

## MATEMATIČKI MODEL SISTEMA ZA REGULACIJU POBUDE SINHRONOG GENERATORA I IZBOR PARAMETARA REGULATORA

Maja S. Turković,  
Institut "Nikola Tesla", Beograd

**Sadržaj:** U radu je prikazan matematički model jednog savremenog sistema za regulaciju pobude, sa standardizovanim tipom pobudnog sistema AC4A, razvijen u prostoru stanja. Za modelovanje sinhronog generatora korišćen je uprošćeni linearizovani model sinhronne mašine. Izbor slobodnih parametara regulatora pobude vršen je za konkretan primer sinhronog generatora vezanog na krutu mrežu, na osnovu dinamičke analize koja je obuhvatila ispitivanja: stabilnosti sistema, odziva sistema i greške u stacionarnom stanju i kvaliteta prelaznog procesa. Pored toga, u radu je izvršena analiza osetljivosti podešenog regulatora pobude na promene najvažnijih parametara sistema. Za simulaciju razvijenog modela na računaru korišćen je programski paket MATLAB.

**Ključne reči:** pobudni sistem / regulacija / matematički model / parametri regulatora

### 1 UVOD

Poznato je da je napon, pored učestanosti, jedan od osnovnih parametara koji određuju sigurnost i ekonomičnost rada elektroenergetskog sistema (EES) i kvalitet isporučene električne energije. U idealnom slučaju napon u čvorištima EES-a treba da se održava konstantnim; u praksi on se održava u granicama tzv. vrlo visokog standarda koje obezbeđuju normalno funkcionisanje opreme i EES-a. S obzirom da su sinhroni generatori najvažniji elementi EES-a koji određuju performanse sistema u normalnim i prelaznim režimima rada, a da se regulacija napona na izvodima sinhronog generatora ostvaruje regulacijom njihove pobudne struje, to ključna uloga u rešavanju problema regulacije napona u savremenim EES pripada sistemima za regulaciju pobude.

Sinhroni generator je povezan sa sistemom pobude tako da formira sistem sa zatvorenim povratnom spregom, čime se ostvaruje automatska regulacija napona na krajevima mašine. S druge strane, statorski namotaji sinhronog generatora povezani su sa EES-om. Sa razvojem EES-a, zahtevi u pogledu regulacije napona su postajali sve oštriji što je dovelo i do razvoja sistema pobude čije performanse mogu da odgovore zahtevima savremenih EES-a.

Ovaj rad se upravo bavi problemima modelovanja i dinamičke analize jednog savremenog sistema za regulaciju pobude sa standardizovanim tipom pobudnog sistema, koji će poslužiti kao osnova za izbor slobodnih parametara regulatora pobude tako da se obezbede unapred zadate performanse sistema u karakterističnih režimima rada.

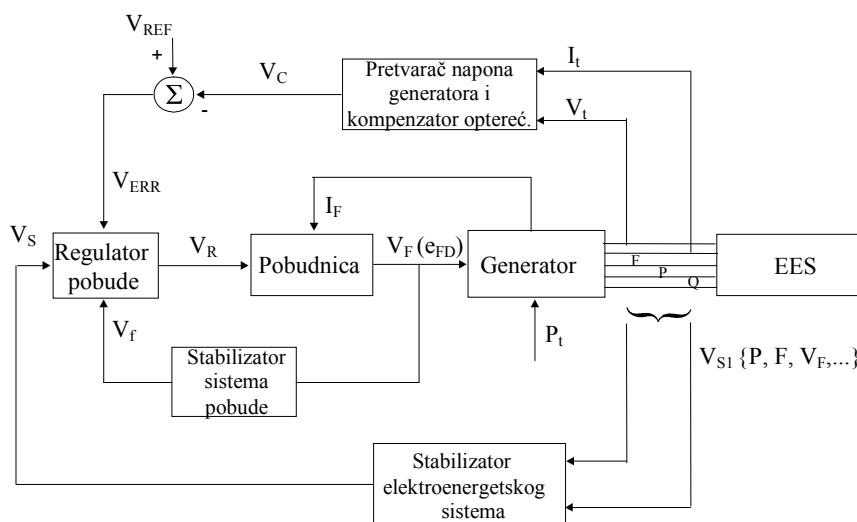
### 2 LISTA OZNAKA

$e$  – ems statora srazmerna pobudnoj struji  $i_F$ ;  
 $e_d, e_q$  – komponente ems  $e$  u  $d$  i  $q$ -osi;  
 $e'_d, e'_q$  – komponente ems  $e'$  u  $d$  i  $q$ -osi;  
 $e'$  – ems iza tranzijentne reaktanse  $X'_d$ ;

- $e_{FD}$  – ems srazmerna pobudnom naponu  $V_F$ ;
- $T_G=2H$  – vremenska konstanta ubrzanja (MWS/MVA);
- $T_{d0}$  – vremenska konstanta generatora u tranzijentnom periodu pri otvorenom kolu statora;
- $V_t, V_d, V_q$  – napon na izvodima generatora i njegove komponente u  $d$  i  $q$ -osi;
- $\omega=2\pi F$  – električna ugaona brzina (rad/s);
- $m_t$  – mehanički momenat generatora;
- $\delta$  - fazni ugao između referentne i  $q$ -ose sinhronog generatora (rad).

