

Robusni regulator napona statora sinhronog generatora

Đorđe Stojić, Milan Milinković, Slavko Veinović, Dušan Joksimović, Nemanja Milojčić

Centar za automatiku i regulaciju
Elektrotehnički institut Nikola Tesla
Beograd, Srbija
djordje.stojic@ieent.org

Sadržaj - U radu je predložen novi metod za projektovanje robusnog upravljanja statorskim naponom sinhronog generatora, zasnovanog na skupu intervalnih funkcija povratnog prenosa baziranih na Haritonovim polinomima. Sekvencijalni PI regulator je projektovan u frekvencijskom domenu. Intervalne funkcije povratnog prenosa prvog reda dobijene su uzimajući promenljive vrednosti parametara potpunog nelinearnog modela sinhronog generatora u različitim opterećenjima i topologijama mreže. Koristeći metod izložen u radu, PI regulator se projektuje za ekstremne vrednosti intervalnih funkcija povratnog prenosa, podešavanjem vrednosti presečne učestanosti i preteka faze.

Ključne riječi - Regulator napona statora, Sinhroni generator, robusno upravljanje, Haritonovljeva teorema

I. UVOD

Projektovanje robusnog upravljanja statorskim naponom (USN) sinhronog generatora (SG) predstavlja temu velikog broja radova iz oblasti tehnike, a sve zbog promenljivih uslova rada tipičnih za agregate elektroenergetskog sistema. Cilj robusnog upravljanja je obezbeđivanje takvog odziva statorskog napona koji vrednostima svojih dinamičkih pokazatelja, u svim režimima rada SG, ulazi u okvire standardom definisanih vrednosti. Na ovaj način se garantuje da dinamičke performanse generatora doprinose opštoj stabilnosti elektroenergetskog sistema.

Robusno USN se oslanja na teoriju, kako linearnog, tako i nelinearnog upravljanja. U [1], predloženo je linearno sekvencijalno diferencijalno upravljanje koje omogućava robusno USN dajući značajno povećanje vrednosti preteka faze upravljačkog sistema. Nedostatak predložene strukture upravljanja leži u činjenici da uvođenje lead-leg člana povećava osetljivost sistema na merni šum, zbog svog diferencijalnog dejstva.

U [2] i [7] je, umesto diferencijalnog lead-lag člana, implementiran sekvencijalni PID regulator, sa ciljem postizanja nulte greške USN u stacionaranom stanju. Robusno upravljanje je obezbeđeno usvajanjem velike vrednosti za projektovani pretek faze u oba rešenja, [2] i [7], gde su u [2] data i dva različita pristupa u projektovanju PID regulatora: (i) metoda podešavanja polova [3] i (ii) metoda skraćivanja polova [4].

Takođe, u [3] i [4] projektovanje USN je sprovedeno korišćenjem modela SG u praznom hodu, jer je u tom režimu robusnost USN najmanja, kako stoji u [2], gde je izloženo i poređenje osetljivosti metoda iz [3] i [4] u odnosu na promene vrednosti parametara SG.

Projektovanje optimalnog PID regulatora predloženo je u [10]-[12], idući od osnovnih kriterijuma optimizacije, pa sve do rešenja zasnovanih na opštim algoritmima optimizacije. U [13] je predstavljena nova metoda optimizacije zasnovana na teoriji rojeva, sa ciljem obezbeđivanja robusnijeg USN u poređenju sa klasičnim rešenjima [10]-[12]. Poboljšanje metode u [13] ostvareno je i korišćenjem numeričkog optimizacionog algoritma, koji je manje zahtevan u pogledu računarskih resursa u poređenju sa [10]-[12]. Takođe u [13], izložena je i obimna analiza podešavanja PID regulatora korišćenjem integralnog kriterijuma optimizacije, zasnovanog na linearizovanom modelu SG datog u radu.

U [14], predstavljeno je robusno USN gde je korišćen gain-scheduling PI regulator [15]-[18], podešavan u skladu sa različitim radnim tačkama sinhronog generatora. Pokazano je da se može ostvariti poboljšanje dinamičkih performansi u poređenju sa upravljanjem zasnovanim na jednom PID regulatoru.

