PROJEKTOVANJE REGULATORA NAPONA STATORA SIHNRONOG GENERATORA STATIČKOG SISTEMA POBUDE

DESIGN OF THE STATOR VOLTAGE REGULATOR FOR THE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH STATIC EXCITATION SYSTEM

Đorđe Stojić, Milan Milinković, Slavko Veinović, *Elektrotehnički institute "Nikola Tesla", Univerzitet u Beogradu*

Sadržaj - *U radu je dat prikaz projektovanja regulatora napona statora sinhronog generatora implementiran u statičkom sistemu pobude. Projektovanje regulatora je izvršeno korišćenjem modela sinhronog generatora u praznom hodu i na mreži. Struktura regulatora napona, kao i određivanje vrednosti parametara regulatora izvršene su u skladu sa modelom sinhronog generatora i projektovanim dinamičkim karakteristikama prelaznih procesa sinhrone mašine. Regulator je projektovan u diskretnom domenu, gde su inicijalna ispitivanja izvršena na simulacionom modelu sinhronog generatora u praznom hodu i na mreži. U radu su dati i snimci odziva napona statora na hidro postrojenju Agregata C u HE «Potpeć» Elektroprivrede Srbije*.

Abstract – *In this paper, the design of synchronous generator stator voltage regulator is presented, implemented as an integral part of a static excitation system. The regulator design is performed by using the synchronous generator model in the idle run and connected to the power grid. The choice of appropriate controller structure and parameter values are carried out in accordance with the synchronous generator model and required dynamic performance characteristics. The regulator is designed in the discrete domain, while the initial performance analysis is carried out by using the simulation runs of the synchronous generator in the idle run and connected to the power grid. In the paper, the experimental results of the stator voltage regulator performance are included, taken on the "C" aggregate of the "Potpec" power plant within the EPS.*

1. UVOD

U radu je dat analitički prikaz projektovanja digitalnog regulatora napona statora sinhronog generatora, realizovanog korišćenjem statičkog sistema pobude baziranog na punoupravljivom tiristorskom mostu. Metoda projektovanja regulatora napona statora zasnovana je na upotrebi linearizovanog modela sinhronog generatora u praznom hodu, i na mreži. Takođe, prilikom projektovanja regulatora korišćen je linearizovani model punoupravljivog tiristorskog mosta.

Projektovanje parametara regulatora zasnovano je na metodi podešavanja položaja dominantnih polova sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi, gde je željeni položaj polova (odnosno, projektovana dinamika upravljačkog sistema) određen standardima definisanom dinamikom odziva regulatora napona statora.

Iako je proces projektovanja regulatora zasnovan na linearizovanom modelu generatora, pri simulaciji sistema, u cilju verifikacije procedure projektovanja regulatora, kao i u cilju verifikacije linearizacije modela sinhronog generatora, korišćen je prošireni model sinhronog generatora u *dq* koordinatnom sistemu. Takođe, u radu su dati i odzivi regulatora napona statora na realnom objektu, agregatu A u HE «Potpeć», elektrane u okviru Kompanije «Limsko-Drinskih elektrana» Elektroprivrede Srbije.

2. MODEL SINHRONOG GENERATORA

Prošireni model sinhronog generatora (1), dat u [1], definiše dinamičke karakteristike sinhronog generatora na mreži date u *dq* koordinatnom sistemu,

$$
\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ 0 \\ v_q \\ 0 \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \hat{R} & 0 & 0 & \omega_0 \hat{L}_q & \omega_0 k M_Q & \hat{\lambda}_{q0} & 0 \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 \hat{L}_d & -\omega_0 k M_F & -\omega_0 k M_D & \hat{R} & 0 & -\hat{\lambda}_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 & 0 \\ \dfrac{\hat{\lambda}_{q0} - \hat{L}_d i_{q0}}{3} & \dfrac{-kM_F i_{q0}}{3} & \dfrac{-kM_D i_{q0}}{3} & \dfrac{-\hat{\lambda}_{d0} + \hat{L}_q i_{d0}}{3} & \dfrac{kM_Q i_{d0}}{3} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \\ \omega \\ \delta \end{bmatrix}
$$

$$
-\begin{bmatrix} \hat{L}_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_F \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_Q \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \tag{1}
$$

gde je

$$
\hat{\lambda}_d = \lambda_d + L_e i_d,\ \hat{\lambda}_q = \lambda_q + L_e i_q,\ \hat{L}_d = L_d + L_e,\ \hat{L}_q = L_q + L_e,\ \hat{R} = r + R_e
$$

Parametri L_e i R_e predstavljaju ekvivalentne parametre mreže, dok preostali parametri služe za definisanje modela sinhrone mašine, datog u [1].

