

ROBUSTNA DECENTRALIZOVANA REGULACIJA TURBOGENERATORA

Vladimir Đorđević, *Elektrodistribucija Valjevo*
Trajko Petrović, *Elektrotehnički fakultet, Beograd*

Sadržaj: U radu je prikazan metod projektovanja robustnog decentralizovanog linearnog regulatora sistema sa povratnom spregom korišćenjem μ -analize. Testirane su različite strukture decentralizovanog regulatora. Projektovanje je urađeno za slučajevce strukturiranih i nestrukturiranih perturbacija. Regulator nije realizovan već je samo izvršena matematička analiza i sinteza.

Ključne reči: robustnost / decentralizovani regulator / μ -analiza / strukturirane i nestrukturirane perturbacije

1. UVOD

Jednomašinski turbogeneratorski sistem je multivarijabilni proces čije pojačanje zavisi od smerca ulaznog (upravljačkog) signala. Parametar koji opisuje ovu osobinu je kondicioni broj

$$\kappa_n = \frac{\bar{\sigma}(P)}{\underline{\sigma}(P)} \quad (1)$$

pri čemu su $\bar{\sigma}(P)$ i $\underline{\sigma}(P)$ maksimalna i minimalna singularnu vrednost procesa.

Glavni problem kod ovakvih procesa, bez obzira na vrstu primenjenog regulatora ili model turbogeneratorskog sistema, je prisustvo perturbacija modela. Razlika između procesa P i modela \tilde{P} može se, u slučaju turbogeneratorskog sistema, uspešno opisati sa normalizovanom multiplikativnom ulaznom perturbacijom argumenta Δ_u :

$$P = \tilde{P}(1 + I_u \Delta_u) \quad \text{i} \quad \bar{\sigma}(\Delta_u) < 1 \quad (2)$$

gde I i I_u označavaju jediničnu matricu i operator ponderisanja perturbacija. Funkcija I_u se takođe naziva i gornja granica perturbacija modela [2,3]. Matrica Δ_u je nepoznata, ograničena jediničnom normom $\bar{\sigma}(\Delta_u) < 1$. Ako je Δ_u puna matrica perturbacije su nestrukturirane. Strukturirane perturbacije podrazumevaju blok dijagonalnu strukturu Δ_u .

2. MODEL

Linearni model sinhrona mašine dat je u obliku Parkovih jednačina [4]:

$$\dot{e}'_q = -(1/k_3 \tau'_{d0}) e'_q - (k_4 / \tau'_{d0}) \delta + (K_a / \tau'_{d0}) v_1 + (K_a / \tau'_{d0}) v_s + (K_a / \tau'_{d0}) v_{ref} \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = -(k_2 / 2H) e'_q - (k_1 / 2H) \delta - (D / 2H) \omega + (1 / 2H) t_m \quad (4)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (5)$$

$$0 = v_d + r_d i_d - x_q i_q \quad (6)$$

$$\dot{e}_q = v_q + r_q i_q + x_d i_d \quad (7)$$

$$v_t^2 = v_d^2 + v_q^2 \quad (8)$$

Prenosna mreža je opisana jednačinama:

$$v_d = v_b \sin \delta + r_c i_d - x_c i_q \quad v_q = v_b \cos \delta + r_c i_q + x_c i_d \quad (9)$$

Automatski regulator napona (AVR) i eksiter dati su u formi filtera prvog reda

$$\dot{v}_1 = (-1/\tau_r)v_1 - (k_g/\tau_r)e_q - (k_s/\tau_r)\delta + (1/\tau_r)v_{ref} \quad (10)$$

Stabilizator sistema (PSS) predstavljaju jednačine:

$$\dot{v}_2 = -(K_{stab}D/2H)\omega - (K_{stab}k_1/2H)\delta - (K_{stab}k_2/2H)e_{fd} - (1/\tau_w)v_2 + (K_{stab}/2H)t_m \quad (11)$$

