

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.

Elektromotorni pogoni

Beograd, 22.1.2024.

Ispit – II deo

Zadatak: Trofaznom asinhronom motoru sa kaveznim rotorom mora se ograničiti polazna struja na vrednost 2,5 nominalne struje. Primenjuje se uređaj za fazno upravljanje (soft-starter), učestanost napona napajanja je stalna i nominalna.

- a) Odrediti vrednost sniženog napona napajanja pomoću koga se ostvaruje traženi uslov. Odrediti polazni moment u ovom slučaju.

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

- b) Za slučaj da moment opterećenja ne zavisi od brzine ($m_m = \text{const.}$), odrediti najveću vrednost momenta opterećenja pri kojoj pogon može da startuje. Odrediti brzinu stacionarnog stanja pri tom opterećenju nakon završetka procesa zaletanja. Odrediti efektivnu vrednost struje motora u ustaljenom stanju.

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

- c) U ustaljenom stanju određenom u tački b), potrebno je ostvariti protivstrujno kočenje (II način) prevezivanjem redosleda faza na statoru, ali uz ograničenje struje motora na vrednost 2,5 nominalne struje. Izračunati efektivnu vrednost (sniženog) napona statora na početku protivstrujnog kočenja da bi se ostvarilo zahtevano ograničenje struje.

Odgovor je na strani: _____ [1 poen]

Podaci o motoru: Fazni napon 220V, nominalna brzina 1430o/min, nominalna struja 4A, induktivnosti rasipanja $\lambda_s = \lambda_r = 8,754$ mH, otpor rotora sveden na stator $R_r' = 2,5 \Omega$, otpor statora $R_s = 1,2 \Omega$, $M \rightarrow \infty$, nominalna učestanost 50Hz. Zanimariti gubitke u gvožđu i elektromagnetne prelazne procese, zanemariti više harmonike napona i struje.

Teorijsko pitanje: Nacrtati i ukratko objasniti principijelnu šemu uređaja za fazno upravljanje (soft-startera) u pogonu sa asinhronim motorom. [1 poen]

Kako se može obezbediti bez-kontaktna promena smer obrtanja motora? [0,5 poena]

Koje su oblasti primene, prednosti i mane ovakvih uređaja? [0,5 poena]

Odgovor, šeme i obrazloženje je na strani: _____ [ukupno 2 poena]

$$\phi \equiv 2 \cdot \pi \text{ rad} \quad r_j \equiv 1 \quad \text{Definisanje jedinica.}$$

$$U_n := 220 \text{ V} \quad R_r := 2.5 \Omega \quad n_n := 1430 \frac{\text{°}}{\text{min}} \quad P := 2 \quad \text{Broj pari polova}$$

$$R_s := 1.2 \Omega$$

$$f := 50 \text{ Hz} \quad \omega_s := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \omega_n := n_n = 149.749 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{MathCad konvertuje jedinice.}$$

$$\lambda_s := 8.754 \text{ mH} \quad \lambda_r := \lambda_s = 8.754 \times 10^{-3} \text{ H} \quad X_s := \omega_s \cdot \lambda_s = 2.75 \Omega$$

$$s_n := \frac{\omega_s - P \cdot \omega_n}{\omega_s} = 0.0467$$

$$I_n := \frac{U_n}{\left(R_s + \frac{R_r}{s_n} \right) + i \cdot \omega_s \cdot (\lambda_s + \lambda_r)} = (3.977 - 0.399i) \text{ A} \quad |I_n| = 3.997 \text{ A}$$

$$U_b := U_n \quad I_b := |I_n| \quad \omega_b := \omega_s$$

$$Z_b := \frac{U_b}{I_b} = 55.047 \Omega \quad L_b := \frac{Z_b}{\omega_b} = 0.175 \text{ H}$$

$$P_b := 3 \cdot U_b \cdot I_b = 2.638 \text{ kW} \quad M_b := P \cdot \frac{P_b}{\omega_b} = 16.792 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Normalizacija

$$\underline{R}_r := \frac{R_r}{Z_b} = 0.045 \quad \underline{\lambda}_s := \frac{\lambda_s}{L_b} = 0.05 \quad \underline{\lambda}_r := \frac{\lambda_r}{L_b} = 0.05 \quad \underline{\omega}_s := \frac{\omega_s}{\omega_b} = 1 \quad \underline{X}_s := \frac{X_s}{Z_b} = 0.05$$

$$\underline{R}_s := \frac{R_s}{Z_b}$$

[N:]

$$I_s(U_s, s) := \frac{U_s}{\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right) + i \cdot \omega_s \cdot (\lambda_s + \lambda_r)} \quad I_r(U_s, s) := I_s(U_s, s) \quad M_e(U_s, s) := \frac{R_r}{s} \cdot \frac{1}{\omega_s} \cdot \left(|I_r(U_s, s)| \right)^2$$

