

**UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
ODSEK ZA ENERGETIKU
Laboratorija za mikroprocesorsko upravljanje
energetskim pretvaračima i pogonima**

**ISPITNI PROJEKAT
NA TEMU**

**UTICAJ PARAMETARA SINHRONOG GENERATORA SA
PERMANENTNIM MAGNETIMA NA POLOŽAJ SOPSTVENIH
VREDNOSTI**

student:

predmetni nastavnik:

BEOGRAD 2004.

Sadržaj

1. Uvod.....	2
2. Matematički model sinhronne mašine sa permanentnim magnetima.....	3
3. Normalizacija matematičkog modela.....	6
4. Linearizacija i model u prostoru stanja.....	7
5. Simulacija sistema.....	9
6. Analiza kretanja sopstvenih vrednosti.....	11
6.1. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem K_{fv} i r_s	11
6.2. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem K_{fv} i x_s	13
6.3. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem ψ_{af} i x_s	13
6.4. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem τ_m	13
6.5. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem τ_{el}	14
7. Program u "Matlab"-u za analizu kretanja sopstvenih vrednosti.....	16
7.1. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.1.....	16
7.2. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.2.....	17
7.3. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.3.....	18
7.4. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.4.....	19
7.5. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.5.....	20
8. Parametri sinhronog generatora sa permanentnim magnetima.....	22

1. Uvod

U ovom ispitnom projektu razmatran je uticaj pojedinih parametara sinhronog generatora sa permanentnim magnetima na kretanje sopstvenih vrednosti. Ovakav generator koristi se za elektro-vetrenjače. Zbog svoje specifične konstrukcije i namene ima parametre (videti deo 8) koji se razlikuju od klasične sinhronne mašine. Upravo zbog toga kretanje sopstvenih vrednosti ima sličnosti, ali i razlike sa kretanjem sopstvenih vrednosti kod klasične sinhronne mašine.

U samom radu kreće se od matematičkog modela klasične sinhronne mašine da bi se zatim došlo i do modela generatora sa permanentnim magnetima. Zatim je urađena normalizacija jednačina. Zbog potrebe dobijanja i analize sistema u prostoru stanja izvršena je neophodna linearizacija koja je omogućila potpuno razdvajanje promenljivih stanja. Simuliran je rad sinhronog generatora sa permanentnim magnetima na sopstvenoj mreži i dati su rezultati te simulacije. Zatim sledi najznačajniji deo u kome su prikazane putanje kretanja sopstvenih vrednosti za različite vrste i vrednosti parametara. Na kraju date su linije programa korišćenih u ovoj analizi kao i parametri razmatranog generatora.

2. Matematički model sinhronne mašine sa permanentnim magnetima

Da bi se dobio model sinhronne mašine sa permanentnim magnetima potrebno je najpre krenuti sa modelom opšte sinhronne mašine. Model sinhronne mašine u originalnom području glasi:

$$U = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Ovaj matrični oblik definisan je sledećim matricama:

$$U = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix}; \psi = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \end{bmatrix}; i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

gde U-matrica napona, ψ -matrica flukseva, i-matrica struja. U razvijenom obliku matematički model ima sledeći izgled:

$$U_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (3)$$

$$U_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (4)$$

$$U_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (5)$$

$$U_f = R_s \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (6)$$

U matričnom obliku fluks iznosi:

$$\psi = L \cdot i \quad (7)$$

gde je matrica induktivnosti L, kao i njene submatrice definisane kao:

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix}; L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}; L_{sr} = L_{rs}^T = L_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}; L_{rr} = [L_{ff}] \quad (8)$$

L_{ii} su sopstvene induktivnosti namotaja statora, $i=a,b,c$;

L_{ij} su međusobne induktivnosti namotaja statora, $i,j=a,b,c$;

L_{sr} je međusobna induktivnost statorskog i pobudnog (rotorskog) namotaja;

L_{ff} je sopstvena induktivnost pobudnog namotaja.

Izraz za moment konverzije glasi:

$$M_c = \frac{p}{2} \cdot [i_a \ i_b \ i_c \ i_f] \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{dL_{sr}}{dt} \\ \frac{dL_{rs}}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

gde je p-broj pari polova. I na kraju, Njutnova jednačina kretanja sa kojom se završava ovaj model sinhrona mašine glasi :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_c + M_m - K_{fv} \cdot \omega_m \quad ; \quad \omega_m = \frac{\omega}{p} \quad (10)$$

gde J predstavlja ekvivalentni moment inercije, ω_m je mehanička ugaona brzina, M_c i M_m su moment konverzije i opterećenja (mehanički moment) respektivno, a K_{fv} je koeficijent frikcije i ventilacije. Naravno, moment konverzije i opterećenja uzimaju predznake u skladu sa referentnim smerovima mašine koja radi ili u generatorskom ili u motorskom režimu. U generatorskom režimu moment opterećenja M_m tj. mehanički moment je pozitivan (ulazi u mašinu), a moment konverzije M_c je negativan (izlazi iz mašine). Za motorski režim važi suprotno.

Primenom dq-transformacije invarijantne po snazi (Parkova transformacija) dolazi se do modela opšte sinhrona mašine u dq-domenu. Transformacija iz faznog u dq-domen definisana je na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

Inverzna dq-transformacija izgleda ovako:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

Na ovaj način dobijamo konačan model sinhrona mašine u dq-domenu koji glasi:

$$U_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q \quad (13)$$

$$U_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d \quad (14)$$

$$U_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (15)$$

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + M_d \cdot i_f \quad (16)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (17)$$

$$\psi_f = L_f \cdot i_f + M_d \cdot i_d \quad (18)$$

$$M_c = p \cdot (i_q \cdot \psi_d - i_d \cdot \psi_q) \quad (19)$$

Jednačine (13),(14) i (15) predstavljaju naponske jednačine, jednačine (16),(17) i (18) su fluksni obuhvati po d i q-osi, a jednačina (19) predstavlja moment konverzije. Njutnova jednačina (10) je već navedena.

