

Ime i prezime: _____, br. indeksa _____.

Ovaj list se predaje zajedno sa vežbankom!

Sve odgovore na postavljena pitanja upisati na naznačena mesta, a odgovarajuću analizu, obrazloženja odgovora i proračune dati u vežbankama. Svaki tačan odgovor mora biti i obrazložen.

Upravljanje elektromotornim pogonima

Beograd, 22.06.2020.

II kolokvijum

2. Zadatak: Elektromotorni pogon sa asinhronim motorom napaja se iz naponskog invertora sa impulsno širinskom modulacijom (IŠM, PWM), učestanost komutacije invertora je $f_c = 2$ kHz. U upravljačkom sistemu je implementirano indirektno vektorsko upravljanje. Predviđeni su regulatori struje u sinhrono rotirajućem (dq) koordinatnom sistemu, postavljenim tako da je fluks rotora po q -osi uvek jednak nuli ($\varphi_{qr}=0$). Pretpostaviti da nema filtera i kašnjenja u povratnim vezama po struji, i da je pojačanje senzora $K_{pi} = 1V/1A$. Predviđena je regulacija brzine sa merenjem brzine i ugla vratila motora pomoću inkrementalnog enkodera montiranog na motoru. Oblast rada pogona je sa pozitivnim i negativnim brzinama manjim ili jednakim nominalnoj brzini motora (bez slabljenja polja).

- a) Nacrtati i objasniti blok dijagram za regulaciju statorskih struja po d i q osi. Podesiti parametre primenom simetričnog optimuma, uvažavajući kašnjenje u aktuatoru (invertoru) koje je jednako periodu impulsno širinske modulacije. Smatrati da je pojačanje aktuatora $K_a = 220$.

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

- b) Sa uprošćenim predstavljanjem regulacione petlje po struji (zanemariti članove višeg reda (>1) u funkciji spregnutog prenosa), izvršiti sintezu brzinske regulacione petlje, tako da se ostvari regulacija brzine bez statičke greške. Primenom odgovarajućeg optimuma izračunati parametre regulatora brzine. U povratnoj vezi po brzini pojačanje je $K_{p\omega} = 10V/(150\text{rad/s})$ i predviđen je filter prvog reda, $T_{p\omega} = 10\text{ms}$. Smatrati da enkoder daje signal brzine motora u rad/s.

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

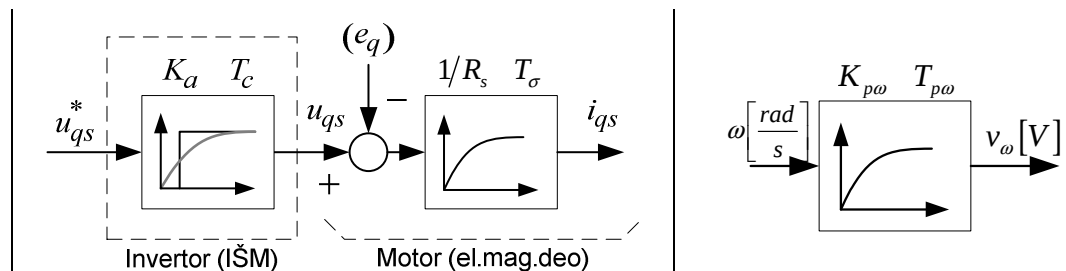
- c) Odrediti vrednost ograničenja (limitera) signala na izlazu iz regulatora brzine (i integralnog člana u regulatoru) tako da moment motora bude ograničen na 150% nominalnog momenta motora. Kako treba podesiti vrednost referentnog ubrzanja u bloku za prilagođenje referentne vrednosti brzine (soft-startu) da se izbegne aktiviranje limita momenta u toku ubrzanja pogona? Da li vrednost referentnog ubrzanja zavisi od momenta opterećenja motora?

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

Podaci: $U_{fn} = 220$ V; $f_n = 50$ Hz; $n_n = 1420$ o/min; $I_{fn} = 6,7$ A (efektivna vrednost fazne struje); $\cos \varphi_n = 0,76$; broj pari polova $P = 2$; $M = 0,1712$ H; $\lambda_s = \lambda'_r = 0,01226$ H; $R_s = 2,5$ Ω , $R'_r = 1,9$ Ω . Ukupan moment inercije pogona je $J = 1,2\text{kgm}^2$. Zanimariti **gubitke u gvožđu**. $I_{ds} = 6,16$ A.

Podsetnik:

$$T_\sigma = \frac{(L_s \cdot L'_r - M^2)}{R_s} / L'_r$$



2. teorijsko pitanje: Nacrtati blok dijagram i ukratko objasniti indirektno vektorsko upravljanje trofaznog asinhronog motora napajanog iz naponskog invertora.

