

## Projektovanje robusnog regulatora pobude na osnovu intervalnog modela generatora

Đorđe Stojić<sup>1</sup>, Milan Milinković, Slavko Veinović, Dušan Joksimović,  
Nemanja Milojčić, Ilija Klasnić, Dušan Arnautović

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[djordje.stojic@ieent.org](mailto:djordje.stojic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu je prikazan novi pristup projektovanju regulatora pobude zasnovan na intervalnom modelu sinhronog generatora. U literaturi je pokazano da je sekvencijalni regulator prvog reda, što u našem slučaju predstavlja PI regulator statorskog napona, dovoljno projektovati za konačan broj intervalnih funkcija prenosa modela generatora sa promenljivim parametrima umesto za sve intervalne funkcije prenosa. Na taj način omogućeno je projektovanje robusnog regulatora pobude zasnovano na najviše šesnaest intervalnih funkcija prenosa modela generatora, gde se u slučaju modela generatora prvog reda taj broj smanjuje na četiri. Regulator je projektovan u frekventnom domenu, gde je analiza performansi predloženog rešenja sprovedena pomoću simulacije regulacionog sistema.

**Ključne reči:** regulator napona statora, sinhroni generator, robusno upravljanje, teorema Haritonova

### 1. Uvod

Robusna regulacija statorskog napona (RSN) sinhronog generatora (SG) predstavlja jedan od značajnijih problema u oblasti, pošto SG predstavlja objekat upravljanja sa parametrima modela promenljivim u širokim opsezima, u zavisnosti od promenljivih režima rada. Robusni zakoni upravljanja bi trebalo da omoguće dinamičke performanse RSN u svim režimima rada SG, u skladu sa kriterijumima performansi definisanim odgovarajućim standardima [1]. Standardi preporučuju vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi u vremenskom i frekventnom domenu, gde je procedura projektovanja prikazana u okviru ovog rada zasnovana na metodologiji preuzetoj iz frekventnog domena – odnosno, na zahtevanim vrednostima preteka faze i

presečne učestanosti. Na taj način omogućen je stabilan rad i brz odziv SG u različitim režimima rada, čime se doprinosi opštoj stabilnosti elektroenergetskog sistema.

Robusne RSN je u praksi moguće sresti u linearnom i nelinearnom obliku. Osnovni oblik sekvencijalnog RSN predstavljen je u [1] u formi linearnog Lead-lag kompenzatora, čije je parametre moguće projektovati u skladu sa nekim od zadatih kriterijuma robusnih performansi. Nedostatak predložene strukture predstavlja postojanje greške stacionarnog stanja regulacije kao i uticaj koji diferencijalno dejstvo kompenzatora ima na povećanje osetljivosti regulatora u odnosu na merni šum.

U [2] i [7] problem postojanja nulte greške stacionarnog stanja rešen je upotrebom sekvencijalnog PID umesto prethodno predloženog Lead-lag regulacionog dejstva. U [2], parametri PID regulatora podešeni su jednom od sledeće dve karakteristične metode – metodom podešavanja mesta polova [3] ili metodom skraćivanja polova [4]. Robusnost predloženih rešenja obezbeđena je usvajanjem vrlo široke margine preteka faze u odnosu na standardom definisanu vrednost.

U [10]-[12] predloženo je više formi PID regulatora projektovanih različitim tipovima algoritama optimizacije. Robusni optimalni PID regulator, projektovan metodom optimizacije roja, predložen je u [13]. Takođe, u [13] je izvršena optimizacija minimizacijom integralnog kriterijuma performansi, zasnovana na linearizovanom modelu SG.

Drugi pristup projektovanju robusnog RSN predložen je u [14], zasnovan na PI regulatoru projektovanom gain-scheduling metodom, gde je uporednom analizom pokazano da predloženo rešenje obezbeđuje bolje performanse u poređenju se RSN koji koristi fiksni PID regulator.

U poređenju sa prethodno pomenutim sekvencijalnim RSN robusnost je u [19] dodatno unapređena upotrebom linearnog opservera.

Pored linearnih robusnih RSN, u [21]-[26] predložene su nelinearne upravljački algoritmi zasnovani na sistemima promenljive strukture i kliznim režimima upravljanja. Iako pomenuta rešenja omogućavaju vrlo brzu i robusnu dinamiku RSN, ista imaju problem ripla upravljanje veličine. U [21], oscilovanje upravljačkog signala je minimizovano upotrebom linearnog opservera, dok je u [22] isti efekat postignut povećanjem reda upravljačke funkcije kliznog režima.