### 3 MATEMATIČKI MODEL SISTEMA ZA REGULACIJU POBUDE

Sistem za regulaciju pobude obuhvata sistem pobude i sinhroni generator kao objekat regulacije. Na sl.1 data je opšta strukturna šema sistema za regulaciju pobude sa izdvojenim blokovima koje obuhvata i naznačenim ulaznim i izlaznim promenljivim.



Sl.1. Opšta funkcionalna šema sistema za regulaciju pobude

Za dinamičku analizu sistema za regulaciju pobude i izbor slobodnih parametara regulatora pobude radi postizanja željenih performansi neophodno je izvršiti matematičko modelovanje elemenata koji ulaze u njegov sastav.

#### 3.1. Matematički model sinhronog generatora

Sinhroni generator predstavlja složen dinamički sistem koji se u opštem slučaju može opisati nelinearnim modelom. Za analizu dinamičkog ponašanja sinhronog generatora pri malim poremećajima, koja se vrši pri izboru slobodnih parametara regulatora pobude koristi se uprošćeni linearizovani model sinhronog generatora [3], [4], [5].

Uprošćeni linearizovani model sinhronog generatora vezanog za krutu mrežu preko spojnog voda izveden je uz sledeće pretpostavke:

- namotaji statora su simetrični;
- promene induktivnosti namotaja statora uslovljene položajem rotora su sinusoidalne i ne sadrže više harmonike;
- rad generatora sa uravnoteženim opterećenjem faza;
- zanemarene su aktivne otpornosti statora;
- zanemareni su efekti prigušnih namotaja;

- zanemareno je zasićenje i uticaj histerezisa;
- zanemarene su dinamičke promene flukseva u uzdužnoj i poprečnoj osi;
- u prelaznim stanjima brzina rotora  $\omega$  je bliska sinhronoj brzini  $\omega_n$ ;
- pozitivan smer d-ose prednjači q-osi.

Osnovne jednačine uprošćenog linearizovanog modela sinhronog generatora, napisane u prostoru stanja [1] su:

$$\Delta \dot{e}'_q = -\frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta e'_q - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta e_{FD} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{T_G} \Delta m_t - \frac{K_2}{T_G} \Delta e'_q - \frac{K_1}{T_G} \Delta \delta \quad (2)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta \omega = \omega - 1, \quad \text{za } \omega_n = 1 \text{ r.j.} \quad (3)$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta e'_q \quad (4)$$

gde su promenljive stanja  $[\Delta e_q, \Delta \omega, \Delta \delta]^T$ , promenljive izlaza  $[\Delta \delta, \Delta V_t]^T$ , a promenljive upravljanja  $[\Delta e_{FD}, \Delta m_t]^T$ .

Koeficijenti  $K_1, K_2, K_4, K_5$  i  $K_6$  zavise od početnog radnog režima mašine, napona krute mreže i parametara mašine i mreže, dok koeficijent  $K_3$  uvažava uticaj spoljne reaktanse preko koje je mašina vezana na mrežu beskonačne snage i ne zavisi od opterećenja mašine. Vrednosti ovih koeficijenata date su relacijama [1]:

$$K_1 = \left. \frac{\Delta M_e}{\Delta \delta} \right|_{\Delta E'_q=0} = K_I V_\infty \left\{ E_{qao} [R_e \sin(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \cos(\delta_o - \alpha)] + I_{qo} (X_q - X'_d) [(X_q + X_e) \sin(\delta_o - \alpha) - R_e \cos(\delta_o - \alpha)] \right\} \quad (5)$$

$$K_2 = \left. \frac{\Delta M_e}{\Delta E'_q} \right|_{\Delta \delta=0} = K_I \left[ R_e E_{qao} + I_{qo} (R_e^2 + (X_q + X_e)^2) \right] \quad (6)$$

$$\frac{1}{K_3} = 1 + K_I (X_d - X'_d) (X_q + X_e) \quad (7)$$

$$K_4 = K_I V_\infty (X_d - X'_d) [(X_q + X_e) \sin(\delta_o - \alpha) - R_e \cos(\delta_o - \alpha)] \quad (8)$$

$$K_5 = \left. \frac{\Delta V_t}{\Delta \delta} \right|_{\Delta E'_q=0} = K_I V_\infty \left\{ \frac{V_{qo}}{V_{to}} X'_d [R_e \cos(\delta_o - \alpha) - (X_q + X_e) \sin(\delta_o - \alpha)] - \frac{V_{do}}{V_{to}} X_q [(X'_d + X_e) \cos(\delta_o - \alpha) + R_e \sin(\delta_o - \alpha)] \right\} \quad (9)$$

$$K_6 = \left. \frac{\Delta V_t}{\Delta E'_q} \right|_{\Delta \delta=0} = \frac{V_{qo}}{V_{to}} [1 - K_I X'_d (X_q + X_e)] - \frac{V_{do}}{V_{to}} K_I X_q R_e \quad (10)$$

gde je

$$K_I = \frac{1}{R_e^2 + (X_q + X_e)(X_d' + X_e)} \quad (11)$$

(o) – oznaka za početno radno stanje generatora

Sve promenljive i parametri izraženi su u [r.j.], izuzev vremenskih konstanti koje su izražene u [s].