Sa histerezisnim regulatorima struje (CRPWM invertor): Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

Sa regulatorima struje u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i PWM modulacijom:

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

Podaci o motoru

$$r_j \equiv 1$$

$$\alpha \equiv 2 \cdot \pi$$

$$M_- := 0.1712 \text{ H} \quad \lambda_{s_-} := 0.01226 \text{ H} \quad \lambda_{r_-} := \lambda_{s_-} \quad R_{s_-} := 2.5 \Omega \quad R_{r_-} := 1.9 \Omega$$

$$J := 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad U_{fn} := 220 \text{ V} \quad f_n := 50 \text{ Hz} \quad n_n := 1420 \cdot \frac{\text{rpm}}{\text{min}}$$

$$P := 2 \quad n_{sn} := 1500 \cdot \frac{\text{rpm}}{\text{min}} \quad L_{s_-} := M_- + \lambda_{s_-} \quad L_{r_-} := M_- + \lambda_{r_-}$$

Podaci o invertoru

$$f_c := 2 \text{ kHz} \quad T_c := \frac{1}{f_c} = 0.5 \cdot \text{ms} \quad K_{a_-} := 220$$

$$\text{Merenje struje} \quad T_{pi} := 0 \quad \text{Bez filtera struje} \quad K_{pi_-} := \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

Nominalna struja se izračunava da bi se zadala

$$s_n := \frac{n_{sn} - n_n}{n_{sn}} = 0.053 \quad \omega_{sn} := 2 \cdot \pi \cdot f_n = 314.159 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad n_n = 148.702 \cdot \frac{\text{rpm}}{\text{s}}$$

$$Z_e := (R_{s_-} + i \cdot \omega_{sn} \cdot \lambda_{s_-}) + \frac{i \cdot \omega_{sn} \cdot M_- \cdot \left(\frac{R_{r_-}}{s_n} + i \cdot \omega_{sn} \cdot \lambda_{r_-} \right)}{\frac{R_{r_-}}{s_n} + i \cdot \omega_{sn} \cdot (M_- + \lambda_{r_-})}$$

$$I_n := \frac{U_{fn}}{Z_e} = (5.096 - 4.356i) \text{ A}$$

$$|I_n| = 6.704 \text{ A} \quad \varphi_n := \arg(I_n) = -40.518 \cdot \text{deg} \quad \cos(\varphi_n) = 0.76$$

$$P_n := \text{Re}(3 \cdot U_{fn} \cdot |I_n|) = 4.425 \times 10^3 \text{ W} \quad 3 \cdot U_{fn} \cdot |I_n| = 4.425 \times 10^3 \text{ W}$$

$$-|I_n| \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \sqrt{2} = 6.16 \text{ A} \quad I_{dsn} := -\text{Im}(I_n) \cdot \sqrt{2} = 6.16 \text{ A} \quad \frac{I_{dsn}}{|I_n| \cdot \sqrt{2}} = 0.65$$

$$\text{Normalizacija} \quad U_b := U_{fn} \quad I_b := |I_n| \quad \omega_b := 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

$$M_b := 3 \cdot \frac{U_b \cdot I_b}{\frac{\omega_b}{P}} = 28.168 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \quad T_m := J \cdot \frac{\omega_b}{P} \cdot \frac{1}{M_b} = 6.692 \text{ s}$$

Moment u apolutnom domenu

$$m_{e_}(i_{ds_}, i_{qs_}) := \frac{3}{2} P \cdot \frac{M_-^2}{M_- + \lambda_{r_}} \cdot i_{ds_} \cdot i_{qs_} \quad m_{e_}(6.16A, 3A) = 8.857 \cdot N \cdot m$$

$$Z_b := \frac{U_b}{I_b} = 32.816 \Omega \quad L_b := \frac{Z_b}{\omega_b} = 0.104 H \quad \frac{M_-}{L_b} = 1.639$$

$$M := \frac{M_-}{L_b} = 1.639 \quad \lambda_s := \frac{\lambda_{s_}}{L_b} = 0.117 \quad \lambda_r := \frac{\lambda_{r_}}{L_b} \quad L_s := M + \lambda_s$$

$$L_r := M + \lambda_s = 1.756$$

$$R_s := \frac{R_{s_}}{Z_b} = 0.076 \quad R_r := \frac{R_{r_}}{Z_b} = 0.058$$

$$I_{ds_} := 6.16 A \quad \text{dato u tekstu zadatka} \quad I_{ds} := \frac{I_{ds_}}{I_b \cdot \sqrt{2}} = 0.65$$

$$m_e(I_{ds}, I_{qs}) := \frac{M^2}{M + \lambda_r} \cdot I_{ds} \cdot I_{qs} \quad \text{Izraz za moment}$$