Robusni RSN je u okviru ovog rada realizovan u formi sekvencijalnog PI regulatora, projektovan na osnovu intervalnog modela SG [30]-[32]. U [30] je pokazano da je spregu sekvencijalnog regulatora prvog reda i SG sa parametrima modela promenljivim u zadatim opsezima dovoljno analizirati za konačan broj graničnih modela generatora, definisanih polinomima Haritonova imenioca i brojioca funkcije prenosa modela. Pošto u opštem slučaju imenilac i brojilac funkcije prenosa imaju po četiri granična polinoma, to podrazumeva maksimalno 16 graničnih funkcija prenosa modela, gde se u slučaju modela SG prvog reda ovaj broj svodi na 4 granične funkcije prenosa. Shodno tome, na osnovu analize date u [30], može se zaključiti da je PI regulator robusnih dinamičkih performansi dovoljno projektovati za četiri

granične funkcije prenosa modela generatora. U ovom slučaju, regulator je projektovan metodologijom preuzetom iz frekventnog domena, podešavanjem minimalnih vrednosti preteka faze i presečne učestanosti za sve četiri granične funkcije prenosa modela SG.

Pošto granične funkcije prenosa modela SG predstavljaju osnovu predložene metode projektovanja RSN, u radu je neophodno definisati metod određivanja opsega promene parametara modela SG. Intervali promene vrednosti parametara, pa samim tim i granične funkcije prenosa, određeni su na osnovu analize date u [28], gde su definisani opsezi promene parametara ekvivalentnog modela SG prvog reda za širok opseg radnih režima generatora.

Rad se sastoji iz pet poglavlja. U poglavlju 2. dat je linearizovani model prvog reda zajedno sa opsezima promene vrednosti koeficijenata modela pri različitim režimima rada generatora. Takođe, na osnovu definisanih intervala promene parametara određene su i granične funkcije prenosa modela generatora. U poglavlju 3. prikazana je procedura projektovanja sekvencijalnog PI regulatora za četiri granične funkcije prenosa modela SG, sa ciljem održavanja određenih minimalnih vrednosti preteka faze i presečne učestanosti u sva četiri slučaja. U poglavlju 4. dati su odzivi simulacije intervalnih funkcija prenosa.

## 2. Model sinhronog generatora

Projektovanje RSN je u okviru ovog rada realizovano upotrebom linearizovanog modela SG trećeg reda definisanog u [28]. Iako je složena nelinearna dinamika generatora sedmog reda svedena na uprošćeni model, nelinearnosti su uključene u svedeni model upotrebom nelinearnih parametara modela, izvedenih za različite režime rada [28]. Shodno tome dobijen je sledeći model, koji se pod pretpostavkom rada generatora sa konstantnom brzinom svodi na jednačine električnog podsistema generatora prvog reda

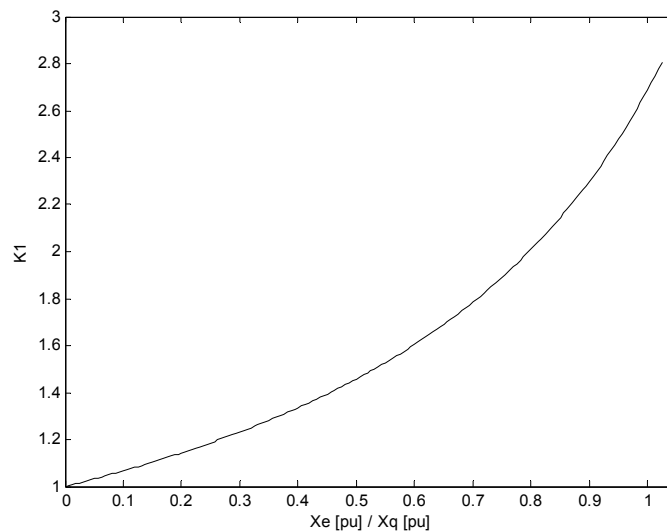
$$\begin{aligned}
 E'_q &= \frac{c_1}{1 + \tau s} v_F - \frac{c_2}{1 + \tau s} \delta, \\
 T_e &= c_5 \delta + c_6 E'_q, \\
 v_t &= c_7 \delta + c_8 E'_q, \\
 \omega &= \frac{1}{s} \frac{T_m - T_e}{\tau_j}, \\
 \delta &= \frac{1}{s} \omega_\Delta.
 \end{aligned} \tag{1}$$