U [19] je, kao alternativa sekvencijalnom PID regulatoru, predloženo USN bazirano na linearnom opserveru. Pokazano je da se, iako je projektovanje opservera zasnovano na pojednostavljenom modelu SG, dobija robusnije upravljanje u poređenju sa klasom USN baziranih na rešenjima sa PID regulatorom.

Kako se za različite režime rada SG može posmatrati kao nelinearni sistem, postoji nekoliko nelinearnih USN sa ciljem postizanja boljih dinamičkih performansi i robusnijeg upravljanja u poređenju sa linearnim USN. U [20], predstavljeno je fazi USN, zajedno sa uporednom analizom u odnosu na rešenja bazirana na PID regulatoru, gde je naglašeno unapređenje dobijeno predloženim rešenjem.

Drugi tip nelinearnog USN, projektovanog sa ciljem obezbeđivanja robusnog upravljanja, bazirano je na sistemima promenljive strukture i kliznom režimu upravljanja [21]-[26]. U [21], predloženo je robusno klizno upravljanje sa

minimiziranim oscilovanjem upravljačkog signala korišćenjem linearnog opservera. U [22], predložena je drugačija tehnika minimizacije oscilovanja upravljačkog signala, gde je povećan red kliznog upravljanja.

U ovom radu, robusno USN omogućeno je upotrebom sekvencijalnog PI regulatora projektovanog korišćenjem intervalnih funkcija povratnog prenosa baziranih na Haritonovim polinomima [30]. Naime, u referenci [30] je pokazano da je dovoljno analizirati dinamičke karakteristike sekvencijalnog regulatora prvog reda u kombinaciji sa 16 intervalnih funkcija povratnog prenosa, dobijenih kao 4x4 kombinacija Haritonovih polinoma u imeniocu i brojiocu funkcije prenosa modela generatora. Shodno tome, ukoliko projektovani regulator ispunjava zahtevane pokazatelje dinamičkih performansi za pomenutih 16 intervalnih funkcija povratnog prenosa, iste će zadovoljavati i za sve intervalne funkcije povratnog prenosa, definisane u opsezima promene parametara modela sinhronog generatora.

Obzirom da su zahtevani pokazatelji dinamičkih performansi definisani u frekventijskom domenu, sekvencijalni PI regulator se projektuje upravo u tom domenu, odnosno podešavanjem vrednosti ukupnog preteka faze sistema i presečne učestanosti na zadate vrednosti.

Takođe, robusnost predloženog upravljanja je osigurana valjanim definisanjem parametara ekstremnih intervalnih funkcija povratnog prenosa. Naime, kao osnova za analizu dinamičkih performansi USN uzet je nelinearni model SG visokog reda uparenog sa elektroenergetskom mrežom. Ipak, definisanje ekstremnih intervalnih funkcija povratnog prenosa značajno se pojednostavljuje svođenjem linearizovanog modela SG na funkciju prenosa niskog reda sa promenljivim parametrima u odnosu na režim rada SG [30]. Time se definiše skup intervalnih funkcija spregnutog prenosa prvog reda,

korišćenjem Haritonovih polinoma u imeniocu i brojiocu sa koeficijentima čije su ekstremne vrednosti unutar predefinisanih intervala [30]. Ove intervalne funkcije se koriste za projektovanje robusnog PI regulatora sa ciljem obezbeđivanja zahtevanih vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi (preteka faze i presečne učestanost) za sve ekstremne tačke posebno. Treba napomenuti da je ovakav tip projektovanja robusnog upravljanja baziranog na Haritonovim intervalnim funkcijama povratnog prenosa moguć samo za regulator prvog reda [30].