Jednačine matematičkog modela sinhronne mašine sa permanentnim magnetima razlikuju se od prikazanog modela opšte sinhronne mašine zbog specifičnosti i konstrukcije mašine sa permanentnim magnetima. Te razlike sastoje se u sledećem:

Na rotoru ne postoji pobudni niti prigušni namotaj, već umesto njih na rotoru se nalaze stalni magneti kao izvor konstantnog fluksa. Namotaji statora su identični. Na osnovu navedenih razloga, ali i sličnosti dobija se model sinhronne mašine sa stalnim magnetima u dq-domenu:

$$U_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q \quad (20)$$

$$U_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d \quad (21)$$

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_{af} \quad (22)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (23)$$

$$M_c = p \cdot (i_q \cdot \psi_d - i_d \cdot \psi_q) \quad (24)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_c + M_m - K_{fv} \cdot \omega_m \quad ; \quad \omega_m = \frac{\omega}{p} \quad (25)$$

Jednačine (20) i (21) predstavljaju jednačine naponske ravnoteže, jednačine (22) i (23) su fluksni obuhvati po d i q-osi, jednačina (24) predstavlja moment konverzije. Jednačina (25) je Njutnova jednačina. ψ_{af} je fluks koji potiče od stalnih magneta sa rotora.

Ako se izvrši smena flukseva iz jednačina (22) i (23) u jednačine (20) i (21) dobija se model sa strujama kao promenljivama stanja. Taj model ima sledeći oblik:

$$L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s \cdot i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q + U_d \quad (26)$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s \cdot i_q - \omega \cdot L_d \cdot i_d - \omega \cdot \psi_{af} + U_q \quad (27)$$

$$M_c = -p \cdot (\psi_{af} \cdot i_q + (L_q - L_d) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (28)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_c + M_m - K_{fv} \cdot \omega_m \quad ; \quad \omega_m = \frac{\omega}{p} \quad (29)$$

3. Normalizacija matematičkog modela

Normalizacija jednačina i sistema vrlo je korisna jer se sve vrednosti kreću u granicama između 0 i 1. Posebno je važna činjenica da je nakon normalizacije sistema olakšan rad i simuliranje takvog normalizovanog sistema. Takođe je omogućena jednostavna univerzalnost i primena jednog istog modela na različite vrednosti parametara različitih mašina.

Normalizovane jednačine (26),(27),(28) i (29) imaju sledeći oblik:

$$\tau_{el} \frac{di_d}{dt} = -r_s \cdot i_d + x_s \cdot i_q \cdot n + u_d \quad (30)$$

$$\tau_{el} \frac{di_q}{dt} = -r_s \cdot i_q - x_s \cdot i_d \cdot n - \psi_{af} \cdot n + u_q \quad (31)$$

$$\tau_m \frac{dn}{dt} = \psi_{af} \cdot i_q + m_m - K_{fv} \cdot n \quad (32)$$

gde je:

$$\tau_{el} = \frac{x_s}{\omega_n} \text{ - električna vremenska konstanta}$$

$$\tau_m = J \frac{\Omega_n}{M_n} \text{ - mehanička vremenska konstanta.}$$

Jednačine (30) i (31) su normalizovane jednačine naponske ravnoteže gde su struje promenljive stanja, dok je jednačina (32) Njutnova jednačina kretanja. Moment konverzije iznosi $\psi_{af} \cdot i_q$ i njegov predznak zavisi od toga da li mašina radi u generatorskom ili u motorskom režimu (objašnjenje je dato kod jednačine (10)).

Potrebno je napomenuti da je uzeta pretpostavka da je $x_d=x_q=x_s$ ($L_d=L_q=L_s$). Dodatno objašnjenje za pojedine parametre videti u delu 8 gde su dati parametri generatora.

U ovom radu potrebno je simulirati rad sinhronog generatora sa permanentnim magnetima na sopstvenoj mreži (videti sliku 1). Zbog toga potrebno je izvršiti neke promene u normalizovanim jednačinama. Normalizovane jednačine koje uvažavaju potrošač generatora koji radi na sopstvenoj mreži ima sledeći izgled:

$$\tau_{el} \frac{di_d}{dt} = -(r_s + r_p) \cdot i_d + (x_s + x_p) \cdot i_q \cdot n \quad (33)$$

$$\tau_{el} \frac{di_q}{dt} = -(r_s + r_p) \cdot i_q - (x_s + x_p) \cdot i_d \cdot n - \psi_{af} \cdot n \quad (34)$$

$$\tau_m \frac{dn}{dt} = \psi_{af} \cdot i_q + m_m - K_{fv} \cdot n \quad (35)$$

Parametri r_p i x_p su omska otpornost i reaktansa potrošača.

4. Linearizacija i model u prostoru stanja

U jednačinama od (30) do (35) može se primetiti da je dobijen jedan nestacionaran dinamički sistem. To se vidi i po tome da postoje proizvodi dve promenljive stanja i to i_{qn} i i_{dn} . Da bi se rešio ovaj problem potrebno je da se izvrši linearizacija matematičkog modela i razdvoje modeli velikih i malih signala.

Promenljive stanja prikazaćemo kao zbir jednosmerne komponente i male promene:

$$i_d = I_d + \Delta i_d \quad (36)$$

$$i_q = I_q + \Delta i_q \quad (37)$$

$$M_m = T_m + \Delta m_m \quad (38)$$

$$\omega = N + \Delta n \quad (39)$$

U daljem radu simbol Δ za malu promenu promenljive neće se koristiti. Sada je potrebno uneti prethodne četiri jednačine u celokupni model. Tada se dobija sledeće:

$$\begin{aligned} \tau_{el} \left[\frac{d}{dt} (I_d + i_d) \right] &= -(r_s + r_p) \cdot (I_d + i_d) + (x_s + x_p) \cdot (I_q + i_q) \cdot (N + n) \\ \tau_{el} \left[\frac{d}{dt} (I_q + i_q) \right] &= -(r_s + r_p) \cdot (I_q + i_q) - (x_s + x_p) \cdot (I_d + i_d) \cdot (N + n) - \psi_{af} \cdot (N + n) \\ \tau_m \left[\frac{d}{dt} (N + n) \right] &= \psi_{af} \cdot (I_q + i_q) + (T_m + m_m) - K_{fv} \cdot (N + n) \end{aligned} \quad (40-abc)$$

Sada je potrebno razdvojiti režim velikih i režim malih signala pri čemu treba odbaciti proizvode dve male veličine (npr. i_{qn} , i_{dn}).