### 3.2. Modelovanje sistema pobude AC4A

Sistem pobude AC4A je standardizovani tip pobudnog sistema po IEEE-u, i sastoji se od regulatora pobude i naizmjenične pobudnice sa kontrolisanim ispravljačem. Regulator kontroliše ugao paljenja gejtja punoupravljivog tiristorskog mosta, a time i izlazni napon ispravljača, da bi se pobudni napon generatora održavao na željenoj vrednosti. Pobudnica se sastoji od naizmjeničnog pobudnog generatora i regulisanog tiristorskog ispravljača. Ograničenja pobudnog ispravljača usled tranzijentnog efekta opterećenja (pobudna struja  $I_{FD}$ ) i pada napona na komutacionoj reaktansi (koeficijent  $K_C$ ) modeluju se preko ograničavača elektromotorne sile  $e_{FD}$ . Stabilizacija sistema ostvaruje se izborom slobodnih parametara regulatora pobude, odnosno vremenskih konstanti  $T_C$  i  $T_B$ . Na ulaz u regulator pobude dovodi se signal greške, kao razlika referentnog signala napona  $V_{REF}$  i izlaznog signala iz pretvarača napona generatora i kompenzatora opterećenja  $V_C$ . U slučaju da postoji stabilizator sistema, sa referentnim signalom napona se sabira odgovarajući izlazni signal iz stabilizatora  $V_S$ .

Izlaz iz regulatora pobude vodi se na blok HV-gate, koji predstavlja propusnik veće od dve vrednosti na ulazu, gde je  $V_{UEL}$  zadato donje ograničenje pobudne struje.

#### 3.2.1. Matematički model pobudnice

Model pobudnice ima ograničavač promenljive tipa “non-windup” koji utiče na ograničenje izlaza ( $\Delta e_{FD}$ ) u zavisnosti od znaka njegove brzine promene ( $d\Delta e_{FD}/dt$ ). Ako je ulaz ( $\Delta V_R$ ) u zadatim granicama, izlaz ( $\Delta e_{FD}$ ) se oslobađa ograničenja. Pri modelovanju sistema pobude za velike poremećaje neophodno je u model uključiti ograničavače promenljivih. Za male poremećaje, pobudnica se može predstaviti jednom jednačinom u prostoru stanja:

$$\text{za } (V_{R_{\min}} - K_C I_{FD}) < \Delta e_{FD} < (V_{R_{\max}} - K_C I_{FD}) \Rightarrow \Delta \dot{e}_{FD} = \frac{\Delta V_R K_A - \Delta e_{FD}}{T_A} \quad (12)$$

#### 3.2.2. Matematički model regulatora pobude

Pri modelovanju regulatora pobude, uvodi se pomoćna promenljiva  $\Delta V_X$  koja je ujedno i promenljiva stanja u sistemu za regulaciju pobude[1].

Jednačine u prostoru stanja koje opisuju regulator pobude su:

$$\Delta \dot{V}_X = \Delta V_I - \frac{1}{T_B} \Delta V_X \quad (13)$$

$$\Delta V_R = \Delta V_X \left( \frac{1}{T_B} - \frac{T_C}{T_B^2} \right) + \Delta V_I \frac{T_C}{T_B} \quad (14)$$

$$\Delta V_I = \Delta V_{REF} + \Delta V_S - \Delta V_C \quad (15)$$

gde je  $\Delta V_i$  ulazni signal u regulator pobude. Izabrani sistem za regulaciju pobude ne sadrži stabilizator EES-a, pa je zanemaren signal iz stabilizatora  $\Delta V_S=0$ .

### 3.2.3. Matematički model mernog pretvarača

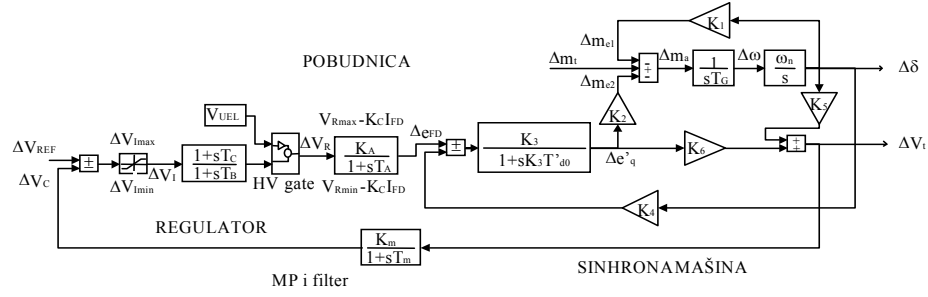
Jednačina mernog pretvarača i filtra, kada zanemarimo kompenzaciju pada napona, ima oblik:

$$\Delta \dot{V}_C = \frac{K_m}{T_m} \Delta V_i - \frac{1}{T_m} \Delta V_C \quad (16)$$

gde je  $\Delta V_C$  nekompensovani signal napona na izlazu iz mernog pretvarača i filtra a  $K_m$  i  $T_m$  pojačanje i vremenska konstanta mernog pretvarača i filtra.