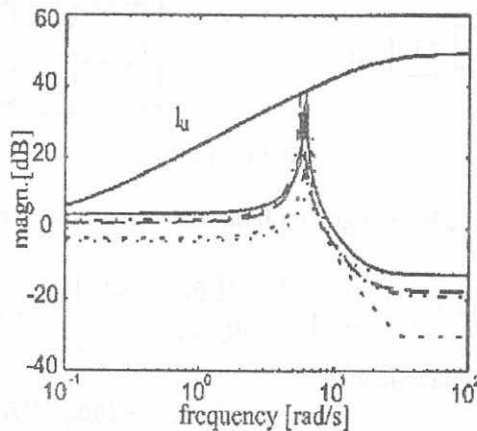
$$\dot{v}_s = -(K_{stab}\tau_1/\tau_2 2H)[D\omega - k_1\delta - k_2e_{fd}] - (\tau_1/\tau_2\tau_w + 1/\tau_2)v_2 - (1/\tau_2)v_s + (\tau_1 K_{stab}/\tau_2 2H)t_m \quad (12)$$

2.1 PERTURBACIJE MODELA I GORNJA GRANICA

Karakteristike turbogeneratorskog sistema menjaju se sa promenom uslova rada jer parametri k_1, \dots, k_6 zavise od radne tačke, opterećenja itd. [5]. Ovakvo nelinearno ponašanje može se modelirati perturbacionim modelom. Multiplikativna greška modeliranja je procenjena crtanjem frekvencijskog odziva sistema pod različitim uslovima rada a gornja granica je izabrana tako da predstavlja najveću perturbaciju:

$$l_u(s) > \max \left| \frac{\tilde{P}_i(s) - \tilde{P}(s)}{\tilde{P}(s)} \right| \quad (13)$$

Perturbacije modela pod pet različitih radnih uslova i gornja granica perturbacija je prikazana na sl. 1:

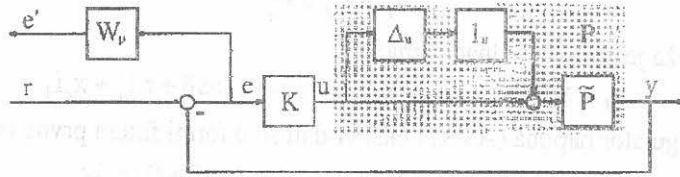


Sl.1 Perturbacije modela i gornja granica

Sledeća gornja granica perturbacija je dobijena:

$$l_u = 0.25 \frac{s/0.1 + 1}{s/20 + 1} I \quad (14)$$

3. μ -ANALIZA ROBUSTNOSTI



Sl.2 Sistem sa povratnom spregom

Sl. 2 prikazuje blok dijagram sistema sa povratnom spregom i ulaznom multiplikativnom perturbacijom. W_p je operator ponderisanja funkcije osetljivost i koristi se da bi se dobio odgovarajući oblik operatora osetljivosti E:

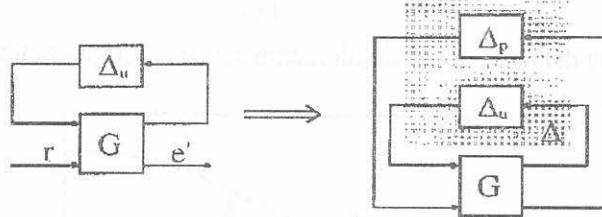
$$E(r \rightarrow e) = (I + PK)^{-1} \quad (15)$$

Robustna performansa znači da je ponderisana multiplikativna norma (ili seminorma) operatora osetljivosti jedinično ograničena za bilo koju perturbaciju Δ_u procesa:

$$\|W_p E\|_{\infty} < 1 \quad (16)$$

gde operator $\|\cdot\|_{\infty}$ označava multiplikativnu normu (ili seminormu). Ponderišuća vrednost operatora osetljivosti je izabrana kao u [6]:

$$W_p = \frac{0.02(s+0.2)}{s+0.002} I \quad (17)$$



Sl.3 G- Δ forma

Kada se sl.2 preuredi da odgovara blok dijagramu sa sl.3 matrica interkonekcije G je:

$$G = \begin{bmatrix} M & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K\tilde{E}P I_u & K\tilde{E} \\ -W_p \tilde{E}P I_u & W_p \tilde{E} \end{bmatrix} \quad \tilde{E} = (I + \tilde{P}K)^{-1} \quad (18)$$