$$\omega(s) := (1 - s) \omega_s$$

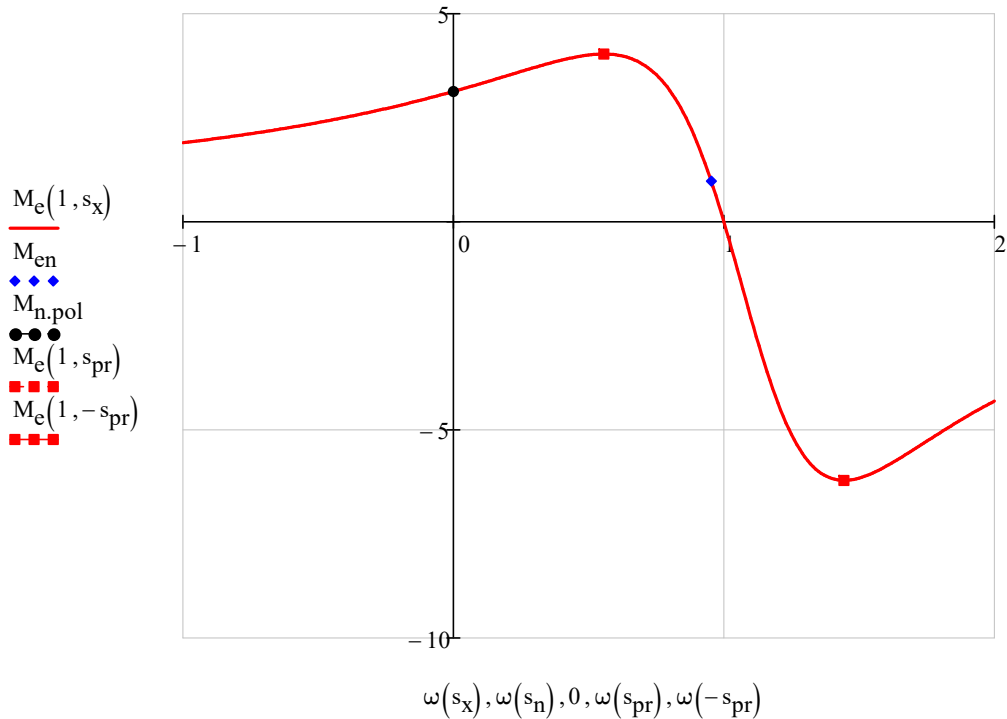
Nominalna karakteristika i karakteristične tačke.

$$M_{n, \text{pol}} := M_e(1, 1) = 3.132 \cdot r_j \quad M_{en} := M_e(1, s_n) = 0.973 \quad M_{en} \cdot M_b = 16.342 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$s_{pr} := \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2}} = 0.444 \quad M_{n, pr} := M_e(1, s_{pr}) = 4.03 \quad M_{en} \cdot M_b \cdot n_n = 2.447 \cdot \text{kW}$$

$$s_x := -1, -0.99 \dots 2$$

Promenljiva za izračunavanje statičkih karakteristika



a) Odrediti vrednost sniženog napona napajanje pomoću koga se ostvaruje ograničenje polazne struje na vrednost 2,5 nominalne struje. Odrediti polazni moment pri tom naponu.

$$I_{pol} := 2.5 \cdot r_j \quad I_{pol} \cdot I_b = 9.991 \text{ A}$$

$$U_{sx} := 0.1 \quad \text{Početni podatak za numerički postupak.}$$

$$\text{Given} \quad |I_s(U_{sx}, 1)| = I_{pol} \quad U_{sA} := \text{Find}(U_{sx}) = 0.301 \quad U_{sA} \cdot U_b = 66.233 \text{ V}$$

Analitički, rešava se jednakost:

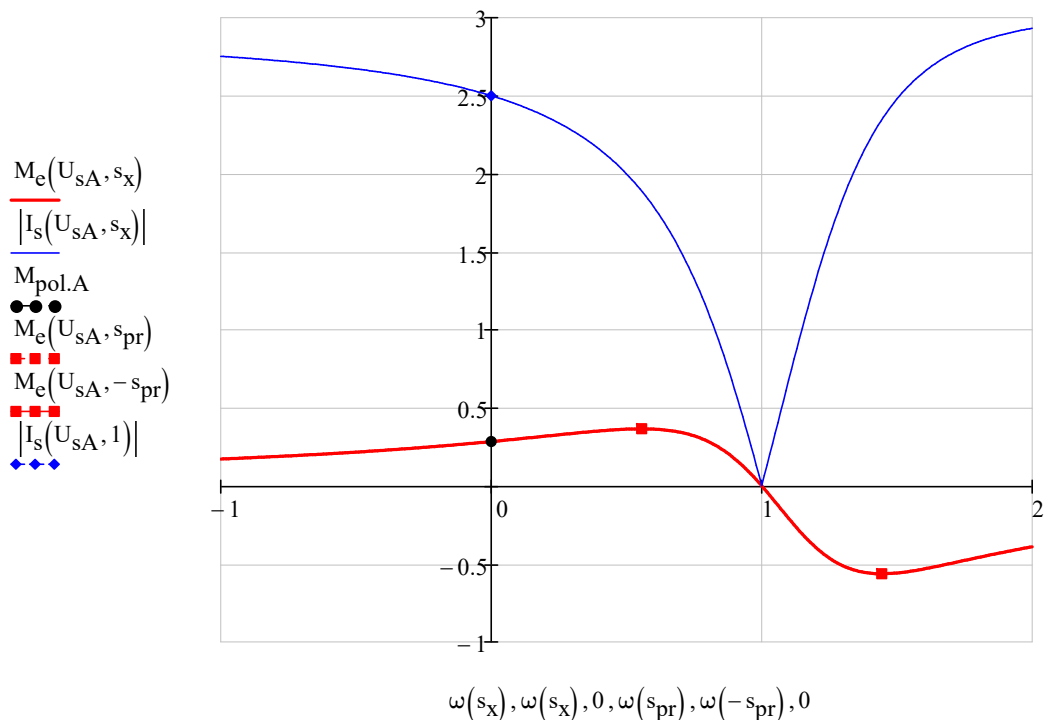
$$\frac{U_{sA}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{1}\right)^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2}} = I_{pol} \quad I_{pol} \cdot \sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{1}\right)^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2} = 0.301 \cdot r_j$$

$$|I_s(U_{sA}, 1)| = 2.5 \cdot r_j \quad |I_s(U_{sA}, 1)| \cdot I_b = 9.991 \text{ A} \quad \text{Provera rešenja}$$

$$M_{pol.A} := M_e(U_{sA}, 1) = 0.284 \cdot r_j \quad M_e(U_{sA}, 1) \cdot M_b = 4.767 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{pr} := \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{sA}^2}{\sqrt{R_s^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2} + R_s} = 0.365 \quad M_e(U_{sA}, s_{pr}) = 0.365$$

$$M_e(U_{sA}, s_{pr}) \cdot M_b = 6.134 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$



b) Za slučaj da moment opterećenja ne zavisi od brzine, odrediti najveću vrednost tog momenta pri kojoj pogon može da startuje. Odrediti brzinu stacionarnog stanja u tom slučaju.

$$M_m := M_{pol.A} = 0.284 \cdot r_j$$

$$M_m \cdot M_b = 4.767 \cdot N \cdot m$$

$$s_{Bx} := 0.01$$

Početni podatak za numerički postupak.

$$s_n = 0.047$$

Given

$$M_e(1, s_{Bx}) = M_m$$

$$s_B := \text{Find}(s_{Bx}) = 0.0131$$

$$s_B \cdot \omega_b = 4.104 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_B := (1 - s_B) \cdot \omega_s = 0.987$$

$$\omega_B \cdot \frac{\omega_b}{p} = 155.028 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_B \cdot \frac{\omega_b}{p} = 1480.404 \cdot \frac{\text{o}}{\text{min}}$$

$$\omega_B \cdot \omega_b = 310.055 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Analitički, rešava se jednakost koja ima dva rešenja zbog kvadratne prirode:

$$\frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{R_r}{s_{Bx}} \cdot \frac{U_s^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s_{Bx}}\right)^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2} = M_m$$

$$\frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{U_s^2}{M_m} \cdot \left(\frac{R_r}{s_{Bx}}\right) = \left(R_s + \frac{R_r}{s_{Bx}}\right)^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2 = R_s^2 + 2 \cdot R_s \cdot \left(\frac{R_r}{s_{Bx}}\right) + \left(\frac{R_r}{s_{Bx}}\right)^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2$$

$$\left(\frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{U_s^2}{M_m} - 2 \cdot R_s\right) \cdot \left(\frac{R_r}{s_{Bx}}\right) = \left(\frac{R_r}{s_{Bx}}\right)^2 + R_s^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2$$

$$b := -\left(\frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{U_s^2}{M_m} - 2 \cdot R_s\right) = -3.479 \quad c := R_s^2 + (\omega_s^2) \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2 = 0.01 \quad x := \frac{R_r}{s_{Bx}}$$

