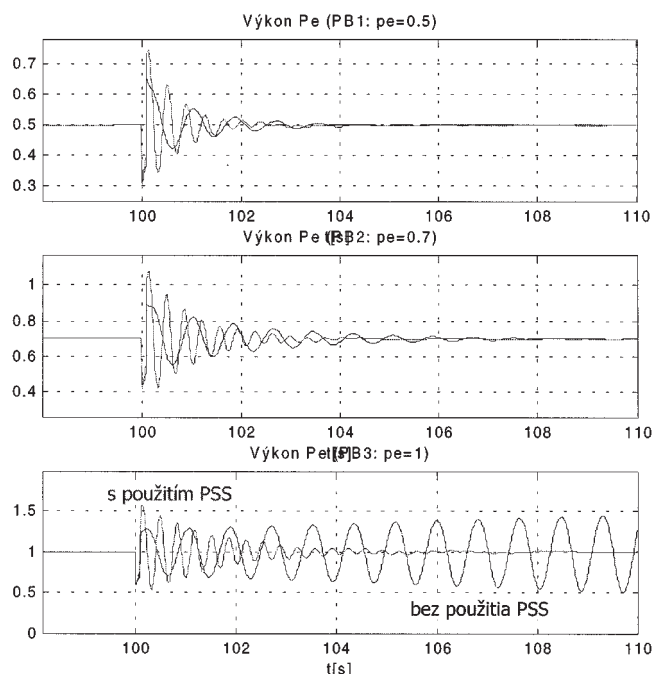
Obr.3 Frekvenčné charakteristiky prenosov  $SG_N(s)$ ,  $SG_Z(s)$  a  $SG_U(s)$



Obr.4 Priebehy modulu  $F_U(\omega)$  a  $M_0(\omega)$



Obr.5 Frekvenčné charakteristiky prenosov  $SG_N(s)$ ,  $SG_Z(s)$  a  $SG_U(s)$



Obr.6 Porovnanie kompenzácie vplyvu poruchy na modeli SG bez a s použitím PSS

Navrhnutá prenosová funkcia reálnej stabilizačnej spätnej väzby k regulátoru výkonu turbíny má číselný tvar:

$$PSS_T(s) = \frac{-0,3s \ 32,1s + 1}{6s + 1 \ 0,31s + 1} \quad (12)$$

Časový priebeh zmeny elektrického výkonu synchronného generátora bez stabilizačnej spätnej väzby a so stabilizačnou spätnou väzbou je uvedený na obr. 6 pre pracovný bod  $P = 0.7$  p. j.

## Záver

V predloženej práci sme poukázali na jeden z možných spôsobov návrhu robustných stabilizačných spätných väzieb súčasne k regulátoru budenia synchronného generátora a k regulátoru výkonu s ním spojenej turbíny.

## Literatúra

- [1] KOZÁKOVÁ, A., VESELÝ, V.: Robust PSS Design. The Frequency Domain Approach. In: Present – Day Problems of Power Engineering. Jurata, Poland, June 6 – 8, 2001. Vol. 1, p. 143-150.
- [2] MURGAŠ, J.: A Simple PSS for Excitation Control. 4-th International Conference: Control of Power Systems. Bratislava, Slovak Republic, June 15 – 16, 2000, p. 346-350.
- [3] MURGAŠ, J.: Power System Stabilization Using Self Tuning Principle. Journal of Electrical Engineering. Vol. 50, No. 11-12, 1999, p. 336-340.
- [4] HARSÁNYI, L., DÚBRAVSKÁ, M.: Robust PID Controller Design. Journal of Electrical Engineering. Vol. 52, No. 1-2, 2001, p. 19-23.
- [5] HARSÁNYI, L., DÚBRAVSKÁ, M.: Robust Controller Design. Journal of Electrical Engineering. Vol. 50, No. 11-12, 1999, p. 341-345.

prof. Ing. Vojtech Veselý, DrSc.  
doc. Ing. Ladislav Harsányi, CSc.

Katedra automatizovaných systémov riadenia  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Ilkovičova 3, Bratislava  
e-mail: vesely@kasr.elf.stuba.sk