$$K_m := \frac{M^2}{M + \lambda_r} \cdot I_{ds} = 0.994 \quad K_{m_} := \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M_-^2}{M_- + \lambda_{r_}} \cdot I_{ds_} = 2.952 \cdot \frac{N \cdot m}{A}$$

a) regulacija struje

$$K_a := K_{a_} \quad \text{Pojaćanje iz Volti (signalnih) u Volte (energetske)}$$

$$T_\sigma := \frac{\frac{(L_{s_} \cdot L_{r_} - M_-^2)}{L_{r_}}}{R_{s_}} = 9.48 \cdot ms \quad \frac{\frac{(L_s \cdot L_r - M^2)}{L_r} \cdot L_b}{R_s \cdot Z_b} = 9.48 \cdot ms$$

$$F_{i0} = K_i \cdot \frac{1 + p \cdot T_i}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_a}{1 + p \cdot T_c} \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + p \cdot T_\sigma}$$

$$K_{pi} := K_{pi_} \cdot \frac{I_b}{U_b} = 0.03 \cdot r_j$$

Kompensacija veće vremenske konstante:

$$T_i := T_\sigma = 9.48 \cdot \text{ms}$$

Nakon skraćivanja

$$F_{i0} = K_i \cdot \frac{1}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_a}{1 + p \cdot T_c} \cdot \frac{1}{R_s}$$

$$F_{pi} := K_{pi} \quad F_{iw} = \frac{F_{i0}}{1 + K_{pi} \cdot F_{i0}} = \frac{K_i \cdot \frac{1}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_a}{1 + p \cdot T_c} \cdot \frac{1}{R_s}}{1 + K_{pi} \cdot \left(K_i \cdot \frac{1}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_a}{1 + p \cdot T_c} \cdot \frac{1}{R_s} \right)}$$

$$F_{iw} = \frac{\frac{K_i \cdot K_a}{R_s}}{p^2 \cdot T_c \cdot T_i + p \cdot T_i + \frac{K_{pi} \cdot K_i \cdot K_a}{R_s}}$$

$$a_0 = \frac{K_{pi} \cdot K_i \cdot K_a}{R_s} \quad a_1 = T_i \quad a_2 = T_c \cdot T_i$$

$$a_1^2 = 2 \cdot a_0 \cdot a_2 \quad \text{Modulni optimum}$$

$$T_i^2 = 2 \cdot \frac{K_{pi} \cdot K_i \cdot K_a}{R_s} \cdot T_c \cdot T_i \quad K_i := \frac{T_i}{2} \cdot \frac{R_s}{K_{pi} \cdot K_a} \cdot \frac{1}{T_c} = 0.108$$

Kad se zamene vrednosti u F_{iw} :

$$F_{iw} = \frac{\left(\frac{T_i}{2} \cdot \frac{R_s}{K_{pi} \cdot K_a} \cdot \frac{1}{T_c} \right) \cdot \frac{K_a}{R_s}}{p^2 \cdot T_c \cdot T_i + p \cdot T_i + \frac{K_{pi} \cdot K_a}{R_s} \cdot \left(\frac{T_i}{2} \cdot \frac{R_s}{K_{pi} \cdot K_a} \cdot \frac{1}{T_c} \right)} = \frac{\left(\frac{T_i}{2} \cdot \frac{1}{K_{pi}} \cdot \frac{1}{T_c} \right)}{p^2 \cdot T_c \cdot T_i + p \cdot T_i + \left(\frac{T_i}{2} \cdot \frac{1}{T_c} \right)}$$

$$F_{iw} = \frac{\left(\frac{T_i}{2} \cdot \frac{1}{K_{pi}} \cdot \frac{1}{T_c} \right)}{p^2 \cdot T_c \cdot T_i + p \cdot T_i + \left(\frac{T_i}{2} \cdot \frac{1}{T_c} \right)} = \frac{\frac{1}{K_{pi}}}{p^2 \cdot (2T_c^2) + p \cdot (2 \cdot T_c) + 1}$$