Režim velikih signala glasi:

$$\begin{aligned} 0 &= -(r_s + r_p) \cdot I_d + (x_s + x_p) \cdot I_q \cdot N \\ 0 &= -(r_s + r_p) \cdot I_q - (x_s + x_p) \cdot I_d \cdot N - \psi_{af} \cdot N \\ 0 &= \psi_{af} \cdot I_q + T_m - K_{fv} \cdot N \end{aligned} \quad (41-abc)$$

Veličine I_d , I_q , N i T_m daju **početnu radnu tačku** sinhronog generatora sa permanentnim magnetima. Za rešavanje sistema jednačina (41) tj. da bi se odredila radna tačka postoje dve mogućnosti: da se usvoji nominalna brzina $N=1$ ili da se usvoji nominalni napon itd. U ovom radu izabrana je prva mogućnost i za brzinu je uzeto $N=1$. Kada se reši sistem jednačina dobijamo sledeće vrednosti:

$$I_d = 0.498 \text{ r.j.}$$

$$I_q = 0.552 \text{ r.j.}$$

$$T_m = 0.59512 \text{ r.j.}$$

$$N = 1 \text{ r.j.}$$

Ostale vrednosti parametara mogu se naći u delu 8.

Režim malih signala glasi:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_d}{dt} &= -\frac{(r_s + r_p)}{\tau_{el}} \cdot i_d + \frac{(x_s + x_p) \cdot N}{\tau_{el}} \cdot i_q + \frac{(x_s + x_p) \cdot I_q}{\tau_{el}} \cdot n \\
 \frac{di_q}{dt} &= -\frac{(x_s + x_p) \cdot N}{\tau_{el}} \cdot i_d - \frac{(r_s + r_p)}{\tau_{el}} \cdot i_q - \left(\frac{(x_s + x_p) \cdot I_d}{\tau_{el}} + \frac{\psi_{af}}{\tau_{el}} \right) \cdot n \\
 \frac{dn}{dt} &= \frac{\psi_{af}}{\tau_m} \cdot i_q + \frac{1}{\tau_m} \cdot m_m - \frac{K_{fv}}{\tau_m} \cdot n
 \end{aligned} \tag{42-abc}$$

Model u prostoru stanja treba da ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u, \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt} \\
 y &= C \cdot x + D \cdot u
 \end{aligned} \tag{43-ab}$$

gde je

x – vektor stanja,
 u – vektor ulaza,
 y – vektor izlaza,
 A – matrica sistema,
 B – matrica ulaza,
 C – matrica izlaza,
 D – matrica (nema poseban naziv, najčešće $D=0$).

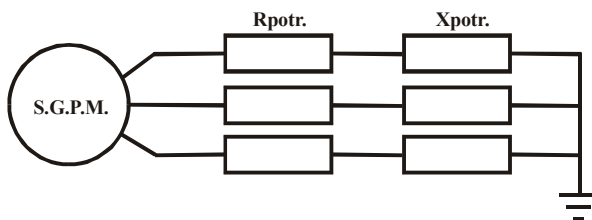
Konačan izgled sistema u prostoru stanja je:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_s + r_p)}{\tau_{el}} & \frac{(x_s + x_p) \cdot N}{\tau_{el}} & \frac{(x_s + x_p) \cdot I_q}{\tau_{el}} \\ -\frac{(x_s + x_p) \cdot N}{\tau_{el}} & -\frac{(r_s + r_p)}{\tau_{el}} & -\left(\frac{(x_s + x_p) \cdot I_d}{\tau_{el}} + \frac{\psi_{af}}{\tau_{el}} \right) \\ 0 & \frac{\psi_{af}}{\tau_m} & -\frac{K_{fv}}{\tau_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ m_m \end{bmatrix} \tag{44}$$

$$[m_c] = \begin{bmatrix} 0 & \psi_{af} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ m_m \end{bmatrix} \tag{45}$$

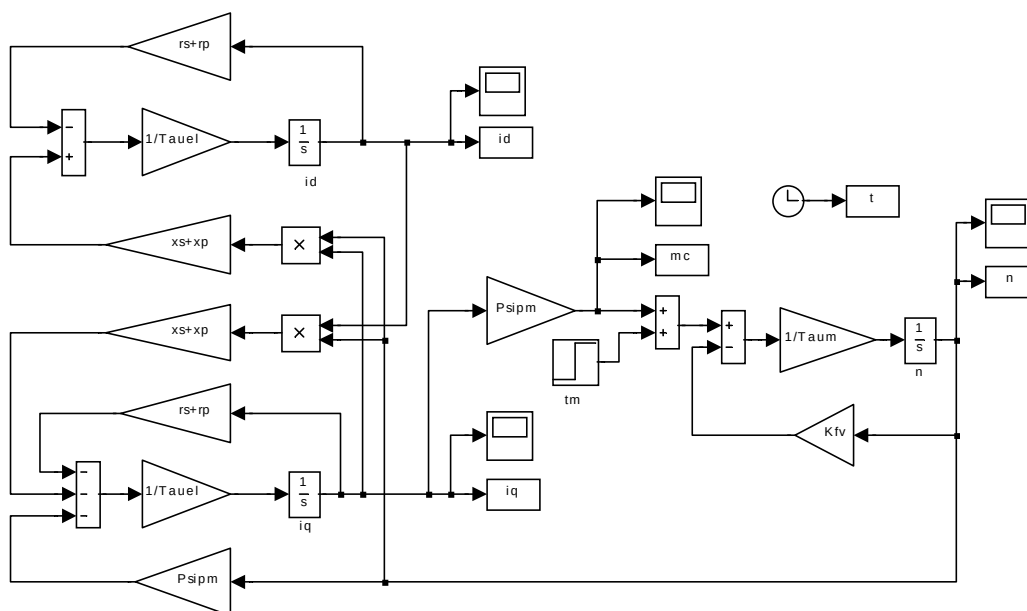
5. Simulacija sistema

Na slici 1 data je šema sistema koji se simulira. Simulira se rad sinhronog generatora sa permanentnim magnetima na sopstvenoj mreži. Simulacija omogućava samo proveru tačnosti izračunate radne tačke i ne sadrži regulatore ili regulacione strukture. Za simulaciju je korišćen Matlab 6.0 i njegov Simulink.