U jednačini (1),  $E_q'$  predstavlja  $q$ -komponentu indukovane elektromotorne sile statora,  $v_t$  predstavlja efektivnu vrednost napona statora,  $\delta$  predstavlja ugao snage generatora,  $v_F$  predstavlja napon pobude generatora,  $T_e$  električni moment generatora,  $T_m$  mehanički moment turbine agregata i  $\omega$  njegovu brzinu.

Na osnovu jednačine (1) izvodi se model prvog reda električnog podsistema, linearizovan za radnu tačku definisanu nominalnom brzinom generatora

$$v_t = k_0 \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 T'_{d0} s} v_F. \quad (2)$$

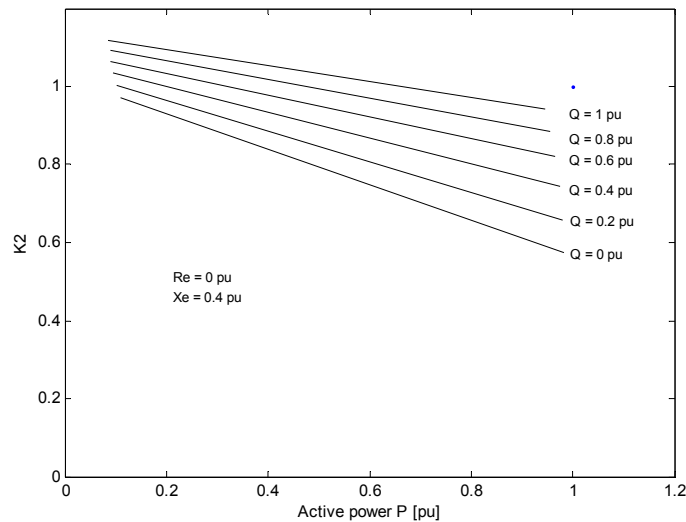
U cilju projektovanja robusnog RSN neophodno je odrediti opsege u kojima se kreću vrednosti parametara modela (2). Doduše, među parametrima modela (2)  $k_0$  i  $T'_{d0}$  predstavljaju pojačanje u stacionarnom stanju i tranzijentnu vremensku konstantu praznog hoda, respektivno, koje predstavljaju polazne nepromenljive parametre modela, koje je moguće bilo proračunati na osnovu tehničkih karakteristika SG bilo identifikovati u praznom hodu generatora. Što se tiče nelinearnih efekata koji dolaze do izražaja prilikom rada generatora na mreži, oni se modeluju nelinearnim karakteristikama pojačanja  $k_1$  i  $k_2$  [28], datim na slikama 1 i 2.



**Slika 1.** Nelinearna karakteristika pojačanja  $k_1$  data u zavisnosti od ekvivalentne impedanse mreže

Na slici 1 data je nelinearna karakteristika pojačanja  $k_1$  u zavisnosti od ekvivalentne impedanse mreže. Za slučaj agregata snage 200 MW koji je modelovan u okviru rada uzeto je da se  $X_e / X_q$  menja u opsegu [0, 0.6], što na osnovu slike 1 za posledicu ima promenu vrednosti parametra  $k_1$  u opsegu

$k_1 \in [1, 1.6]$  (gde  $X_q$  predstavlja sinhronu statorsku reaktansu generatora u  $q$  osi rotacionog referentnog koordinatnog sistema sinhronog sa rotorom, i  $X_e$  ekvivalentnu reaktansu prenosnog voda).



**Slika 2.** Promena vrednosti parametra  $k_2$  za različite tipove opterećenja generatora

Na slici 2 dat je prikaz zavisnosti parametra  $k_2$  linearizovanog modela (2) SG za širokok opseg opterećenja. Analizom slike 2 može se zaključiti da se za širok opseg režima rada generatora vrednost parametra  $k_2$  linearizovanog modela kreće u intervalu  $k_2 \in [0.6, 1.15]$ .