Uprošćenje po zadatku: zanemariti članove višeg reda:

$$F_{iw} = \frac{\frac{1}{K_{pi}}}{p \cdot (2 \cdot T_c) + 1}$$

Regulator brzine

$$K_e := \frac{1}{K_{pi}} = 32.816$$

$$T_e := 2 \cdot T_c = 1 \cdot \text{ms}$$

$$K_{p\omega} := \frac{10\text{V}}{150 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$K_{p\omega} := K_{p\omega} \cdot \frac{\omega_b}{p} \cdot \frac{1}{U_b} = 0.048$$

$$T_{p\omega} := 10\text{ms}$$

Dato u tekstu zadatka

$$F_{\omega 0} = K_{\omega} \cdot \frac{1 + p \cdot T_{\omega}}{p \cdot T_{\omega}} \cdot \frac{1}{K_m} \cdot \frac{K_e}{1 + p \cdot T_e} \cdot K_m \cdot \frac{1}{p \cdot T_m}$$

$$F_{p\omega} = \frac{K_{p\omega}}{1 + p \cdot T_{p\omega}}$$

Transformacija vremenskih konstanti koje su po vrednosti slične

$$T_{e2} := T_e + T_{p\omega}$$

$$T_{e2} = 11 \cdot \text{ms}$$

Što je mnogo manje od:

$$T_m = 6.692 \text{ s}$$

$$F_{\omega w} = \frac{F_{\omega 0}}{1 + K_{p\omega} \cdot F_{\omega 0}} = \frac{K_{\omega} \cdot \frac{1 + p \cdot T_{\omega}}{p \cdot T_{\omega}} \cdot \frac{K_e}{(1 + p \cdot T_{e2})} \cdot \frac{1}{p \cdot T_m}}{1 + K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot \frac{1 + p \cdot T_{\omega}}{p \cdot T_{\omega}} \cdot \frac{K_e}{(1 + p \cdot T_{e2})} \cdot \frac{1}{p \cdot T_m}}$$

$$F_{\omega w} = \frac{K_{\omega} \cdot (1 + p \cdot T_{\omega}) \cdot K_e}{p^2 T_{\omega} \cdot T_m \cdot (1 + p \cdot T_{e2}) + K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e \cdot (1 + p \cdot T_{\omega})}$$

$$F_{\omega w} = \frac{K_{\omega} \cdot K_e \cdot (1 + p \cdot T_{\omega})}{p^3 T_{\omega} \cdot T_m \cdot T_{e2} + p^2 \cdot T_{\omega} \cdot T_m + K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e \cdot T_{\omega} \cdot p + K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e}$$

$$a_3 = T_{\omega} \cdot T_m \cdot T_{e2} \quad a_2 = T_{\omega} \cdot T_m \quad a_1 = K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e \cdot T_{\omega} \quad a_0 = K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e$$

$$a_2^2 = 2 \cdot a_3 \cdot a_1$$

$$a_1^2 = 2 \cdot a_2 \cdot a_0$$

$$(T_{\omega} \cdot T_m)^2 = 2 \cdot (T_{\omega} \cdot T_m \cdot T_{e2}) \cdot (K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e \cdot T_{\omega})$$

$$(K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e \cdot T_{\omega})^2 = 2 \cdot (T_{\omega} \cdot T_m) \cdot (K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e)$$

$$T_m = 2 \cdot (T_{e2}) \cdot (K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e)$$

$$(K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e \cdot T_{\omega}) = 2 \cdot T_m$$

$$K_{\omega} := \frac{T_m}{2 \cdot T_{e2} \cdot K_{p\omega} \cdot K_e} = 194.727$$

$$T_{\omega} := \frac{2 \cdot T_m}{K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_e} = 44 \cdot \text{ms}$$

$$\frac{M^2}{L_r} \cdot I_{dn} \cdot I_{qn} = M_{en} \quad I_{ds_} = 6.16 \text{ A} \quad I_{dn_} := I_{ds_}$$

$$I_{qn_} := \sqrt{(\sqrt{2} \cdot I_b)^2 - I_{dn_}^2} = 7.207 \text{ A} \quad I_{dn} := \frac{I_{dn_}}{I_b \cdot \sqrt{2}} = 0.65$$

$$I_{qn} := \sqrt{1 - I_{dn}^2} = 0.76 \quad \text{Provera} \quad I_{dn}^2 + I_{qn}^2 = 1$$

$$M_{en_} := m_{e_}(I_{dn_}, I_{qn_}) = 21.278 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{en} := m_e(I_{dn}, I_{qn}) = 0.755 \quad M_{en} \cdot M_b = 21.278 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{LIM} := 1.5 \cdot M_{en} = 1.133 \quad \text{U relativnim jedinicama}$$

$$\text{LIM_} := 1.5 \cdot M_{en_} = 31.917 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Ubrzavanje bez opterećenja

Ubrzavanje sa nominalnim opterećenjem

$$\alpha_{\text{ref.max}} := \frac{\text{LIM}}{T_m} = 0.169 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\alpha_{\text{ref.min}} := \frac{\text{LIM} - M_{en}}{T_m} = 0.056 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\alpha_{\text{ref.max}} \cdot \omega_b = 53.195 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\alpha_{\text{ref.min}} \cdot \omega_b = 17.732 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\text{LIM}}{J} = 26.597 \frac{1}{\text{s}^2}$$