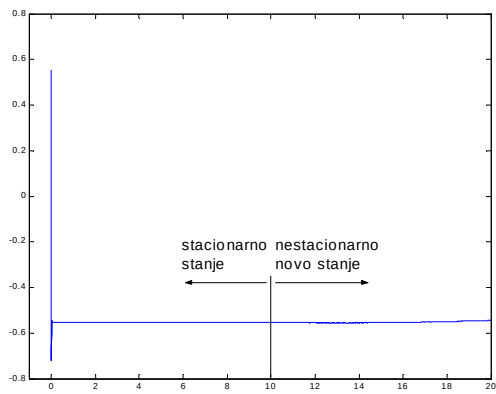
Slika 1. Sistem koji se simulira

Na slici 2 dat je izgled simulacionog blok dijagrama.

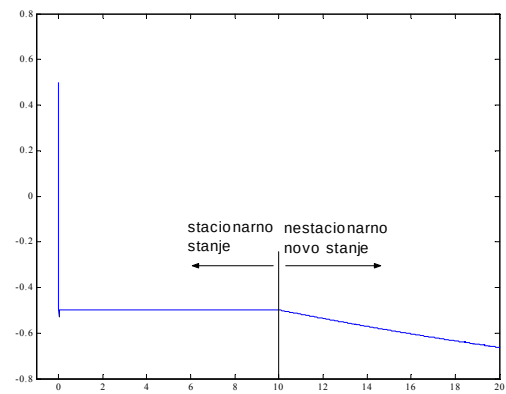


Slika 2. Simulacioni blok dijagram za s.g.p.m. na sopstvenoj mreži

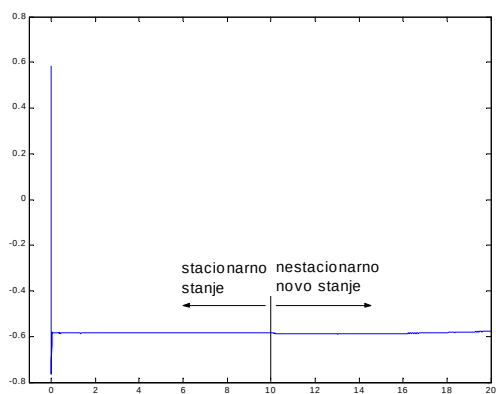
Rezultati simulacija dati su na slikama 3, 4, 5 i 6. One potvrđuju tačnost izračunate početne radne tačke, jer su sve veličine (i_d , i_q , m_c i n) vrlo stabilne i sa zanemarljivim varijacijama. U 10. sekundi simulacije menja se mehanički moment, a samim tim i radna tačka što je i naznačeno na slikama.



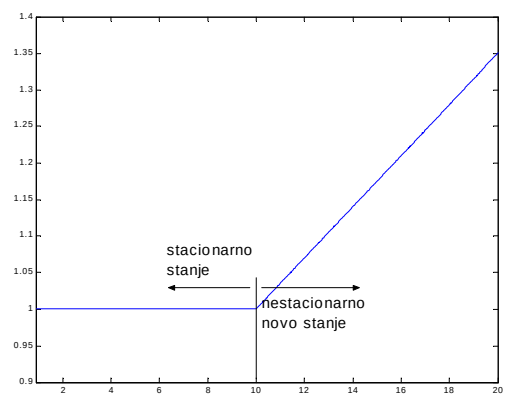
Slika 3. Izgled struje i_d



Slika 4. Izgled struje i_q



Slika 5. Izgled momenta konverzije m_c



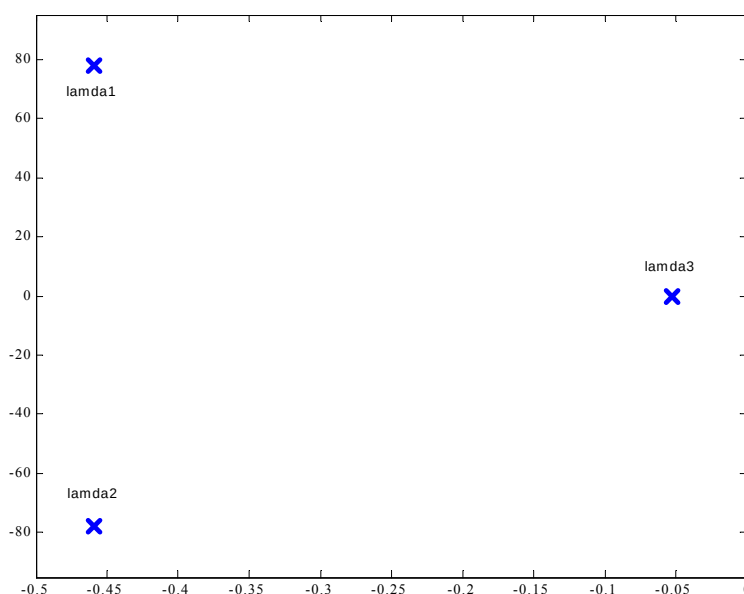
Slika 6. Izgled brzine n

6. Analiza kretanja sopstvenih vrednosti

Kao što se vidi iz jednačina (44) i (45), red linearizovanog sistema je tri. Za takav sistem dobijaju se tri sopstvene vrednosti i to je prikazano u sledećoj tabeli:

r.br.	vrednost	opis
$\lambda_{1,2}$	$-0.4589 \pm j77.007$	par konjugovano-kompleksnih sopstvenih vrednosti
λ_3	-0.053	realna sopstvena vrednost

Položaj sopstvenih vrednosti u kompleksnoj ravni prikazan je na slici 3.



Slika 7. Položaj sopstvenih vrednosti u kompleksnoj ravni

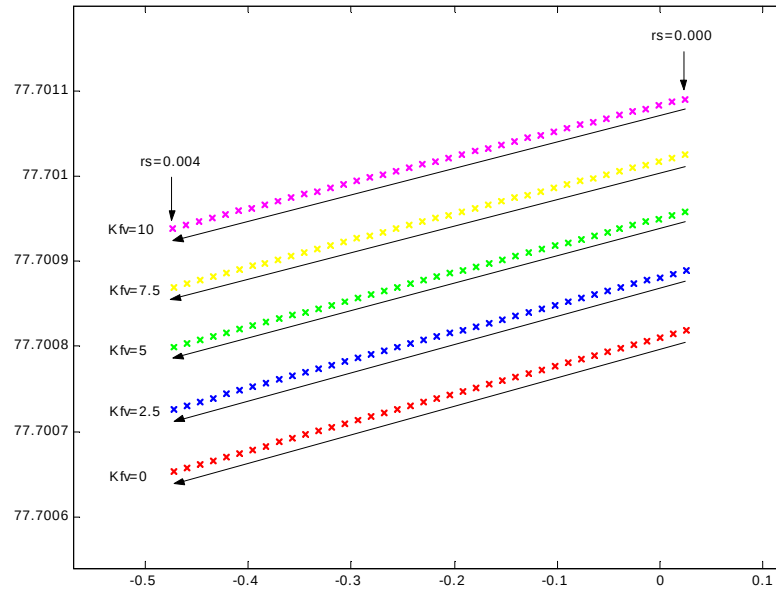
Kao što se vidi sa slike 7 svi realni delovi sopstvenih vrednosti nalaze se na levoj strani kompleksne poluravni što znači da je sistem stabilan. U analizi kretanja sopstvenih vrednosti razmatra se samo generator, a to znači da je potrošač isključen iz jednačina (videti deo 7). To ne menja suštinu razmatranja ovog problema već se menjaju samo apsolutne vrednosti sopstvenih vrednosti.