Rad se sastoji iz pet poglavlja. U poglavlju II dat je potpun nelinearni model sinhronog generatora korišćen u radu za projektovanje regulatora. Takođe, prikazan je linearizovani model prvog reda zajedno sa opsezima koeficijenata definisanih nelinearnostima i promenljivim režimima rada generatora. Kao posledica promenljivih vrednosti koeficijenata funkcije prenosa, definisane su i intervalne funkcije prenosa korišćene za projektovanje robusnog upravljanja. U poglavlju III prikazana je procedura projektovanja regulatora, data u vidu podešavanja dinamičkih pokazatelja u frekventijskom domenu. U poglavlju IV dati su odzivi simulacije intervalnih funkcija prenosa.

II. MODEL SINHRONOG GENERATORA

U ovom radu, projektovanje USN bazira se na linearizovanom modelu sinhronog generatora prvog reda dobijenog od modela sinhronog generatora visokog reda datog u prostoru stanja. Potpun nelinearni model (1) definisan je u [28], dok su parametri 300MW sinhronog generatora termo-agregata originalno definisani u vidu tranzijantnih vremenskih konstanti i reaktansi. Veza između parametara modela (1) i tranzijentnog oblika parametara sinhronog generatora data je u [29].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ 0 \\ v_q \\ 0 \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{R} & 0 & 0 & \omega_0 \hat{L}_q & \omega_0 kM_Q & \hat{\lambda}_{q0} & 0 \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 \hat{L}_d & -\omega_0 kM_F & -\omega_0 kM_D & \hat{R} & 0 & -\hat{\lambda}_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 & 0 \\ \frac{\hat{\lambda}_{q0} - \hat{L}_d i_{q0}}{3} & \frac{-kM_F i_{q0}}{3} & \frac{-kM_D i_{q0}}{3} & \frac{-\hat{\lambda}_{d0} + \hat{L}_q i_{d0}}{3} & \frac{kM_Q i_{d0}}{3} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ \omega \\ \delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{L}_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_F \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_Q \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

U (1), fluks statora predstavljen je sledećim relacijama: $\lambda_d = i_d L_d + i_F k M_F + i_D k M_D$ i $\lambda_q = i_q L_q + i_Q k M_Q$. Ekvivalentna otpornost i induktivnost mreže, sadržani su u (1) u obliku: $\hat{\lambda}_d = \lambda_d + L_e i_d$, $\hat{\lambda}_q = \lambda_q + L_e i_q$, $\hat{L}_d = L_d + L_e$, $\hat{L}_q = L_q + L_e$, $R = r + R_e$. Model je definisan u rotacionom dq koordinatnom sistemu sinhronim sa rotorom. Promenljive stanja modela sinhronog generatora su: brzina rotora ω , ugao snage δ , struja pobude generatora i_F , statorske komponente struje i_d i i_q , komponente struje prigušnih namotaja i_D i i_Q . Ulazne promenljive modela su: napon pobude v_F , mehanički moment T_m turbine agregata, kao i ekvivalentne komponente napona mreže v_d i v_q .

Kako je regulator projektovan za praktičnu primenu na 300MW termo-agregatu, projektovanje regulatora je zasnovano na sledećim odgovarajućim parametrima SG u tranzijentnom obliku: $X_d = 2.13$ pu, $X_d' = 0.3$ pu, $X_d'' = 0.23$ pu, $X_q = 2.13$ pu, $X_q' = 0.45$ pu, $X_q'' = 2.13$ pu, $X_l = 0.2$ pu, $T_{do}' = 7$ s, $T_{do}'' = 0.02$ s, $T_{qo}'' = 0.02$ s, $R_s = 0.0551$ pu. Veza između seta parametara SG u tranzijentnom obliku i seta parametara SG sadržanih u jednačini (1) data je u [29].