Pošto su polazni parametri generatora snage 200 MW analiziranog u radu jednaki  $k_0 = 1450$  i  $T'_{d0} = 5.5$  s, na osnovu opsega promene vrednosti parametara  $k_1$  i  $k_2$  linearizovanog modela (2) može se izvesti sledeći intervalni model SG

$$G_{SG}(s) = \frac{v_t(s)}{v_F(s)} = k_0 \frac{[0.6, 1.84]}{1 + [1, 1.6]T'_{d0}s} \quad (3)$$

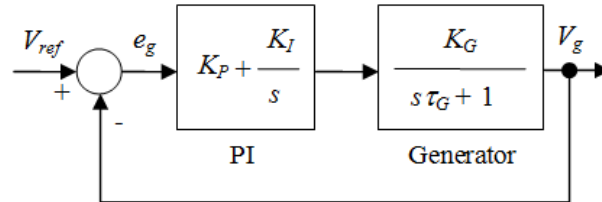
koji za zadate vrednosti  $k_0$  i  $T'_{d0}$  dobija oblik

$$G_{SG}(s) = \frac{v_t(s)}{v_F(s)} = \frac{[870, 2668]}{1 + [5.5, 8.8]s} \quad (4)$$

Na osnovu intervalnog modela (4) u narednom poglavlju izvršeno je projektovanje robusnog regulatora pobude SG.

### 3. Projektovanje regulatora

Na slici 3 prikazan je RSN sa sekvencijalnim PI regulatorom.



**Slika 3.** Struktura upravljanja statorskim naponom sinhronog generatora

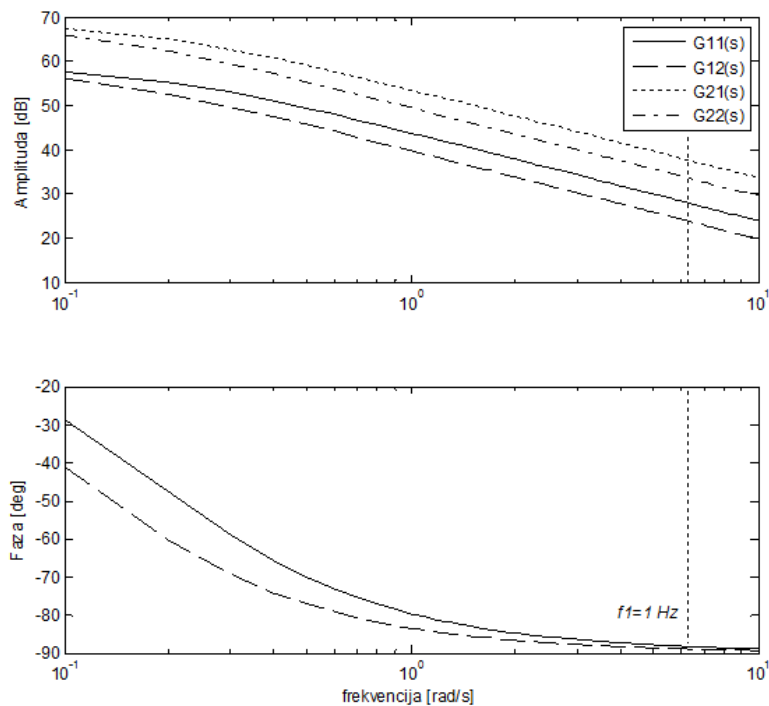
Osnovna ideja prilikom projektovanja robusnog regulatora prvog reda sastoji se u tome da se zadati pokazatelji dinamičkih performansi (pretek faze i presečna učestanost) ostvare za četiri granične funkcije prenosa, definisane u [30]. Naime, u [30] je pokazano da je za model objekta upravljanja kome se koeficijenti funkcije prenosa kreću u zadatim intervalima moguće definisati klasu od sledećih osam graničnih polinoma,