$$x^2 + b \cdot x + c = 0$$

Rešenja kvadratne jednačine su:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} -\frac{b}{2} + \frac{\sqrt{b^2 - 4 \cdot c}}{2} \\ -\frac{b}{2} - \frac{\sqrt{b^2 - 4 \cdot c}}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.476 \\ 3.009 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$s_{Bx1} := \frac{R_r}{x_1} = 1.3064\% \quad \text{Usvajamo}$$

$$s_{Bx2} := \frac{R_r}{x_2} = 15.095 \quad \text{Odbacujemo}$$

$$s_B = 1.3064\%$$

$$\omega_B := 1 - s_B = 0.987$$

$$\omega_B \cdot \frac{\omega_b}{p} = 155.028 \cdot \frac{\text{rad}}{s}$$

Napon u ustaljenom stanju, nakon završetka prelaznog procesa ima nominalnu vrednost.

$$|I_s(1, s_B)| = 0.286 \cdot r_j$$

$$|I_s(1, s_B)| \cdot I_b = 1.142 \text{ A}$$

$$M_m \cdot M_b = 4.767 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_e(1, s_B) = 0.284 \cdot r_j$$

$$M_e(1, s_B) \cdot M_b = 4.767 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Moment motora je jednak momentu opterećenja.

c) U ustaljenom stanju određenom u tački b), potrebno je ostvariti protivstrujno kočenje (II način) prevezivanjem redosleda faza na statoru, ali uz ograničenje struje motora na vrednost 2,5 nominalne struje. Izračunati efektivnu vrednost (sniženog) napona statora na početku protivstrujnog kočenja da bi se ostvarilo ograničenje struje

$$I_{\max} := 2.5 r_j$$

$$I_{\max} \cdot I_b = 9.991 \text{ A}$$

Kada se preveže redosled faza, smer obrtnog polja se promeni, pa možemo da rešavamo zadatak sa negativnom vrednošću sinhronne učestanosti, što za nepromenjenu brzinu dovodi do drugačije vrednosti klizanja.

$$s_{kC} := \frac{(-\omega_s) - \omega_B}{-\omega_s} = 1.987$$

$$s_{kC} = 198.694\%$$

Na početku procesa protivstrujnog kočenja brzina je ostala ista (zanemarujemo trajanje elektromagnetnog prelaznog procesa)

$$\text{Izraz za struju:} \quad I_k(U_s, s_k) := \frac{U_s}{\left(R_s + \frac{R_r}{s_k} \right) + i \cdot |-\omega_s| \cdot (\lambda_s + \lambda_r)}$$

Impedansa po fazi ne poznaje smer obrtnog polja.

Ukoliko započnemo protivstrujno kočenje na nominalnom naponu, dobijamo velike vrednosti struje

$$I_k(1, s_{kC}) = 3.728 - 8.342i$$

$$|I_k(1, s_{kC})| \cdot I_b = 36.517 \text{ A}$$

Zbog toga tražimo sniženu vrednost napona, da struja ostane ograničena

$$\text{Given} \quad |I_k(U_{sx}, s_{kC})| = I_{\max}$$

$$U_{sC} := \text{Find}(U_{sx}) = 0.274$$

$$U_{sC} \cdot U_b = 60.195 \text{ V}$$

Drugi način rešavanja je da pretpostavimo da je brzina promenila znak (što zapravo nije) i da je klizanje veće od 1, na negativnoj brzini koja odgovara protivstrujnom kočenju

$$s_C := \frac{\omega_s - (-\omega_B)}{\omega_s} = 1.987$$

$$I_s(1, s_C) = 3.728 - 8.342i$$

$$|I_s(1, s_C)| \cdot I_b = 36.517 \text{ A}$$

$$\text{Given} \quad |I_s(U_{sx}, s_C)| = I_{\max}$$

$$U_{sC2} := \text{Find}(U_{sx}) = 0.274$$

$$U_{sC2} \cdot U_b = 60.195 \text{ V}$$

Analitički se rešava jednakost

$$I_{\max} \cdot \sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s_C} \right)^2 + \omega_s^2 \cdot (\lambda_s + \lambda_r)^2} = 0.274$$

Moment pri sniženom naponu nije veliki

$$M_{eC} := M_e(U_{sC}, s_C) = 0.143 \cdot r_j$$

Pri nominalnom naponu, moment bi bio

$$M_e(1, s_C) = 1.908 \cdot r_j$$

Ali bi struja pri nominalnom naponu bila

$$|I_s(1, s_C)| = 9.137 \cdot r_j$$

Momenti zavise kvadratno sa naponom, što se vidi iz odnosa:

$$\left(\frac{1}{U_{sC}}\right)^2 = 13.358 \quad \frac{M_e(1, s_C)}{M_{eC}} = 13.358$$