### 3.3. Matematički model sistema za regulaciju pobude u prostoru stanja

Strukturna šema sistema za regulaciju pobude data je na slici 2.



Sl.2. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude (linearizovan model sinhronne mašine i model pobudnog sistema AC4A)

Za sintezu modela sistema za regulaciju pobude koriste se osnovne jednačine elemenata sistema izvedene u 3.1. i 3.2. Eliminisanjem veličina koje nisu ni promenljive stanja ni promenljive upravljanja, dobija se sistem od šest jednačina (17) koje u prostoru stanja predstavljaju model posmatranog sistema za regulaciju pobude.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{e}'_q &= -\frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta e'_q - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta e_{FD} \\ \Delta \dot{\omega} &= \frac{1}{T_G} \Delta m_t - \frac{K_2}{T_G} \Delta e'_q - \frac{K_1}{T_G} \Delta \delta \\ \Delta \dot{\delta} &= \omega - 1 \\ \Delta \dot{V}_C &= \frac{K_m K_5}{T_m} \Delta \delta + \frac{K_m K_6}{T_m} \Delta e'_q - \frac{1}{T_m} \Delta V_C \\ \Delta \dot{V}_X &= -\frac{1}{T_B} \Delta V_X - \Delta V_C + \Delta V_{REF} \\ \Delta \dot{e}_{FD} &= \frac{K_A}{T_A} \left( \frac{1}{T_B} - \frac{T_C}{T_B^2} \right) \Delta V_X + \frac{K_A T_C}{T_A T_B} \Delta V_{REF} - \\ &\quad - \frac{K_A T_C}{T_A T_B} \Delta V_C - \frac{1}{T_A} \Delta e_{FD} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

S obzirom da je opšti oblik linearizovanog modela sistema u prostoru stanja dat relacijom:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Fz \\ y &= c^T x \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

u kojima su:

$$\mathbf{x} = [\Delta e'_q, \Delta \omega, \Delta \delta, \Delta V_C, \Delta V_X, \Delta e_{FD}]^T \text{ - vektor stanja}$$

$$\mathbf{u} = [\Delta m_t, \Delta V_{REF}]^T \text{ - vektor upravljanja}$$

$$\mathbf{y} = [\Delta \delta, \Delta V_t]^T \text{ - vektor izlaza}$$

to se za sistem (17) definišu:

matrica sistema

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 T_{d0}} & 0 & -\frac{K_4}{T_{d0}} & 0 & 0 & \frac{1}{T_{d0}} \\ -\frac{K_2}{T_G} & 0 & -\frac{K_1}{T_G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_m K_6}{T_m} & 0 & \frac{K_m K_5}{T_m} & -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{T_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_A T_C}{T_A T_B} & \frac{K_A}{T_A} \left( \frac{1}{T_B} - \frac{T_C}{T_B^2} \right) & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (19)$$

matrica upravljanja

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_G} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_A T_C}{T_A T_B} \end{bmatrix} \quad (20)$$

matrica izlaza

$$\mathbf{c}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \omega_n & 0 & 0 & 0 \\ K_6 & 0 & K_5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

#### 4 IZBOR SLOBODNIH PARAMETARA REGULATORA POBUDE

Izbor slobodnih parametara regulatora pobude za konkretan primer sistema za regulaciju pobude, koga čine sinhroni generator (turbogenerator) sa standardizovanim tipom pobude AC4A, vezan za krutu mrežu, vršen je na osnovu dinamičke analize koja je obuhvatila ispitivanje:

- stabilnosti sistema;
- odziva sistema;
- kvaliteta prelaznog procesa.

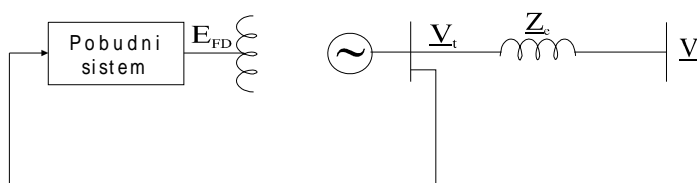
Za formirani matematički model (poglavlje 3.3.) razvijen je program koji omogućava računanje matrice stanja, ulaza i izlaza, funkcije spregnutog prenosa (sa zatvorenim povratnom spregom), sopstvene vrednosti matrice sistema i funkciju povratnog prenosa (sa raskinutom povratnom spregom) koji su neophodni za vršenje dinamičke analize. Pri tome je korišćen programski paket MATLAB.