Jednačina (1) predstavlja potpun nelinearni model sinhronog generatora vezanog na mrežu. Kako sinhroni generator može da radi u različitim uslovima (npr. u praznom hodu, vezan na mrežu promenljive topologije ili promenljivog rezistivnog, induktivnog ili kapacitivnog opterećenja), analiza efekata nelinearnosti modela sinhronog generatora na dinamičke performanse USN može predstavljati zametan zadatak ukoliko se koristi potpun nelinearni model sinhronog generatora. Kao posledica toga, u [28] dat je pojednostavljen linearizovani model sinhronog generatora prvog reda u vidu sledećih jednačina:

$$\begin{aligned} E_q' &= \frac{c_1}{1 + \tau_s} v_F - \frac{c_2}{1 + \tau_s} \delta, \\ T_e &= c_5 \delta + c_6 E_q', \\ v_t &= c_7 \delta + c_8 E_q', \\ \omega &= \frac{1}{s} \frac{T_m - T_e}{\tau_j}, \\ \delta &= \frac{1}{s} \omega_\Delta. \end{aligned} \quad (2)$$

U (2), E_q' predstavlja q -komponentu indukovane elektromotorne sile statora, dok v_t predstavlja efektivnu vrednost napona statora.

U slučaju modelovanja sinhronog generatora za potrebe projektovanja USN, pokazano je u [2] i [28] da se treći red modela sinhronog generatora (2) dalje može pojednostaviti do linearizovane funkcije prenosa prvog reda date u obliku (3).

$$v_t = k_0 \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 T_{d0}' s} v_F \quad (3)$$

Iako je složeni nelinearni model SG (1), za potrebe projektovanja USN, linearizacijom doveden do funkcije

prenosa prvog reda (3), efekti nelinearnosti sistema određeni promenljivim uslovima rada generatora, se manifestuju promenljivim vrednostima koeficijenata u funkciji prenosa (3). Naime, u [28] data je veza između koeficijenata funkcije prenosa (3) i režima rada generatora u smislu topologije mreže i opterećenja generatora.

U (3), parametri k_0 i T_{d0}' predstavljaju pojačanje u stacionarnom stanju i tranzijentnu vremensku konstantu u praznom hodu, respektivno. Parametri se mogu dobiti linearizacijom modela SG [28] ili identifikovati iz step odziva napona statora SG u praznom hodu. Efekti nelinearnog modela (1) se manifestuju u smislu promenljivih vrednosti parametara k_1 i k_2 za različite režime rada generatora.

Uzimajući u obzir tranzijentne i subtranzijentne impedanse i vremenske konstante definisane za 300MW termo-agregat dobijaju se sledeće vrednosti konstanti funkcije prenosa (3): $k_0 = 1575$ i $T_{d0}' = 7$ s. Polazeći od različitih topologija mreže za određeni 300MW termo-agregat, prema [28] dobija se da se vrednost konstante k_1 kreće u opsegu [1, 1.6], dok se vrednost konstante k_2 kreće u opsegu [0.6, 1.15] za varijacije aktivne i reaktivne snage u punom opsegu.

Time se obuhvata uticaj kako različitih topologija mreže tako i različitih opterećenja generatora, pa se funkcija prenosa (3) može prikazati u obliku:

$$G_{SG}(s) = \frac{v_t(s)}{v_F(s)} = k_0 \frac{[0.6, 1.84]}{1 + [1, 1.6] T_{d0}' s} \quad (4)$$

pa se za usvojene vrednosti k_0 i T_{d0}' dobija:

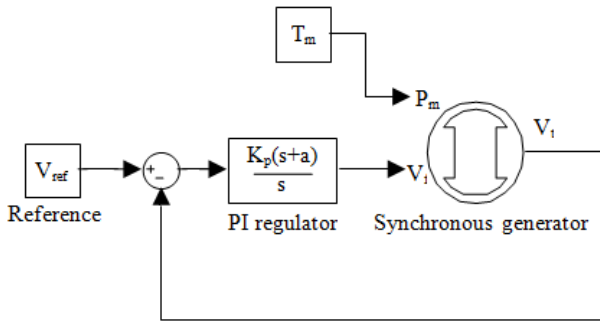
$$G_{SG}(s) = \frac{v_t(s)}{v_F(s)} = \frac{[945, 2898]}{1 + [7, 11.3] s} \quad (5)$$

Na osnovu (5), dolazi se do seta ekstremnih intervalnih funkcija povratnog prenosa na osnovu kojih se projektuje sekvencijalni PI regulator [30].