Kompletan model sinhronog generatora na mreži u *dq* koordinatnom sistemu (1), moguće je uprostiti i linearizovati za različite radne tačke na način opisan u [1]. Rezultujući model moguće je opisati sledećim sistemom jednačina

$$
\begin{aligned}
E'_q &= \frac{c_1}{1+\tau_{g1}s} v_F - \frac{c_2}{1+\tau_{g1}s}\delta, \\
T_e &= c_5\delta + c_6 E'_q, \\
v_t &= c_7\delta + c_8 E'_q, \\
\omega &= \frac{1}{s}\frac{T_m - T_e}{\tau_j}, \\
\delta &= \frac{1}{s}\omega_\Delta.
\end{aligned} \tag{2}
$$

gde v_F predstavlja napon pobude, v_t predstavlja efektivnu vrednost statorskog napona, i δ predstavlja ugao snage generatora. Vrednosti parametara linearizovanog modela τ_g i c_1-c_8 mogu se izračunati, ili identifikovati na proširenom modelu generatora, kao i na realnom objektu upravljanja.

Pošto je u radu dat prikaz procedure projektovanja regulatora napona statora u praznom hodu, gde se odzivi projektovanog regulatora ispituju za različite režime rada generatora uključujući i rad generatora na mreži, od interesa za analizu je linearizovan model generatora u praznom hodu (izveden iz sistema jednačina (2) sa uglom snage $\delta = 0$).

$$
v_t = \frac{c_1 c_7}{1+\tau_{g1}s} v_F = \frac{k_1}{1+\tau_{g1}s} v_F. \tag{3}
$$

Parametri linearizovanog modela (3) generatora u praznom hodu, dobijaju se na osnovu step odziva napona statora generatora u okolini radne tačke, definisane nominalnim naponom statora generatora.

Na osnovu step odziva struje pobude i napona statora generatora kompletnog simulacionog modela generatora [1] u praznom hodu, identifikovani su parametri diskretnog ekvivalenta (3) linearizovanog modela sinhronog generatora, za periodu odabiranja $T_s = 20$ ms.

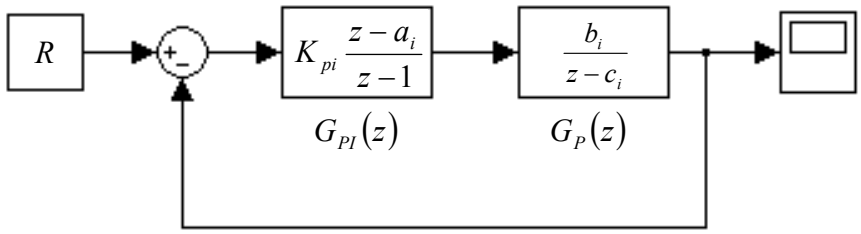
$$
v_t(z) = \frac{b_t}{z - c_t} = \frac{1.4938}{z - 0.9971} v_F(z). \tag{4}
$$

3. PROJEKTOVANJE REGULATORA

U radu je za regulaciju napona generatora korišćen diskretni PI regulator, dat jednačinom (5).

$$
G_{PI}(z) = K_{pi}\frac{z - a_i}{z - 1} \tag{5}
$$

Na Slici 1 dat je prikaz blok dijagrama regulacione petlje napona statora. Realizovan je kaskadni PI regulator, čija je forma definisana jednačinom (5). Diskretni model objekata upravljanja $G_P(z)$ za slučaj regulacije napona statora definisan je odgovarajućom funkcijom prenosa, datog jednačinom (4).



Slika 1. Blok dijagram regulatora struje rotora i napona statora

Na osnovu blok dijagrama datog na Slici 1 moguće je izvesti funkcije spregnutog prenosa regulatora struje pobude i napona statora, gde K_{pi} i a_i označavaju parametre regulatora $G_{PI}(z)$, a parametri b_i i c_i parametre odgovarajuće modela objekta upravljanja $G_P(z)$ datog jednačinom (4). Odgovarajuće funkcije spregnutog prenosa bloka regulacije napona statora dati su sledećom jednačinom

$$G(z)=\frac{G_{PI}(z)G_P(z)}{1+G_{PI}(z)G_P(z)}\,. \tag{6}$$

Na osnovu funkcije spregnutog prenosa (6) moguće je izvesti i jednačinu karakterističnog polinoma funkcije spregnutog prenosa sistema za regulaciju napona statora generatora.