Jednostavne manipulacije daju:

$$E = G_{22} + G_{21} \Delta_u (I - M \Delta_u)^{-1} G_{12} \quad (19)$$

Uslovi optimalnosti su dati sledećim zahtevima [7-9]:

- 1° nominalna stabilnost $\Leftrightarrow G$ je (interno) stabilna
- 2° nominalna performansa $\Leftrightarrow NP = \sup_{\omega} \{np(\omega)\} < 1$, $np(\omega) = \bar{\sigma}(G_{22}) = \sigma(W_p \tilde{E})$
- 3° robustna stabilnost $\Leftrightarrow RS = \sup_{\omega} \{rs(\omega)\} < 1$, $rs(\omega) = \mu_{\Delta_u}(M) = \mu_{\Delta_u}(K\tilde{E}\tilde{P})$
- 4° robustna performansa $\Leftrightarrow RP = \sup_{\omega} \{rp(\omega)\} < 1$, $rp(\omega) = \mu_{\Delta}(G)$

4. SINTEZA DECENTRALIZOVANOG REGULATORA

Osnovna ideja ove sinteze je da se P zameni sa \hat{P} .

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad \tilde{P} = \text{diag}(P_{11}, P_{22}, \dots, P_{nn}) \quad (20)$$

Posledično, optimalni regulator $K = \hat{K}$ bio bi dijagonalan:

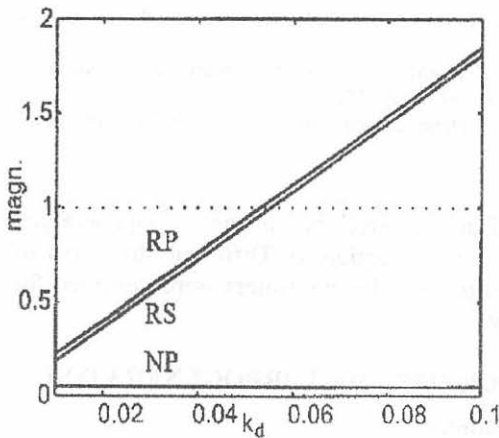
$$\hat{K} = \text{diag}(K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (21)$$

U ovom radu sledeće varijante dijagonalnih regulatora su korišćene:

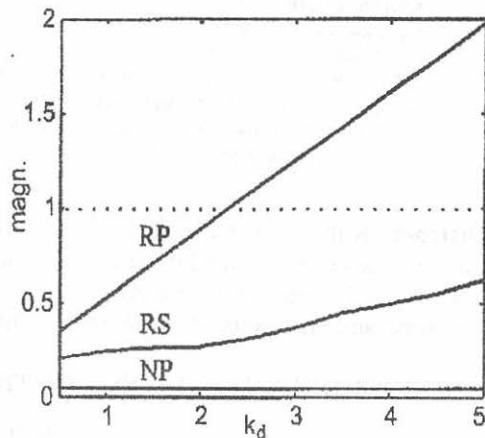
$$\hat{K}_1 = \frac{k_d}{s} \text{diag}\left(\frac{1}{\tilde{P}_{11}}, \frac{1}{\tilde{P}_{22}}\right), \quad \hat{K}_2 = \frac{1}{s} \text{diag}\left(\frac{k_{d1}}{\tilde{P}_{11}}, \frac{k_{d2}}{\tilde{P}_{22}}\right) \quad (22)$$

Cilj optimizacije je da se izaberu podešivi parametri tako da se dobije sistem robustne performanse. Pod pretpostavkom da je $\hat{K} = \hat{K}_1$ i da su perturbacije nestruktuirane ($\Delta_u =$ je puna matrica), sl. 4a prikazuje nominalnu performansu, robustnu stabilnost i robustnu performansu kao funkciju u zavisnosti od k_d ($NP(k_d)$, $RS(k_d)$, $RP(k_d)$).