$$\begin{aligned}
 N_1(s) &= n_0^- + n_1^- s + n_2^+ s^2 + n_3^+ s^3 + \dots \\
 N_2(s) &= n_0^+ + n_1^+ s + n_2^- s^2 + n_3^- s^3 + \dots \\
 N_3(s) &= n_0^- + n_1^+ s + n_2^- s^2 + n_3^+ s^3 + \dots \\
 N_4(s) &= n_0^+ + n_1^- s + n_2^+ s^2 + n_3^- s^3 + \dots \\
 D_1(s) &= d_0^- + d_1^- s + d_2^+ s^2 + d_3^+ s^3 + \dots \\
 D_2(s) &= d_0^+ + d_1^+ s + d_2^- s^2 + d_3^- s^3 + \dots \\
 D_3(s) &= d_0^- + d_1^+ s + d_2^- s^2 + d_3^+ s^3 + \dots \\
 D_4(s) &= d_0^+ + d_1^- s + d_2^+ s^2 + d_3^- s^3 + \dots
 \end{aligned} \tag{5}$$

gde  $N_i(s)$  predstavljaju četiri granična polinoma brojioca (sa  $n_i^+$  i  $n_i^-$  graničnim vrednostima koeficijenata polinoma), a  $D_i(s)$  četiri granična polinoma imenioca (sa  $d_i^+$  i  $d_i^-$  graničnim vrednostima koeficijenata polinoma) funkcije prenosa modela objekta. Na osnovu analize date u [30] da se zaključiti da je sekvencijalni regulator prvog reda dovoljno projektovati za 16 kombinacija  $N_i(s)$  i  $D_i(s)$ , odnosno za 16 graničnih intervalnih funkcija prenosa modela objekta upravljanja. Pošto (4) ima po dva granična polinoma za imenilac i brojilac, to znači da je robusni sekvencijalni PI regulator potrebno projektovati za 4 granične funkcije prenosa

$$\begin{aligned}
 G_{SG11}(s) &= \frac{N_1(s)}{D_1(s)} = \frac{n_0^-}{1 + d_1^- s} = \frac{870}{1 + 5.5s} \\
 G_{SG12}(s) &= \frac{N_1(s)}{D_2(s)} = \frac{n_0^-}{1 + d_1^+ s} = \frac{870}{1 + 8.8s} \\
 G_{SG21}(s) &= \frac{N_2(s)}{D_1(s)} = \frac{n_0^+}{1 + d_1^- s} = \frac{2668}{1 + 5.5s} \\
 G_{SG22}(s) &= \frac{N_2(s)}{D_2(s)} = \frac{n_0^+}{1 + d_1^+ s} = \frac{2668}{1 + 8.8s}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Projektovanje regulatora je izvršeno u frekventnom domenu sa ciljem da se za slučajeve graničnih amplitudskih i faznih karakteristika funkcija prenosa (6) postignu pretek faze i presečna učestanost vrednosti od najmanje  $\varphi_m = 90^\circ$  i  $f_1 = 1$  Hz [1] respektivno.



**Slika 4.** Frekvencijske karakteristike četiri granične funkcije modela generatora (6)

Analizom frekvencijskih karakteristika graničnih funkcija prenosa modela generatora datih na slici 4 može se zaključiti da granična funkcija prenosa  $G_{12}(s)$  ima najmanju amplitudsku i faznu karakteristiku što je čini prvim kandidatom za funkciju prenosa modela u odnosu na koju je potrebno projektovati parametre sekvencijalnog PI regulatora, datog sledećom jednačinom

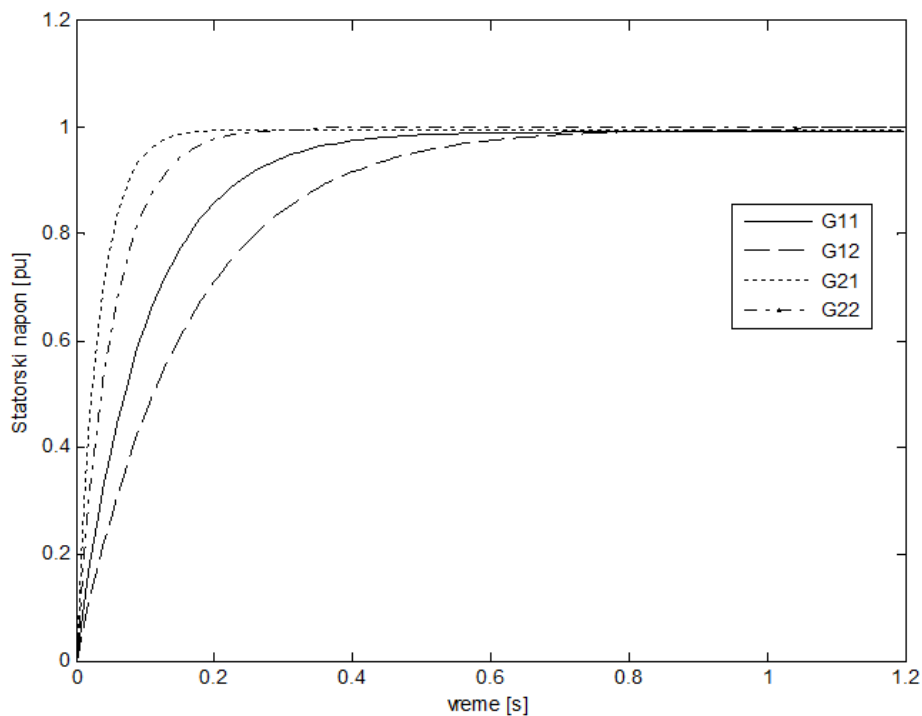
$$G_{PI}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s}. \quad (7)$$