III. PROJEKTOVANJE REGULATORA

Na slici 1 je prikazana struktura USN koja je u ovom radu korišćena za projektovanje regulatora i analizu dinamičkih performansi. Upravljačka struktura se sastoji od sekvencijalnog PI regulatora, namenjena za realizaciju robusnog USN, zasnovanog na modelu sinhronog generatora koji obuhvata skup intervalnih funkcija povratnog prenosa [30]. Pokazano je u [30] da se bilo koja od klasičnih metoda projektovanja sekvencijalnog regulatora može koristiti nad skupom intervalnih funkcija povratnog prenosa na isti način kao što bi se činilo sa jednom funkcijom povratnog prenosa, ali pod uslovom da je regulator maksimalno prvog reda.

Kako su zahtevani pokazatelji dinamičkih performansi tipični za USN [1] definisani u frekvencijskom domenu, tako je i u ovom radu korišćena procedura za podešavanje regulatora upravo u frekvencijskom domenu, odnosno zasniva se na podešavanju preteka faze i presečne učestanosti sistema u otvorenoj sprezi.



Slika 1. Struktura upravljanja statorskim naponom sinhronog generatora

Dalje, u [30] je pokazano da ako su imenilac i brojilac funkcije prenosa objekta upravljanja $W(s) = N(s)/D(s)$ definisani u obliku intervalnih polinoma (polinomi sa koeficijentima promenljivih vrednosti), onda se robusni regulator treba projektovati samo za 16 ekstremnih intervalnih funkcija povratnog prenosa definisanih kombinacijom četiri Haritonova intervalna polinoma u imeniocu i četiri Haritonova intervalna polinoma u brojiocu. Drugim rečima, ako koeficijenti polinoma brojioca n_i i imenioca d_i menjaju vrednosti u opsezima $[n_i^-, n_i^+]$ i $[d_i^-, d_i^+]$, respektivno, tada su ekstremni polinomi brojioca i imenioca definisani sledećim skupom jednačina (6):

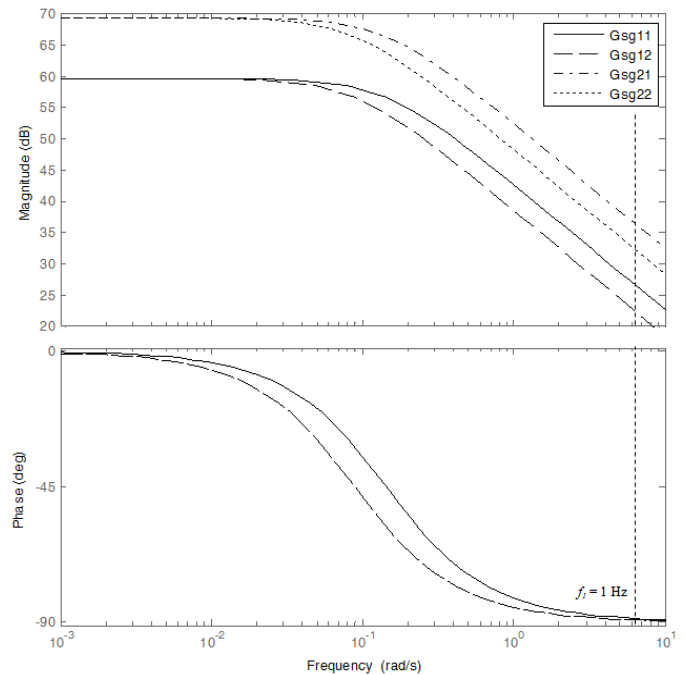
$$\begin{aligned}
 N_1(s) &= n_0^- + n_1^- s + n_2^+ s^2 + n_3^+ s^3 + \dots \\
 N_2(s) &= n_0^+ + n_1^+ s + n_2^- s^2 + n_3^- s^3 + \dots \\
 N_3(s) &= n_0^- + n_1^+ s + n_2^- s^2 + n_3^+ s^3 + \dots \\
 N_4(s) &= n_0^+ + n_1^- s + n_2^+ s^2 + n_3^- s^3 + \dots \\
 D_1(s) &= d_0^- + d_1^- s + d_2^+ s^2 + d_3^+ s^3 + \dots \\
 D_2(s) &= d_0^+ + d_1^+ s + d_2^- s^2 + d_3^- s^3 + \dots \\
 D_3(s) &= d_0^- + d_1^+ s + d_2^- s^2 + d_3^+ s^3 + \dots \\
 D_4(s) &= d_0^+ + d_1^- s + d_2^+ s^2 + d_3^- s^3 + \dots
 \end{aligned} \tag{6}$$