Maksimalna vrednost k_d za koju su zadovoljeni uslovi 1° - 4° je 0.05. Za slučaj strukturiranih perturbacija maksimalna vrednost k_d je 2.1 što se može videti sa slike 4b. Simulacija step odziva ugla rotora (δ) za slučajeve i nominalnog i perturbovanog procesa (sl. 5) pokazuje uspešnost sinteze decentralizovanog regulatora korišćenjem μ -analize.

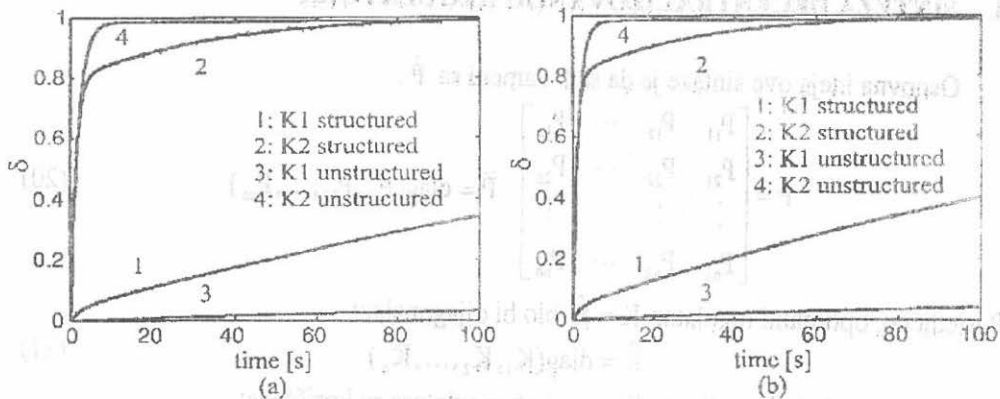


(a)



(b)

Sl.4 $NP(k_d)$, $RS(k_d)$, $RP(k_d)$ (a) nestruktuirane perturbacije (b) strukturirane perturbacije



Sl.5 Odziv ugla rotora na step protoka (a) $P = \hat{P}$, (b) $P \neq \hat{P}$

LITERATURA

- [1.] N.Nett, V.Monousiothakis, "Euclidean Condition and Block Relative Gain, Connections, Conjectures and Clarifications", IEEE Trans. Automat. Contr. AC(32),405-407, 1987
- [2.] S.Skogestad, M.Morari, J.C.Doyle, "Robust Control of Ill-Conditioned Plants: High-Purity Distillation", IEEE Trans. Automat. Contr. AC (33) 1092-1105, 1988
- [3.] M.Morari, E.Zafiriou, "Robust Process Control", Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1989
- [4.] P.Kundur, "Power System Stability and Control", New York, USA: Mc Graw-Hill, 1994
- [5.] M.K.El-Sherbiny, D.M.Mehta, "Dynamic System Stability. Part I - Investigation of The Effect of Different Loading And Excitation Systems", IEEE Trans.on Power, Apparatus and Excitation Systems, Vol. 92, 1538-1546, 1973
- [6.] S.Chen, O.P.Malik, "Power System Stabilizer Design Using μ Synthesis", IEEE Trans. on Energy Convers. EC(10) 1995
- [7.] Dj.Garabandić, T.Petrović, "Robust decentralized control of parallel dc/dc converters", Archiv für Elektrotechnik 79, 1996
- [8.] J.C.Doyle, J.C.Wall, G.S.Tein, "Performance and Robustness analysis for Structured uncertainty", In Proc. 21st IEEE Conf. Decision Contr., Orlando, FL-USA, 1982
- [9.] J.C.Doyle, "Structured Uncertainty in Control Systems Design", In Proc. 24th IEEE Conf. Dec. Contr., Ft. Lauderdale, FL-USA 1985

Abstract. Robust decentralized linear feedback controllers for the turbogenerators, using the structured singular value approach, are investigated. Different structures of decentralized controllers were considered and tested. The controllers were designed for structured and unstructured model uncertainty.

ROBUST DECENTRALIZED CONTROL FOR THE TURBOGENERATOR

Vladimir Đorđević
Trajko Petrović