$$\begin{aligned} D_t(z) &= (z-1)(z-c_t)+K_{pt}(z-a_t)b_t = \\ & z^2+(K_{pt}b_t-c_t-1)z+c_t-K_{pt}a_tb_t \end{aligned} \tag{7}$$

Vrednosti parametara regulatora mogu se izračunati metodom podešavanja mesta nula karakterističnog polinoma funkcije spregnutog prenosa regulacionog sistema. Podešavanje položaja nula karakterističnog polinoma vrši se na osnovu željene dinamike sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi, definisane standardima koji se bave tematikom dinamike odziva sistema pobude. U okviru rada, u cilju postizanja željene dinamike odziva usvojen je zahtev da karakteristično polinom sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi ima dve realne nule, i to $z_1 = \alpha_i$ i $z_2 = \alpha_i$ (gde se vrednost parametra α_i određuje na osnovu standardom definisanog propusnog opsega regulatora struje pobude i napona statora). U tom slučaju, karakteristični polinom funkcije spregnutog prenosa imao bi oblik

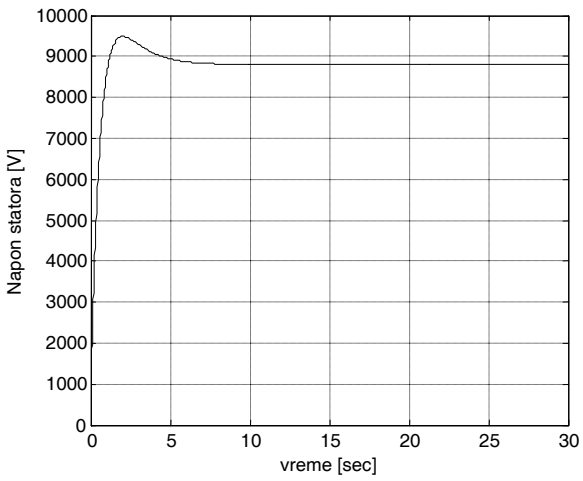
$$D(z)=z^2-2\alpha_i z+\alpha_i^{\,2} \tag{8}$$

Na osnovu jednačina (7) i (8) moguće je izvesti formule za proračun vrednosti parametara regulatora struje pobude i napona statora.

$$\begin{aligned} K_{pt} &= \frac{c_t+1-2\alpha_t}{b_t} \\ a_t &= \frac{c_t-\alpha_t^{\,2}}{K_{pt}b_t} \end{aligned} \tag{9}$$

Za tip agregata za koji se projektuju parametri regulatora usvojena je brzina odziva regulisanih veličina kojoj odgovara vreme odziva od 2 sekunde. Za periodu odabiranja regulatora T_s = 20 ms, projektovana dinamika odgovara nuli karakterističnih polinoma sistema za regulaciju struje pobude i napona statora u zatvorenoj povratnoj sprezi α_t = 0.935 i α_F = 0.935, kojima odgovaraju odzivi na step pobudu regulisanih veličina sa uzlaznom ivicom u trajanju od 1 sekunde. Na osnovu usvojenih vrednosti dominantnih polova regulacionog sistema u zatvorenoj sprezi, kao i jednačina (9), dobijene su sledeće vrednosti parametara regulatora struje pobude i napona statora generatora: K_{pt} = 0.0851, a_t = 0.9668.

Na Slici 2. dat je odziv efektivne vrednosti statorskog napona simulacije proširenog modela sinhronog generatora sa zatvorenim povratnom spregom po naponu statora.



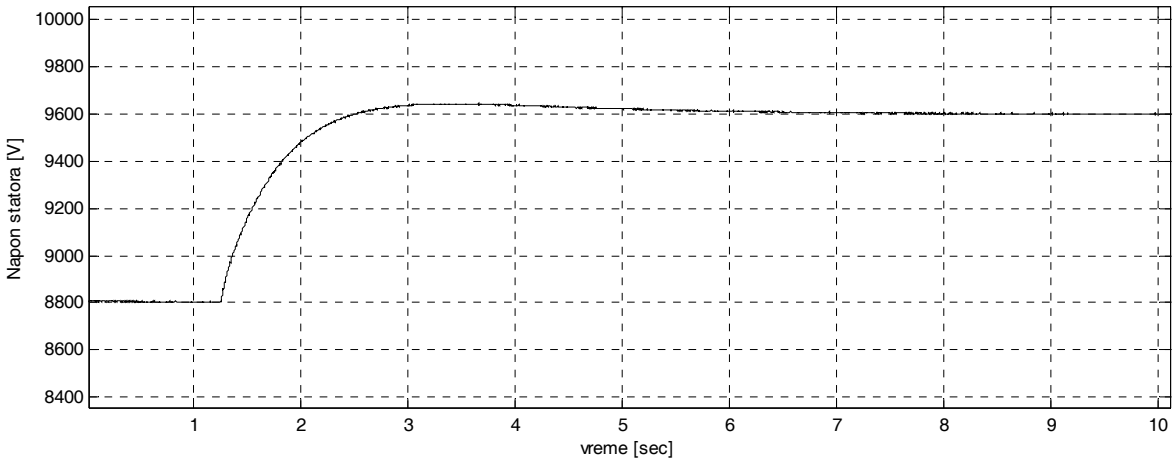
Slika 2. Odziv regulatora napona statora