##### 4.1. Podaci o sistemu

Uprošćena šema sistema za koji je vršena analiza data je na sl.3. Osnovni podaci o njegovim elementima dati su u Tabeli 1 [1].

Tabela 1 - Osnovni podaci o elementima sistema

A) Podaci o generatoru			
Nominalna prividna snaga		160 MVA	
Nom. napon, sprega statora		15 kV, zvezda	
Nominalna struja pobude		926 A	
Faktor snage		0,85	
Konstanta inercije		$H=2,37$ kWs/kVA	
Reaktanse generatora		$X_d=1,7$ r.j.; $X_q=1,64$ r.j.; $X'_d=0,245$ r.j.	
Tranzijentna vrem. konstanta rotora po d-osi		$T'_{d0}=5,9$ s	
Reaktansa spojnog voda		$r=0,4$ r.j.	
B) Parametri pobudnice		C) Parametri regulatora	
$K_A$	200	$T_C$	1 s *
$T_A$	0,015 s	$T_B$	10 s *
$V_{Rmax}$	5,64	$V_{Imax}$	10
$V_{Rmin}$	-4,53	$V_{Imin}$	-10
$K_C$	0	(*)-slobodni parametri	
D) Parametri mernog pretvarača			
$K_m$		1	
$T_m$		0,05 s	



Sl.3. Uprošćena šema sistema

## 4.2. Rezultati

Proračun je vršen u relativnim jedinicama pri čemu su kao bazne veličine za stator uzete nominalne fazne veličine snage i napona, za rotor je usvojen  $L_{AD}$ - recipročni sistem r.j.[2], a za pobudni sistem nerekipročan sistem r.j. Model sistema pobude je spregnut sa modelom sinhronne mašine i na strani statora, i na strani rotora. Konverzija relativnih jedinica između modela pobudnice (sa nerekipročnim sistemom r.j.) i modela sinhronne mašine (sa recipročnim sistemom r.j.) vrši se preko određenog pojačanja preko kojeg su povezani modeli ova dva podsistema, sa različitim bazama korišćenim pri normalizaciji njihovih jednačina.

Tabela 2 - Parametri modela sinhronne mašine

Koeficijent	Vrednost (r.j.)
$K_1$	1,0755
$K_2$	1,2578
$K_3$	0,3072
$K_4$	1,7124
$K_5$	-0,0409
$K_6$	0,4971

Parametri početnog režima izračunati su iz osnovnih parametara datih u Tabeli 1, koristeći pri tome relacije koje definišu ustaljeni režim rada sinhronog generatora [1],[2],[3]. Na osnovu podataka iz Tabele 1 i sračunatih parametara polaznog režima određeni su koeficijenti  $K_1$ - $K_6$  koji figurišu u linearizovanom modelu sinhronog generatora, i oni su dati u Tabeli 2.

### 4.2.1. Rezultati ispitivanja stabilnosti sistema za regulaciju pobude

Analiza stabilnosti vršena na osnovu položaja korena karakteristične jednačine, pri čemu je korišćena algebarska metoda sopstvenih vrednosti matrice sistema, i grafo-analiitička metoda GMK.

U Tabeli 3a date su sopstvene vrednosti matrice sistema, dobijene za specificirane parametre sistema [1], koje ukazuju na stabilnost pošto imaju negativne realne delove.

Tabela 3 – Sopstvene vrednosti matrice sistema

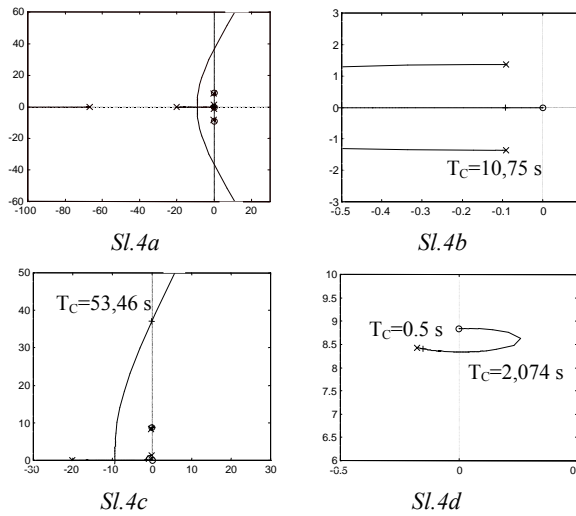
-67,3680	-67,0164
-17,3967	-18,8306
-1,1693±j0,8921	-0,5885±j1,2840
-0,1075±j8,3687	-0,1472±j8,3976

a) sa nepodešenim regulatorom

b) sa podešenim regulatorom

Primenom metode GMK ispitivan je položaj korena u odnosu na granicu stabilnosti. Analizom je utvrđeno da je osnovni faktor koji utiče na stabilnost postojanje nule u direktnoj grani (tj.  $T_C \neq 0$ ). Na slikama 4a-4d prikazani su rezultati sprovedene analize GMK po parametru  $T_C$ . Na sl.4a prikazan je izgled geometrijskih mesta svih korena sistema, a zatim su na sl.4b-4d uvećani segmenti ovog dijagrama i izračunate vrednosti  $T_C$  za odgovarajuće položaje polova sistema. Položaju para polova koji se nalaze u blizini koordinatnog početka odgovara vrednost  $T_C=10.75s$ , što ukazuje da ovaj segment nije kritičan (sl.4b).