Kako imamo po četiri ekstremna polinoma brojioca i imenioca, to čini 16 ekstremnih intervalnih funkcija povratnog prenosa koje je potrebno koristiti za projektovanje robusnog regulatora prvog reda [30]. U slučaju linearizovanog modela SG prvog reda (5), u skladu sa (6), dobijaju se četiri intervalne funkcije povratnog prenosa (7).

Kako je prethodno rečeno, regulator je projektovan u frekvencijskom domenu, na bazi podešavanja preteka faze i presečne učestanosti. Zahtevane vrednosti preteka faze i presečne učestanosti za sinhroni generator od nekoliko stotina megavata nominalne aktivne snage su $\varphi_m = 90^\circ$ i $f_l = 1$ Hz [1] respektivno.

$$\begin{aligned}
 G_{SG11}(s) &= \frac{N_1(s)}{D_1(s)} = \frac{n_0^-}{1 + d_1^- s} = \frac{945}{1 + 7s} \\
 G_{SG12}(s) &= \frac{N_1(s)}{D_2(s)} = \frac{n_0^-}{1 + d_1^+ s} = \frac{945}{1 + 11.3s} \\
 G_{SG21}(s) &= \frac{N_2(s)}{D_1(s)} = \frac{n_0^+}{1 + d_1^- s} = \frac{2898}{1 + 7s} \\
 G_{SG22}(s) &= \frac{N_2(s)}{D_2(s)} = \frac{n_0^+}{1 + d_1^+ s} = \frac{2898}{1 + 11.3s}
 \end{aligned} \tag{7}$$

U slučaju projektovanja robusnog PI regulatora, zahtevane vrednosti preteka faze i presečne učestanosti moraju biti ostvarene za sve četiri ekstremne intervalne funkcije povratnog prenosa (7). Frekvencijske karakteristike sve četiri ekstremne funkcije povratnog prenosa date su na slici 2.



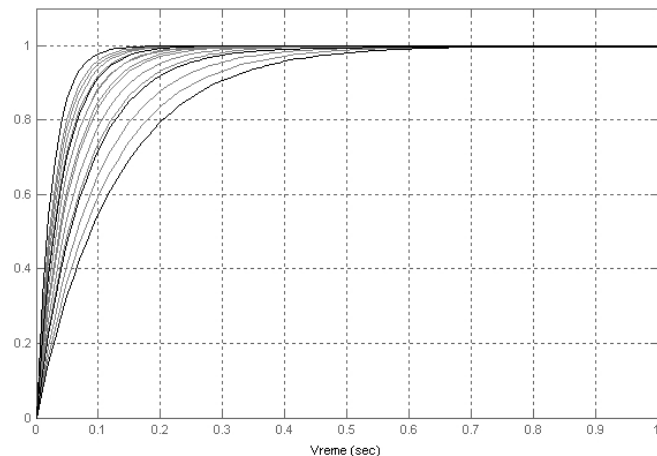
Slika 2. Frekvencijske karakteristike sve četiri ekstremne funkcije povratnog prenosa

Za datu strukturu regulatora (8), najpre se usvaja da je $a = 1/d_1^+ = 0.0885$ čime se obezbeđuje vrednost preteka faze od minimum 90° . Za tako usvojenu vrednost parametra a , vrednost parametra K_p se određuje tako da presečna učestanost sistema u otvorenoj sprezi za bilo koju funkciju prenosa unutar granica definisanih intervalnim funkcijama prenosa iznosi minimum 1Hz, čime se dobija vrednost $K_p = 0.0944$.