Analizom rezultata simulacije proširenog modela generatora (1) sa zatvorenom povratnom spregom po naponu statora na Slici 3 može se zaključiti da postoje razlike u odzivima proširenog modela u odnosu na projektovane dinamike regulatora korišćenjem uprošćenog modela generatora. U slučaju regulatora napona statora, umesto aperiodičnog odziva bez preskoka sa uzlaznom ivicom u trajanju od 1 sekunde dobijen je aperiodičan odziv sa preskokom od 10 % i uzlaznom ivicom u trajanju od 800 ms.

Odstupanja projektovanih karakteristika regulatora napona statora u odnosu na rezultate odziva dobijenih

simulacijom proširenog modela generatora potiču od razlika između proširenog (1) i uprošćenog (2) modela sistema. Ipak, rezultati odziva naponske regulacije mogli bi poslužiti kao osnova za zaključak da se uprošćeni model sinhronog generatora (2) može koristiti za projektovanje karakteristika dominantne dinamike regulatora.

Na Slici 3. dati su rezultati simulacije odziva generatora na mreži za step poremećaj od +10%, gde se njihovom analizom može zaključiti da regulator napona statora zadržava projektovane dinamičke karakteristike i prilikom rada na mreži.

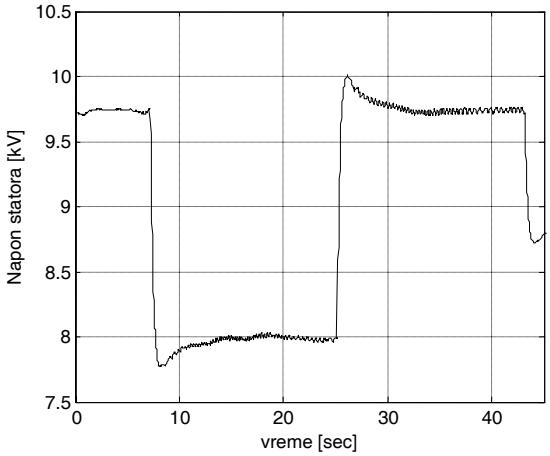


Slika 3. Simulacija odziva proširenog modela generatora na mreži

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju dati su rezultati odziva regulatora struje pobude i napona statora, snimljeni na Agregatu «C» HE «Potpeć» u okviru EPS-a. Projektovani regulatori su implementirani na statičkom sistemu pobude, korišćenjem linearizovanih modela energetskog pojačavača (punoupravljivog mosta) regulatora kao i regulisanog sinhronog generatora.

Na Slici 4. prikazani su odzivi struje pobude (a) i napona statora (b) projektovanih regulatora. Analizom dijagrama odziva može se zaključiti da je postignut prelazni režim napona statora karakterisani trajanjem uzlazne ivice od 500 ms.



Slika 4. Odzivi regulatora napona statora za promenu referentne vrednosti od 90% do 110%

5. ZAKLJUČAK

U okviru rada dat je prikaz projektovanja digitalnih regulatora struje pobude i napona statora sinhronog generatora, u okviru statičkog sistema pobude HE «Potpeć» EPS-a. Primenjena je proporcionalno-integralna struktura regulatora, gde je proračun vrednosti parametara regulatora izvršen korišćenjem metode podešavanja položaja nula karakterističnog polinoma funkcije spregnutog prenosa. Prilikom projektovanja regulatora korišćen je uprošćeni linearizovani model sinhronog generatora, dok su performanse rezultujućih regulatora verifikovane korišćenjem proširenog modela sinhronog generatora u praznom hodu i na mreži. U okviru rada, dat je prikaz i eksperimentalnih rezultata odziva struje pobude i napona statora na realnom objektu.

LITERATURA

[1] *Power System Control and Stability,* P. M. Anderson, A. A. Fouad, John Wiley & Sons, 2003.