6.1. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem K_{fv} i r_s

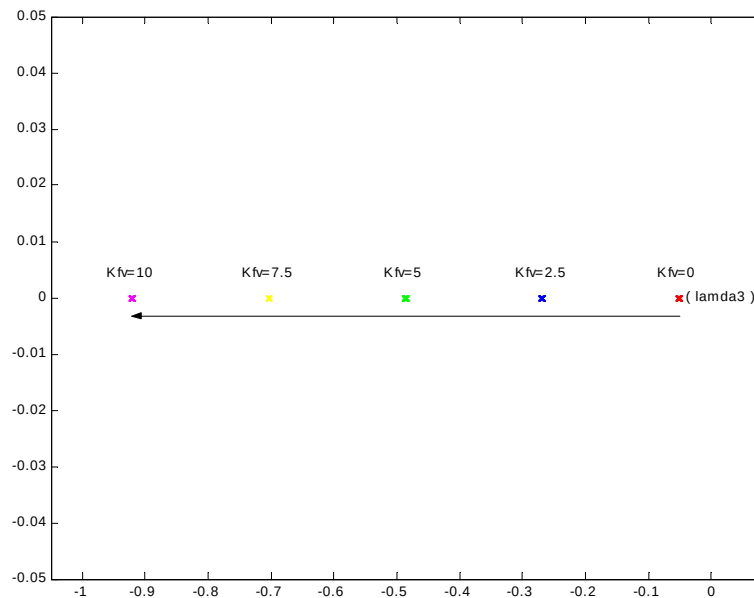
Kretanje sopstvenih vrednosti razmatramo u dva aspekta: dejstvo na par konjugovano-kompleksnih sopstvenih vrednosti i dejstvo na realnu sopstvenu vrednost.

Na slici 8 prikazan je uticaj navedenih parametara na konjugovano-kompleksni par sopstvenih vrednosti. Prikazane su sopstvene vrednosti samo u gornjoj polovini kompleksne ravni. Može se primetiti da koeficijent frikcije i ventilacije K_{fv} deluje na imaginarne komponente, dok omska otpornost statora r_s deluje na realne komponente sopstvenih vrednosti. K_{fv} pomera sopstvene vrednosti paralelno imaginarnoj osi, a r_s ih pomera skoro paralelno realnoj osi. Sa slike 8 takođe se vidi da se sopstvene vrednosti za $r_s=0.000$ i $r_s=0.001$ nalaze sa desne strane realne ose. To znači da je sistem nestabilan za te dve vrednosti parametra r_s i da postaje stabilan za treću vrednost omske otpornosti statora $r_s=0.002$.

Na slici 9 prikazan je uticaj istih parametara na realnu sopstvenu vrednost. Uticaj omske otpornosti statora r_s praktično i ne postoji, dok se pod dejstvom koeficijenta frikcije i ventilacije K_{fv} sopstvene vrednosti kreću u pravcu realne ose. Postoji samo pet vrednosti (usrednjenih) i to: -0.05155 ($K_{fv}=0$), -0.26885 ($K_{fv}=2.5$), -0.48615 ($K_{fv}=5$), -0.70345 ($K_{fv}=7.5$) i -0.92075 ($K_{fv}=10$).



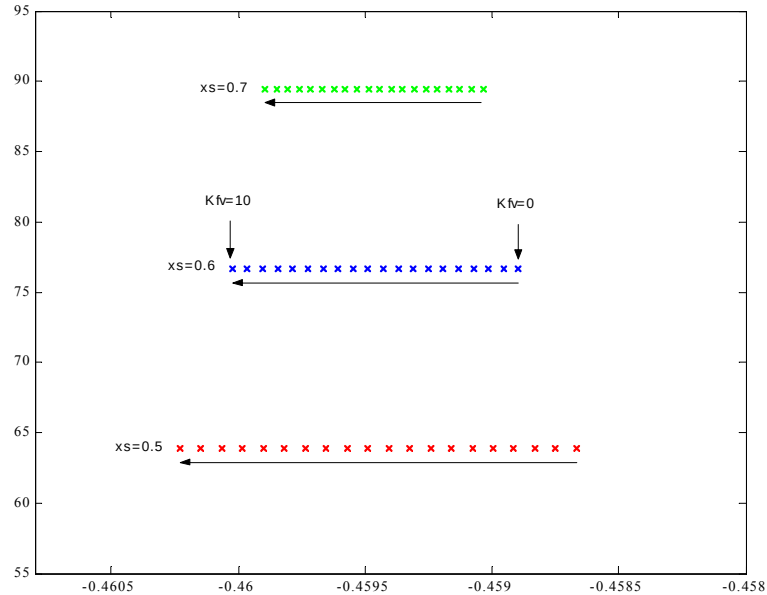
Slika 8. Kretanje sopstvenih vrednosti u gornjoj polovini ravni (λ_1) gde se r_s menja u intervalu od $0.000 \leq r_s \leq 0.004$ sa korakom od 0.0001. Putanje sopstvenih vrednosti prikazane su za pet vrednosti K_{fv} : 0; 2.5; 5; 7.5 i 10.



Slika 9. Kretanje realne sopstvene vrednosti (λ_3) gde se r_s menja u intervalu od $0.000 \leq r_s \leq 0.004$ sa korakom od 0.0001. Putanje sopstvenih vrednosti prikazane su za pet vrednosti K_{fv} : 0; 2.5; 5; 7.5 i 10.