Pošto na zadatoj vrednosti presečne učestanosti  $f_1 = 1$  Hz funkcija prenosa SG  $G_{12}(s)$ , za koju je potrebno projektovati robusni PI regulator, ima pojačanje 15.7 i fazu  $-89^\circ$  parametre regulatora (7) je potrebno projektovati tako da za  $f_1 = 1$  Hz  $G_{PI}(s)$  unese slabljenje 15.7 i fazno kašnjenje od  $-1^\circ$ , kako bi se postigle željene vrednosti preteka faze i presečne učestanosti.

Željeni rezultati se postižu za  $K_p = 0.063$  i  $K_i = 0.1136$ . U narednom poglavlju izvršena je simulacija odziva RSN sa slike 3 za projektovani sekvencijalni PI regulator i četiri granične funkcije prenosa SG (6).

#### 4. Rezultati simulacije

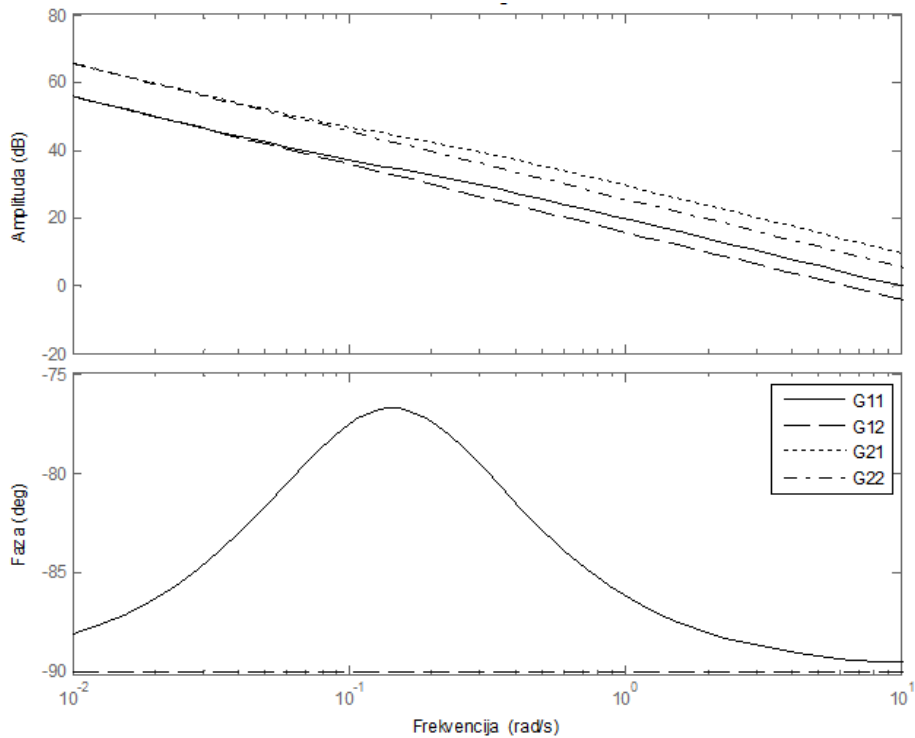
Na slici 5 prikazani su odzivi na jediničnu pobudu regulatora pobude sinhronog generatora projektovanog u prethodnom poglavlju, gde su odzivi simulirani za četiri granične funkcije prenosa SG (6).