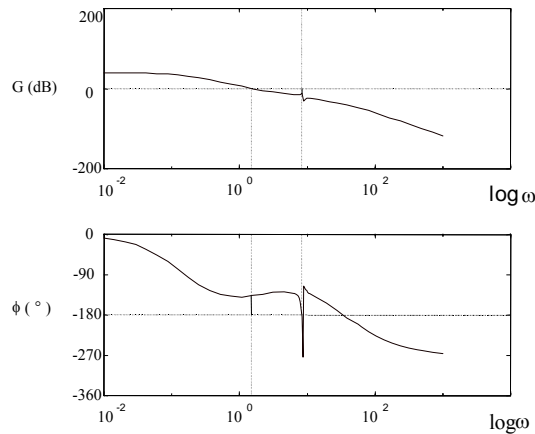




Sl.4. Geometrijska mesta korena sistema

Za deo dijagrama sa "krakom" (sl.4c) po kome pol prelazi u pozitivnu s-poluravan izračunata je vrednost  $T_C=53,46s$  kao granična, tj. ona za koju se pol nalazi na granici stabilnosti, pa se zaključuje da ni ovaj segment nije kritičan. Na sl.4d analiziran je segment koji se pokazao i kao najkritičniji. Naime, za vrednost  $T_C=2s$ , polovi prelaze u pozitivnu s-poluravan, dok za vrednost  $T_C=0s$  zauzimaju najpovoljniji položaj, tj. najudaljeniji od imaginarne ose. Prisustvo konačne nule može da utiče na kašnjenje u odzivu i time da prouzrokuje nestabilnost u smislu da odziv ne dostiže referentnu vrednost u stacionarnom stanju.

$$G=12.36 \text{ dB} ; \quad \phi =42.84^\circ$$



Sl.5. Bodeovi logaritamski dijagrami slabljenja i faze

Pošto je cilj sinteze razmatranog sistema za regulaciju pobude sa već izabranom strukturom regulatora, izbor slobodnih parametara, to se ovde problem svodi na podešavanje konstante  $T_C$  na odgovarajuću vrednost. Iz prethodne analize se zaključuje da bi konstanta  $T_C$  trebalo da uzme vrednost u intervalu 0-2s (kada je na granici stabilnosti), pa je izabrana vrednost  $T_C =0,5s$ . Odgovarajući položaj polova prikazan je na sl.4d, dok su sopstvene vrednosti matrice sistema za tako podešene parametre

regulatora ( $T_C=0,5s$ ,  $T_B=10s$ ) date u Tabeli 3b. Dobijeni rezultati pokazuju da je sistem stabilan.

Za ispitivani sistem dobijeni su Bode-ovi dijagrami slabljenja i faze (slika 5). Izračunate vrednosti preteka pojačanja  $G=12,36dB$  ( $\omega=8,292$ ) i preteka faze  $\phi=42,84^\circ$  ( $\omega=1,514$ ) zadovoljavaju sa gledišta specificiranih indeksa performansi ( $G \geq 6dB$ ,  $\phi \geq 40^\circ$ ) [1], [6].

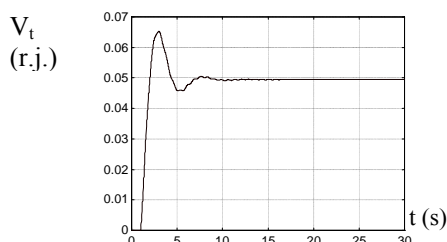
#### 4.3. Odziv sistema pri dejstvu malih poremećaja i analiza kvaliteta prelaznog procesa

U svrhu simulacije razvijenog modela sistema korišćen je SIMULINK modul pri MATLAB-u, specijalizovan za simulaciju dinamike sistema u grafičkom okruženju.

Pri snimanju odziva, pretpostavljeno je da je mehanički poremećaj  $\Delta m_i=0$  a odskočni poremećaj referentnog ulaza  $\Delta V_{REF}=0,05r.j.$  Sa dijagrama dobijenog odziva sistema (sl.6) izračunate su vrednosti karakterističnih veličina koje ocenjuju dinamička svojstva sistema: preskok  $a_1=31,83\%$ , vreme uspona  $T_R=0,76s$  i vreme smirenja  $T_S=6,3s$ , koje zadovoljavaju sa gledišta specificiranih indeksa performansi [1][6].