6.2. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem K_{fv} i x_s

Na slici 10 prikazan je uticaj parametara K_{fv} i x_s na kretanje sopstvenih vrednosti (λ_1) u gornjoj polovini kompleksne ravni. U ovom slučaju K_{fv} utiče samo na promenu realnih vrednosti i to u pravcu realne ose, dok x_s utiče isključivo na promenu imaginarnog dela sopstvenih vrednosti. Za veće vrednosti x_s promene po realnoj osi su sve manje.



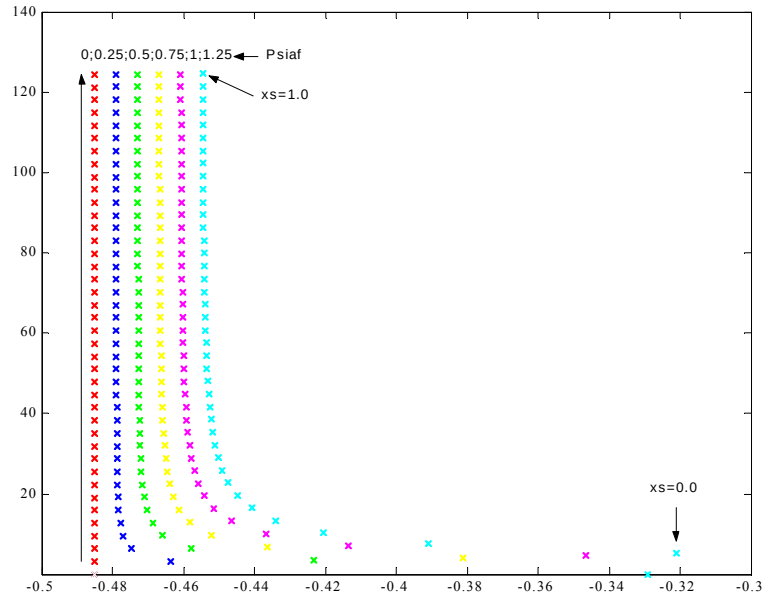
Slika 10. Kretanje sopstvenih vrednosti u gornjoj polovini ravni (λ_1) gde se K_{fv} menja u intervalu od $0 \leq K_{fv} \leq 10$ sa korakom od 0.5. Putanje sopstvenih vrednosti prikazane su za tri vrednosti x_s : 0.5; 0.6 i 0.7.

6.3. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem ψ_{af} i x_s

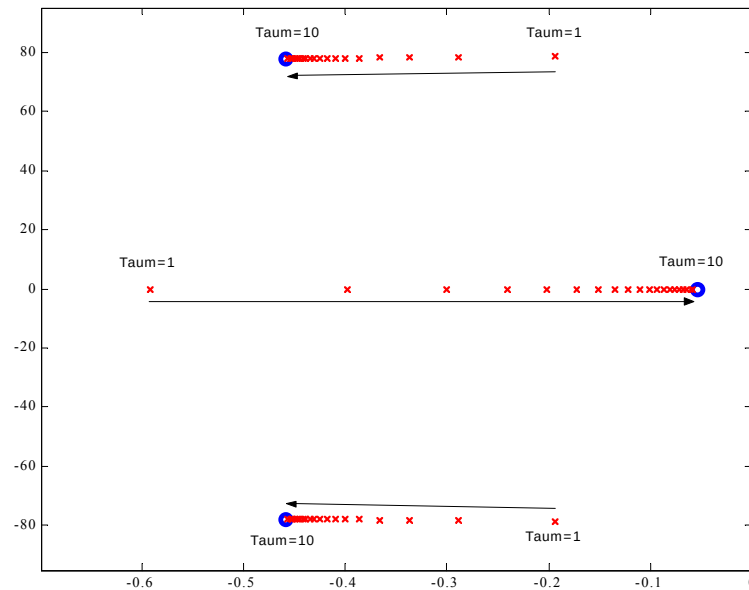
Uticaj navedenih parametara prikazan je na slici 11. Kao što se vidi sa slike, fluks ψ_{af} pomera realne delove sopstvenih vrednosti dok reaktansa statora x_s utiče na imaginarne delove (videti naznačeni smer strelice). Ovaj zaključak ne važi u potpunosti za male vrednosti reaktanse statora x_s , jer dolazi do "osipanja" sopstvenih vrednosti u pravcu realne ose.

6.4. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem τ_m

Na slici 12 prikazan je uticaj parametra τ_m na kretanje sopstvenih vrednosti. Plavim kružićima prikazane su originalne sopstvene vrednosti sistema. Mehanička vremenska konstanta menja samo realnu vrednost na taj način što pomera i realnu i konjugovano-kompleksnu vrednost u pravcu realne ose, ali u suprotnim smerovima. Realna sopstvena vrednost kreće se od -0.5918 do -0.0579 što je prikazano strelicom, dok se konjugovano-kompleksne kreću od $-0.1941 \pm j78.7762$ do $-0.4665 \pm j77.7102$.



Slika 11. Kretanje sopstvenih vrednosti u gornjoj polovini ravni (λ_1) gde se r_s menja u intervalu od $0.000 \leq x_s \leq 1.000$ sa korakom od 0.025. Putanje sopstvenih vrednosti prikazane su za šest vrednosti ψ_{af} : 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1 i 1.25.

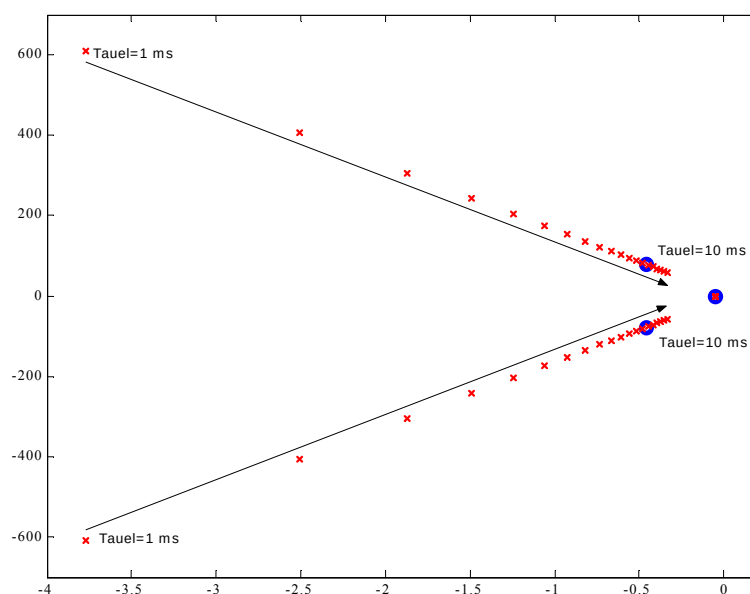


Slika 12. Kretanje sopstvenih vrednosti gde se mehanička vremenska konstanta τ_m menja u intervalu od $1 \leq \tau_m \leq 10$ sec sa korakom od 0.5 sec. Plavi kružići prikazuju originalne sopstvene vrednosti sistema.