$$H_{PI}(s) = K_p \frac{s + a}{s} \tag{8}$$

IV. REZULTATI SIMULACIJE

Na slici 3 prikazani su step odzivi sistema sa zatvorenom povratnom spregom, pri čemu su za objekat upravljanja uzete četiri ekstremne funkcije prenosa i, kao ilustracija, dvanaest nasumično odabranih funkcija prenosa uzetih iz opsega definisanih intervalnim funkcijama prenosa. Upravljanje je realizovano u obliku sekvencijalnog PI regulatora sa prethodno usvojenom strukturom i dobijenim vrednostima parametara $a = 1/d_1^+ = 0.0885$, $K_p = 0.0944$.



Slika 3. Step odzivi sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi (crno – step odzivi ekstremnih funkcija prenosa; sivo – step odzivi dvanaest nasumično odabranih funkcija prenosa)

Kao što pokazuje i teorijska analiza, step odzivi četiri ekstremne funkcije prenosa definišu pojas unutar kojeg se nalaze step odzivi bilo koje funkcije prenosa uzete iz opsega definisanog intervalnim funkcijama prenosa. Posledica toga je, ako su ispunjeni zahtevi u smislu dinamičkih pokazatelja (preteka faze i presečne učestanosti) za sve četiri ekstremne funkcije prenosa, tada će oni biti ispunjeni i za bilo koju funkciju prenosa iz zadatog intervala za usvojenu strukturu PI regulatora prvog reda.

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan novi metod za projektovanje robusnog upravljanja statorskim naponom sinhronog generatora zasnovanog na skupu intervalnih funkcija povratnog prenosa baziranih na Haritonovim polinomima. Usvajanjem strukture regulatora u obliku sekvencijalnog PI regulatora prvog reda, kao i oslanjajući se na činjenicu da se dinamika sinhronog generatora može modelovati linearnim modelom prvog reda, podešavanje parametara sekvencijalnog PI regulatora svodi se na analizu stabilnosti sistema nad skupom od četiri ekstremne funkcije prenosa sinhronog generatora. Nelinearnosti potpunog modela sinhronog generatora, kao i različite topologije elektroenergetske mreže i opterećenja pri kojima sinhroni generator može biti u radu, obuhvaćeni su vrednostima koeficijenata intervalne funkcije prenosa sinhronog generatora, koje se nalaze unutar granica definisanih sa četiri ekstremne funkcije prenosa.

U radu je pokazano da se robusno upravljanje ostvaruje time, što se ispunjenjem postavljenih zahteva, u vidu zadatih vrednosti dinamičkih pokazatelja (preteka faze i presečne

učestanosti), za četiri ekstremne funkcije prenosa sinhronog generatora, garantuje ispunjenje postavljenih zahteva za bilo koju funkciju prenosa uzetu iz definisanog intervala.

LITERATURA

- [1] IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of Dynamic Performance of Excitation Control System, IEEE Std 421.2-1990, 1990
- [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-Morales, 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.

ABSTRACT

A new method for the robust synchronous generator stator voltage controller design is proposed in this paper, based on the Kharitonov set of interval plants. The proposed sequential PI controller is designed by using the frequency domain techniques and dynamic performance indices defined by the related standard literature, based on the set of interval plants determined by the variable values of the synchronous generator model parameters. The interval plants are derived from the full order model of the synchronous generator coupled to the power grid, and are represented by the linearized first order transfer functions defined by the different synchronous generator operating conditions and different power grid topologies. The PI controller is designed for the extreme interval plants, by tuning the control system phase margin and cutoff frequency values, using the design technique outlined in the paper.

ROBUST SYNCHRONOUS GENERATOR VOLTAGE CONTROL BASED ON EXTREME POINT INTERVAL PLANTS

Dorđe Stojić, Milan Milinković, Slavko Veinović, Dušan Joksimović, Nemanja Milojčić