Dva realna pola koja se nalaze daleko od imaginarne ose ( $-67,0164$ , koji potiče od mernog pretvarača i  $-18,8306$ , koji potiče od pobudnice) ne utiču na dinamiku sistema pa stoga nisu razmatrani u daljem radu. Dva para konjugovano-kompleksnih polova bližih imaginarnoj osi (koji potiču od regulatora i sinhrona mašine) određuju dinamiku sistema u prelaznom procesu na sledeći način:

- Glavna oscilacija na krivoj odziva potiče od para polova ( $-0,5885 \pm j1,2840$ ) za koje je učestanost neprigušenih oscilacija  $\omega_1=1,4124rad/s$ , relativni koeficijent prigušenja  $\zeta_1=0,4167$  i dominantna vremenska konstanta  $T_{d1} \leq 1,7s$ .
- Druga oscilacija na krivoj odziva potiče od para polova ( $-0,1472 \pm j8,3976$ ) za koje je:  $\omega_2=8,3989rad/s$ ,  $\zeta_2=0,0175$  i  $T_{d2} \leq 6,8s$ .



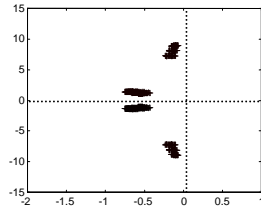
Sl.6. Odziv sistema na odskočni poremećaj  $\Delta V_{REF}=0,05r.j.$

Iako oba para konjugovano-kompleksnih polova utiču na karakter prelaznog procesa, pokazuje se da dominantna vremenska konstanta  $T_{d1}$  sa kojom se prigušuje glavna oscilacija ima presudan uticaj na dinamičko ponašanje sistema. Prema dobijenim rezultatima konstanta  $T_{d1}$  je manja od trećine vremena smirenja posle kojeg se prelazni proces može smatrati zanemarljivim, što govori o dobrom prigušenju procesa.

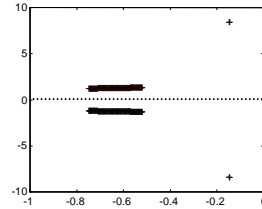
## 5 ISPITIVANJE ROBUSNOSTI REGULATORA NA PROMENU PARAMETARA SISTEMA

U cilju ispitivanja osetljivosti podešenog regulatora na promenu parametara sistema izvršena je analiza u kojoj je praćen položaj dominantnih polova u ravni parametara sistema (sinhrona mašine i pobudnice).

Koeficijenti  $K_1, K_2, K_4, K_5$  i  $K_6$  varirani su u opsegu  $\pm 20\%$  u odnosu na usvojenu vrednost, što je uslovalo promenu položaja oba para dominantnih polova ali tako da sistem ne dolazi na granicu stabilnosti (sl.7).



Sl.7. Spektar položaja dominantnih polova u ravni parametara ( $K_1, K_2, K_4, K_5$  i  $K_6$ )



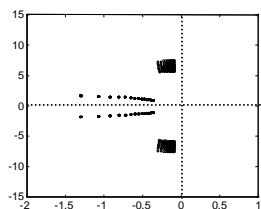
Sl.8. Spektar položaja dominantnih polova u ravni parametra  $K_3$

Uticaj varijacije koeficijenta  $K_3$  od  $\pm 20\%$  u odnosu na usvojenu vrednost (sl.8) odražava se na promenu položaja polova  $(-0,5885 \pm j1,284)$  krećući se ka imaginarnoj osi sa povećanjem vrednosti ovog parametra, ali sistem u svakom slučaju ostaje stabilan. Na položaj para polova  $(-0,1472 \pm j8,3976)$  varijacija ovog parametra uopšte ne utiče.

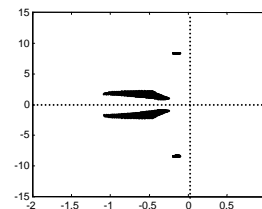
Varijacije vremenskih konstanti generatora u realnim opsezima za turbogenerator (za  $T_G$  od 6 do 10 s, za  $T_{d0}$  od 2,8 do 9,2 s) utiču na položaj dominantnih polova sistema na sledeći način (sl.9):

- na par polova  $(-0,5885 \pm j1,284)$  dominantno utiče vremenska konstanta  $T_{d0}$  tako što se polovi približavaju imaginarnoj osi sa njenim povećanjem, dok vremenska konstanta  $T_G$  nema uticaja;
- na par polova  $(-0,1472 \pm j8,3976)$  utiču obe vremenske konstante. Sa povećanjem  $T_{d0}$  polovi se približavaju imaginarnoj osi, ali sistem ostaje stabilan. Sa povećanjem  $T_G$  polovi se približavaju realnoj osi, pa se stoga smanjuje učestanost oscilacija (zbog povećane inercije mašine).

Iz prethodne analize sledi da dominantan uticaj na dinamičke karakteristike sistema ima vremenska konstanta  $T_{d0}$ .