6.5. Kretanje sopstvenih vrednosti pod uticajem τ_{el}

Na slici 13 prikazan je uticaj parametra τ_{el} na kretanje sopstvenih vrednosti. Plavim kružićima prikazane su originalne sopstvene vrednosti sistema. Električna vremenska konstanta menja samo par konjugovano-kompleksnih sopstvenih vrednosti ($\lambda_{1,2}$), dok se realna vrednost (λ_3) praktično nemenja. Realna sopstvena vrednost kreće se od -0.05 do

-0.053, dok se konjugovano-kompleksne kreću od $-3.77 \pm j608.1$ do $-0.33 \pm j58.008$ što je naznačeno strelicama.



Slika 13. Kretanje sopstvenih vrednosti gde se električna vremenska konstanta τ_{el} menja u intervalu od $1 \leq \tau_{el} \leq 10$ ms sa korakom od 0.5 ms. Plavi kružići prikazuju originalne sopstvene vrednosti sistema.

7. Program u "Matlab"-u za analizu kretanja sopstvenih vrednosti

7.1. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.1.

```
disp('podaci o masini')
Sn=2087000;
Un=2309.43; %fazni napon
In=326.68; %fazna struja
rs=0.0038; %[r.j.]
xs=0.608; %[r.j.]
Psiaf=1.06; %[r.j.]
p=30;
J=4.43; %[r.j.]
Wn=2.59;
mn=1; %[r.j.]
Mn=874140;
Kfv=0.01;
fn=12.35;
disp('Proracunate vrednosti')
ws=2*pi*fn;
Zb=Un^2/Sn;
fi=acos(0.95); %pretpostavka
lp=0.90*In; %pretpostavka
Zp=Un/(3*lp);
Rp=Zp*cos(fi);
Lp=Zp*sin(fi)/ws;
rp=1.055;
xp=0.347;
Taum=J*(Wn/mn);
Tael=xs/ws;
ID=0.498;
IQ=0.552;
Tm=0.59512;
N=1;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
  -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
  0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
B=[0,0,0;0,0,0;0,0,1/Taum];
C=[0,Psiaf,0];
D=0;
%racun:
Kfv=0;
for i=1:5
    rs=0;
    rp=0;
    xp=0;
    A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
      -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
      0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
    for j=1:40
        sopvred=eig(A);
        if i==1
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'rx'),hold on;
        elseif i==2
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'bx'),hold on;
        elseif i==3
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'gx'),hold on;
        elseif i==4
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'yx'),hold on;
```

```

else
    plot(real(sopvred),imag(sopvred),'mx'),hold on;
end
rs=rs+0.0001;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
    -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
    0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
axis([-0.57 0.12 77.70054 77.7012]);
%axis([-1.05 0.08 -0.05 0.05]); %koristi se za prikaz realne sop. vrednosti ( lamda3 )
end
Kfv=Kfv+2.5;
end

```

7.2. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.2.

```

disp('podaci o masini')
Sn=2087000;
Un=2309.43; %fazni napon
In=326.68; %fazna struja
rs=0.0038; %[r.j.]
xs=0.608; %[r.j.]
Psiaf=1.06; %[r.j.]
p=30;
J=4.43; %[r.j.]
Wn=2.59;
mn=1; %[r.j.]
Mn=874140;
Kfv=0.01;
fn=12.35;
disp('Proracunate vrednosti')
ws=2*pi*fn;
Zb=Un^2/Sn;
fi=acos(0.95); %pretpostavka
Ip=0.90*In; %pretpostavka
Zp=Un/(3*Ip);
Rp=Zp*cos(fi);
Lp=Zp*sin(fi)/ws;
rp=1.055;
xp=0.347;
Taum=J*(Wn/mn);
Tael=xs/ws;
ID=0.498;
IQ=0.552;
Tm=0.59512;
N=1;
rp=0;
xp=0;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
    -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
    0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
B=[0,0,0;0,0,0;0,0,1/Taum];
C=[0,Psiaf,0];
D=0;
%racun:
xs=0.5;
for i=1:3
    Kfv=0;
    rp=0;
    xp=0;
    A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...

```

```

-(xs+xp)*N/Tauel,-(rs+rp)/Tauel,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tauel;...
0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
for j=1:20
    sopvred=eig(A);
    if i==1
        plot(real(sopvred),imag(sopvred),'rx'),hold on;
    elseif i==2
        plot(real(sopvred),imag(sopvred),'bx'),hold on;
    else
        plot(real(sopvred),imag(sopvred),'gx'),hold on;
    end
    Kfv=Kfv+0.5;
    A=[-(rs+rp)/Tauel,(xs+xp)*N/Tauel,(xs+xp)*IQ/Tauel;...
        -(xs+xp)*N/Tauel,-(rs+rp)/Tauel,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tauel;...
        0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
    axis([-0.4608 -0.458 55 95]);
end
xs=xs+0.1;
end

```

7.3. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.3.

```

disp('podaci o masini')
Sn=2087000;
Un=2309.43; %fazni napon
In=326.68; %fazna struja
rs=0.0038; %[r.j.]
xs=0.608; %[r.j.]
Psiaf=1.06; %[r.j.]
p=30;
J=4.43; %[r.j.]
Wn=2.59;
mn=1; %[r.j.]
Mn=874140;
Kfv=0.01;
fn=12.35;
disp('Proracunate vrednosti')
ws=2*pi*fn;
Zb=Un^2/Sn;
fi=acos(0.95); %pretpostavka
lp=0.90*In; %pretpostavka
Zp=Un/(3*lp);
Rp=Zp*cos(fi);
Lp=Zp*sin(fi)/ws;
rp=1.055;
xp=0.347;
Taum=J*(Wn/mn);
Tauel=xs/ws;
ID=0.498;
IQ=0.552;
Tm=0.59512;
N=1;
rp=0;
xp=0;
A=[-(rs+rp)/Tauel,(xs+xp)*N/Tauel,(xs+xp)*IQ/Tauel;...
    -(xs+xp)*N/Tauel,-(rs+rp)/Tauel,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tauel;...
    0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
B=[0,0,0;0,0,0;0,0,1/Taum];
C=[0,Psiaf,0];
D=0;