Slika 5. Odzivi na jediničnu pobudu regulatora za četiri granične funkcije prenosa modela SG (6)



Analizom odziva regulatora datih na slici 5 može se zaključiti da projektovani robusni PI regulator omogućava rad sa dinamičkim performansama koje odgovaraju zadatim vrednostima preteka faze i presečne učestanost za sve četiri granične funkcije prenosa modela (6), što na osnovu [30] znači da rade robusno za sve intervalne funkcije prenosa koje odgovaraju promenama parametara modela SG u zadatim opsezima.



**Slika 6.** Odzivi na jediničnu pobudu regulatora za četiri granične funkcije prenosa modela SG (6)

Na slici 6 prikazana je frekventna karakteristika sistema datog na slici 3, u otvorenoj sprezi, izračunata za četiri granične funkcije prenosa modela generatora i PI regulator projektovan u poglavlju 3. Analizom frekventnog odziva na slici 6 može se zaključiti da u sva četiri slučaja rezultujući pretek faze nije manji od zadate vrednosti  $\varphi_m = 90^\circ$  i da presečna učestanost nije manja od zadate vrednosti  $f_1 = 1$  Hz.

## 5. Zaključak

U radu je prikazana nova metoda projektovanja sekvencijalnog PI regulatora, koji omogućava robusan rad regulacije za promene vrednosti

parametara modela generatora u zadatim opsezima. Metoda projektovanja je zasnovana na rezultatima datim u [30], po kojima je regulator prvog reda dovoljno projektovati za 16 graničnih funkcija prenosa objekta upravljanja. Pošto je u našem slučaju red modela objekta upravljanja prvi, broj graničnih funkcija prenosa modela objekta upravljanja se svodi na 4. Shodno tome, za četiri granične funkcije prenosa projektovan je sekvencijalni PI regulator u skladu sa zahtevanim vrednostima preteka faze i presečne učestanosti, tako što su pomenuti parametri podešeni za najgori slučaj – graničnu amplitudsku i graničnu faznu karakteristiku modela. Performanse projektovanog regulatora su ispitane simulacijom odziva regulatora za sve četiri granične funkcije prenosa sinhronog generatora. Parametri modela graničnih funkcija prenosa izvedeni su za sinhroni generator snage 200 MW, u skladu sa analizom datom u [28], gde je uspostavljena veza između režima rada generatora i nelinearnih vrednosti parametara linearizovanog modela prvog reda sinhronog generatora.

## Zahvalnica

Rad je nastao kao rezultat istraživanja u okviru naučno-istraživačkog projekta TR33020 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## Literatura

- [1] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5-2005, 2005.
- [2] K. Kim, R. Schaefer, "Tuning a PID Controller for a Digital Excitation Control System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, pp. 485-492, 2005.
- [3] K. Kim, M. J. Basler, and A. Godhwani, "Design experience with PID controllers for voltage regulation of synchronous generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, submitted for publication.
- [4] K. Kim, A. Godhwani, M. J. Basler, and T.W. Eberly, "Commissioning experience with a modern digital excitation system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 13, no. 2, pp. 183-187, 1998.
- [5] R. C. Schaefer, K. Kim, and M. J. Basler, "Voltage regulator with dual PID controllers enhance power system stability," presented at the *Hydro Vision Conf.*, Portland, OR, 2002.