Sl.9. Spektar položaja dominantnih polova u ravni parametara ( $T_G, T'_{d0}$ )

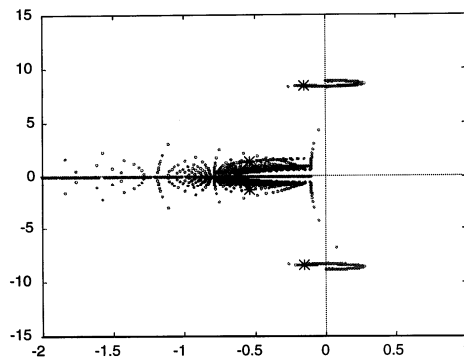


Sl.10. Spektar položaja dominantnih polova u ravni parametara ( $K_A, T_A$ )

Varijacije parametara pobudnice u odgovarajućim opsezima (za  $K_A$  od 100 do 400, za  $T_A$  od 0,01 do 0,25 s) uslovljavaju promenu položaja polova  $(-0,5885 \pm j1,284)$ , dok na drugi par polova nemaju uticaja (sl.10). Povećanje  $T_A$  dominantno utiče na promenu položaja polova tako što ih približava imaginarnoj osi, dok promena  $K_A$  utiče na promenu učestanosti oscilacija, a manje na realni deo konjugovano-kompleksnih polova. Zaključuje se da varijacijom parametara pobudnice u pretpostavljenim opsezima sistem ostaje stabilan.

## 6 OPTIMALAN IZBOR STRUKTURE I PARAMETARA REGULATORA SA ASPEKTA DINAMIČKIH PERFORMANSI

Praćenjem položaja dominantnih polova u ravni slobodnih (podesivih) parametara regulatora može se izvršiti optimalan izbor strukture i parametara regulatora sa aspekta dinamičkih performansi sistema. Provera valjanosti strukture i izabranih parametara regulatora izvršena je za varijacije slobodnih parametara u opsezima: za  $T_C$  od 0 do 10 s, za  $T_B$  od 0 do 50 s, i prikazana na sl.11, sa naznačenim položajima (\*) koje zauzimaju dominantni polovi sistema u slučaju podešenih parametara regulatora



Sl. 11. Spektar položaja dominantnih polova sistema u ravni parametara ( $T_B$ ,  $T_C$ )

Analiza spektra položaja dominantnih polova u ravni parametara regulatora pokazuje da bi dalje udaljavanje para polova  $(-0,1472 \pm j8,3976)$  od imaginarne ose uslovalo približavanje drugog para polova granici stabilnosti, pa je izveden zaključak da su struktura i izabrani parametri regulatora optimalni sa gledišta dinamičkih performansi sistema i da nije potrebno uvoditi dodatnu stabilizacionu spregu putem stabilizatora EES-a.

## 7 ZAKLJUČCI

Osnovni cilj ovog rada je da razvije matematički model za jedan savremeni sistem za regulaciju pobude (sa standardizovanim tipom sistema pobude AC4A) i da njegovom aplikacijom na konkretnom primeru turbogeneratora vezanog za krutu mrežu, izvrši izbor slobodnih parametara regulatora pobude koji će obezbediti unapred zadate performanse. Izbor parametara regulatora pobude izvršen je na osnovu dinamičke analize, uz ispitivanje osetljivosti podešenog regulatora na promenu osnovnih parametara sistema. Izvršena dinamička analiza je pokazala da dinamiku sistema u prelaznom procesu određuju parametri regulatora ( $T_C$ ,  $T_B$ ) i vremenska konstanta rotora generatora  $T_{d0}$ , pa je u skladu sa tim izvršeno podešavanje parametara regulatora. Provera valjanosti izabranih parametara za definisanu strukturu regulatora pokazala je da je rešenje optimalno sa aspekta dinamičkih performansi razmatranog sistema.

## LITERATURA

- [1] M.Turković, "Modelovanje i dinamička analiza jednog savremenog sistema za regulaciju pobude", Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1998.
- [2] M.Ćalović, "Regulacija elektroenergetskih sistema", Tom 2, Beograd, 1997.
- [3] J.Machowski, "Power System Dynamics and Stability", John Wiley & Sons Ltd, 1997.
- [4] P.Kundur, "Power System Stability and Control", Mc Graw-Hill, N.Y, USA, 1994.
- [5] P.M.Anderson and A.A.Fouad, "Power System Control and Stability", The Iowa University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [6] M.Stojić, "Kontinualni sistemi automatskog upravljanja", Naučna knjiga, Beograd, 1988.

**Abstract:** This paper develops mathematical model of one excitation system consisted of synchronous generator with excitation system type AC4A operating onto infinite bus. Dynamic analysis was performed in order to enable the tuning of the regulator parameters as well as the analysis of the regulator density on varying main system parameters. Here are presented results of accomplished dynamic analysis on the chosen example.

## MATHEMATICAL MODEL OF AN EXCITATION SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATOR AND TUNING OF THE REGULATOR PARAMETERS

Maja Turković