```

```

%racun:
Psiaf=0;
for i=1:6
    xs=0;
    rp=0;
    xp=0;
    A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
        -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
        0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
    for j=1:40
        sopvred=eig(A)
        if i==1
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'rx'),hold on;
        elseif i==2
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'bx'),hold on;
        elseif i==3
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'gx'),hold on;
        elseif i==4
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'yx'),hold on;
        elseif i==5
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'mx'),hold on;
        else
            plot(real(sopvred),imag(sopvred),'cx'),hold on;
        end
        xs=xs+0.025;
        A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
            -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
            0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
        axis([-0.5 -0.3 0.1 140]);
    end
    Psiaf=Psiaf+0.25;
end
end

```

7.4. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.4.

```

disp('podaci o masini')
Sn=2087000;
Un=2309.43; %fazni napon
In=326.68; %fazna struja
rs=0.0038; %[r.j.]
xs=0.608; %[r.j.]
Psiaf=1.06; %[r.j.]
p=30;
J=4.43; %[r.j.]
Wn=2.59;
mn=1; %[r.j.]
Mn=874140;
Kfv=0.01;
fn=12.35;
disp('Proracunate vrednosti')
ws=2*pi*fn;
Zb=Un^2/Sn;
fi=acos(0.95); %pretpostavka
Ip=0.90*In; %pretpostavka
Zp=Un/(3*Ip);
Rp=Zp*cos(fi);
Lp=Zp*sin(fi)/ws;
rp=1.055;
xp=0.347;
Taum=J*(Wn/mn);

```

```

Tael=xs/ws;
ID=0.498;
IQ=0.552;
Tm=0.59512;
N=1;
rp=0;
xp=0;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
  -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
  0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
B=[0,0,0;0,0,0;0,0,1/Taum];
C=[0,Psiaf,0];
D=0;
%sop vred:
sopvred=eig(A)
plot(real(sopvred),imag(sopvred),'bo'),hold on;
%racun:
Taum=1;
rp=0;
xp=0;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
  -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
  0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
for j=1:20
  sopvred=eig(A)
  plot(real(sopvred),imag(sopvred),'rx'),hold on;
  Taum=Taum+0.5;
  A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
    -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
    0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
  axis([-0.7 0 -95 95]);
end

```

7.5. Programski kod korišćen za analizu u delu 6.5.

```

disp('podaci o masini')
Sn=2087000;
Un=2309.43; %fazni napon
In=326.68; %fazna struja
rs=0.0038; %[r.j.]
xs=0.608; %[r.j.]
Psiaf=1.06; %[r.j.]
p=30;
J=4.43; %[r.j.]
Wn=2.59;
mn=1; %[r.j.]
Mn=874140;
Kfv=0.01;
fn=12.35;
disp('Proracunate vrednosti')
ws=2*pi*fn;
Zb=Un^2/Sn;
fi=acos(0.95); %pretpostavka
Ip=0.90*In; %pretpostavka
Zp=Un/(3*Ip);
Rp=Zp*cos(fi);
Lp=Zp*sin(fi)/ws;
rp=1.055;
xp=0.347;
Taum=J*(Wn/mn);

```

```

Tael=xs/ws;
ID=0.498;
IQ=0.552;
Tm=0.59512;
N=1;
rp=0;
xp=0;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
  -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
  0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
B=[0,0,0;0,0,0;0,0,1/Taum];
C=[0,Psiaf,0];
D=0;
%sop vred:
sopvred=eig(A);
plot(real(sopvred),imag(sopvred),'bo'),hold on;
%racun:
Tael=0.001;
rp=0;
xp=0;
A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
  -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
  0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
for j=1:20
  sopvred=eig(A);
  plot(real(sopvred),imag(sopvred),'rx'),hold on;
  Tael=Tael+0.0005;
  A=[-(rs+rp)/Tael,(xs+xp)*N/Tael,(xs+xp)*IQ/Tael;...
    -(xs+xp)*N/Tael,-(rs+rp)/Tael,-((xs+xp)*ID+Psiaf)/Tael;...
    0,Psiaf/Taum,-Kfv/Taum];
  axis([-4 0.2 -700 700]);
end

```

8. Parametri sinhronog generatora sa permanentnim magnetima

Parametri generatora u apsolutnim veličinama:

$U_l = 4000V$	Linijski napon rms
$I_f = 326.78 A$	Fazna struja rms
$R_s = 27 m\Omega$	Statorska otpornost
$L_s = 55.35 mH$	Statorska induktivnost
$\Psi_{pm} = 44.8Vs$	Fluks permanentnog magneta
$p = 30$	Broj pari polova
$J = 3.88 \cdot 10^6 kg m^2$	Mehanički moment inercije

Parametri koji su potrebni za normalizovani sistem:

$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{eff} = 3266V$	Amplituda faznog napona
$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} = 462.14 A$	Amplituda fazne struje
$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n = 77.6 rad / s$	Električna ugaona brzina
$\Omega_n = \frac{\omega_n}{p} = 2.59 rad / s$	Mehanička ugaona brzina
$\Psi_n = \frac{U_{\max}}{\omega_n} = 42.1Vs$	Nominalni fluks
$M_n = \frac{S_n}{\Omega_n} = \frac{3 \cdot U_{eff} \cdot I_{eff}}{\Omega_n} = 874.14 KNm$	Nominalni moment
$Z_n = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = 7.07 \Omega$	Impedansa

Parametri generatora u normalizovanim veličinama:

$r_s = \frac{R_s}{Z_n} = 0.0038 r.j.$	Omska otpornost statora
$x_s = \frac{L_s \cdot \omega_n}{Z_n} = 0.608 r.j.$	Reaktansa statora
$\psi_{pm} = \frac{\Psi_{pm}}{Z_n} = 1.06 r.j.$	Fluks permanentnog magneta
$\tau_m = J \cdot \frac{\Omega_n}{M_n} = 11.5 s$	Mehanička vremenska konstanta
$\tau_{el} = \frac{x_s}{\omega_n} = 7.835 ms$	Električna vremenska konstanta