- [6] R. C. Schaefer, "Voltage regulator influence on generator stability," presented at the *Basler Electric Power Control and Protection Conf.*, St.Louis, 2003.
- [7] K. Kim, M. Basler, A. Godhwani, "Supplemental control in a modern digital excitation system", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 603-608, 2000.
- [8] R. C. Schaefer, "Application of static excitation systems for rotating exciter replacement," in *Proc. IEEE Pulp and Paper Industry Tech. Conf.*, pp. 199–208, 1997.
- [9] R. C. Schaefer, "Steam turbine generator excitation system modernization," in *Proc. IEEE Pulp and Paper Industry Tech. Conf.*, pp.194–204, 1995.
- [10] R. Krohling, J. Rey, "Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithm," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 5, pp. 78–82, 2001.
- [11] Y. Mitsukura, T. Yamamoto, M. Kaneda, "A design of self-tuning PID controllers using a genetic algorithm," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, San Diego, CA, pp. 1361–1365, 1999.
- [12] T. Kawabe, T. Tagami, "A real coded genetic algorithm for matrix inequality design approach of robust PID controller with two degrees of freedom," in *Proc. 12th IEEE Int. Symp. Intell. Contr.*, Istanbul, Turkey, pp. 119–124, 1997.
- [13] Z. Gaing, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 384-391, 2004.
- [14] A. Sedaghati, "A PI controller based on gain-scheduling for synchronous generator," *Turk Journal of Elec. Engin.*, vol.14, 2006.
- [15] I. Fialho, G. Balas, "Road Adaptive Active suspension Design Using Linear Parameter-Varying Gain-Scheduling," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol.10, pp. 43-51, 2002.
- [16] D. Stilwell, W. Rugh, "Interpolation of Observer State Feedback Controllers for Gain Scheduling," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, pp. 1225-1229, 1999.
- [17] P. Apkarian, R. Adams, "Advanced Gain-Scheduling Techniques for Uncertain Systems," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol. 6, pp. 21-32, 1998.
- [18] C. Lee, M. Shin, N. Chung, "A Design of Gain-Scheduled Control for a Linear Parameter Varying System: An Application to Flight Control", *Control Engineering Practice*, vol. 9, pp. 11-21, 2001.

- [19] J. De Leon-Moralesa, K. Busawonb, S. Acha-Dazaa, “A robust observer-based controller for synchronous generators,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23, pp. 195-211, 2001.
- [20] M. Aman, “Fast stability achievement through fuzzy logic based non-linear excitation control of synchronous generator,” Colloquium on Humanities, Science and Engineering, 2011.
- [21] J. Cabrera-Vazquez, A. Loukianov , J. Canedo, V. Utkin, “Robust controller for synchronous generator with local load via VSC,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, pp. 348–359, 2007.
- [22] A. Loukianov, J. Cañedo, L. Fridman, A. Soto-Cota, “High-Order Block Sliding-Mode Controller for a Synchronous Generator With an Exciter System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, 2011.
- [23] K. Abidi and A. Šabanovic, “Sliding-mode control for high-precision motion of a piezostage,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, pp. 629– 637, 2007.
- [24] W.-F. Xie, “Sliding-mode-observer-based adaptive control for servo actuator with friction,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, pp. 1517– 1527, 2007.
- [25] A. V. Topalov, G. L. Cascella, V. Giordano, F. Cupertino, and O.Kaynak, “Sliding mode neuro-adaptive control of electric drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, pp. 671–679, 2007.
- [26] Y. Yildiz, A. Šabanovic, and K. Abidi, “Sliding-mode neuro-controller for uncertain systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, pp. 1676–1685, 2007.
- [27] I. Jadric, D. Borojevic, M. Jadric, “Modeling and Control of a Synchronous Generator with an Active DC Load,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, pp. 303-311, 2000.
- [28] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, John Wiley & Sons, 2003.
- [29] F. Saccomanno, *Electric Power Systems, Analysis and Control*, IEEE Press Series on Power Engineering, A John Wiley & Sons Publication, 2003.
- [30] B. Barmish, C. Hallot, F. Kraus, R. Tempo, “Extreme Point Results for Robust Stabilization of Interval Plants with First Order Compensators,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 6, pp. 707-712, 1992.
- [31] R. Farkh, K. Laabidi, M. Ksouri, “Robust PI/PID controller for interval first order system with time delay,” *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 13, no. 1, pp 67-77, 2011.
- [32] B. Patre, P. Deore, “Robust stability and performance of interval process plant with interval time delay,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 34, no. 5, pp. 627-634, 2012.

**Abstract:** In this paper a novel method for the stator voltage regulator of a synchronous generator based on the interval plant model, is presented. Namely, it is shown in the literature that, in order to design a controller for the first-order compensator, the limited number of interval plants needs to be examined. Consequently, the intervals of the plant model parameter variations used to calculate the four extreme interval plants required for the sequential PI controller design are determined. The controller is designed using frequency-domain-based techniques, while its robust performance is examined using simulation tests.

**Keywords:** stator voltage control, synchronous generator, robust regulator, Kharitonov's theorem

## **Design of the Robust Synchronous Generator Stator Voltage Regulator Based on the Interval Plant Model**

Rad primljen u uredništvo 17.10.2013. godine  
Rad prihvaćen 27.10.2013. godine

