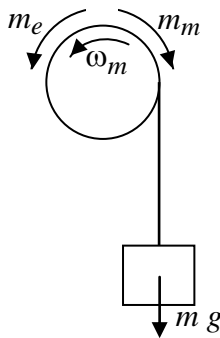


1. Zadatak: Trofazni asinhroni motor radi opterećen nominalnim momentom. Odrediti brzinu obrtanja pri podizanju i pri spuštanju tereta u dizaličkom pogonu.

Podaci o motoru: $p = 3$, $f = 50 \text{ Hz}$, $s_n = 3 \%$.

REŠENJE :



Slika 1.1: Momenti na vratilu motora pri dizanju tereta.

U svakom pogonu kretanje je posledica dva međusobno suprotstavljena momenta: električni, motorni, pogonski (m_e) i mehanički, kočni, moment opterećenja (m_m), slika 1.1. U dizaličkom pogonu moment opterećenja je posledica delovanja gravitacione sile g na teret mase m .

Teret će se pokrenuti ako je motorni moment veći od momenta opterećenja, a podizanje se ravnomernom brzinom kada su ovi momenti jednaki. Smerovi momenata i ugaone brzine prikazani su na slici 1.1. Sa iste slike se vidi da moment konverzije asinhronog motora deluje u smeru obrtanja bubnja za koji je zakačen teret, a moment opterećenja m_m se suprotstavlja kretanju pogona. Za ovaj režim važi $\omega_m > 0$; $m_e > 0$, $m_m > 0$, a asinhrona mašina radi u motorskom režimu rada.

a.) Da bi asinhrona mašina mogla da radi tj. da bi se rotor mogao obrtati, mora se obezbediti indukovani napon tj. struja u namotajima rotora. To se može ostvariti jedino ako se rotor asinhronne mašine obrće sporije od Teslinog obrtnog polja u zazoru, koje stvara statorski namotaj. Obrtno polje ima sinhronu brzinu n_s , a brzina rotora u motorskom režimu rada je n . Razlika između ovih brzina naziva se klizanje (s), i predstavlja relativnu vrednost brzine rotora u odnosu na brzinu statorskog obrtnog polja. Uobičajeno je u literaturi i inženjerskoj praksi da se koristi relativna vrednost klizanja u odnosu na sinhronu brzinu, ali i da se pojam "relativno" podrazumeva pa se i izostavlja, tako da se upotrebljava termin klizanje:

$$s [r.j.] = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} [r.j.] \quad (1.1)$$

Klizanje se izražava i u procentima :

$$s [\%] = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \cdot 100 = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 [\%] \quad (1.2)$$

Sinhrona brzina n_s zavisi od frekvencije napajanja i od broja pari polova p , a izražava se brojem obrtaja u minuti $[o/min]$:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.3)$$

Sinhrona ugaona brzina se izražava u $\left[\frac{rad}{s} \right]$:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{p} f \quad (1.4)$$

Vrednosti sinhronne brzine za frekvenciju od $f = 50$ Hz i različit broj pari polova p su date u tabeli:

p	1	2	3	4
n_{sin}	3000	1500	1000	750

U ovom zadatku, asinhroni motor koji podiže teret ima $p = 3$ para polova, tako da je njegova sinhrona brzina:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \frac{o}{min}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{3} \cdot 50 = 104,72 \frac{rad}{s} \quad (1.5)$$

Za poznatu sinhronu brzinu i poznato nominalno klizanje, iz jed. (1.1) dolazi se do izraza kojim se izračunava brzina obrtanja u ovom režimu rada, tj. pri podizanju tereta.

$$n = (1 - s) \cdot n_s \quad (1.6)$$

$$\omega = [1 - s] \cdot \omega_s \quad (1.7)$$

U postavci zadatka je dato da je motor opterećen nominalnim momentom, što prouzrokuje da je klizanje u takvom režimu nominalno, odnosno mašina se obrće nominalnom brzinom.

$$n_n = (1 - s_n) \cdot n_s \quad (1.8)$$

$$n_n = (1 - 0,03) \cdot 1000 = 970 \left[\frac{o}{min} \right] \quad (1.9)$$

Radna tačka ovog režima rada je u tački A, i nalazi se na karakteristici (1) na slici 1.2. Ugaona brzina obrtanja rotora se može izračunati kao:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{60} \cdot n_n = \frac{2\pi}{60} \cdot 970 = 101,578 \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (1.10)$$

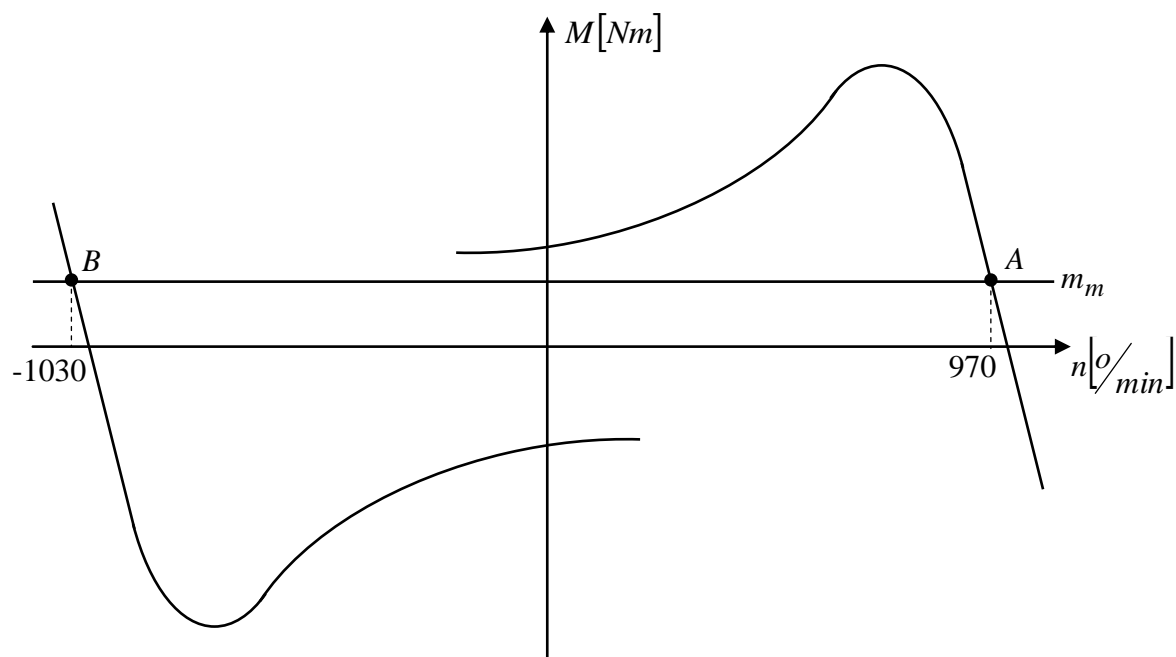
b.) Da bi se ostvarilo spuštanje tereta, mora se promeniti smer obrtnog polja statora asinhronne mašine, da bi se omogućilo obrtanje bubnja na suprotnu stranu.

Moment opterećenja nije promenio smer jer teret uvek vuče pogon na dole, bez obzira na smer kretanja (dizanje/spuštanje). Prilikom uključivanja motora za rad u suprotnom smeru, teret povećava brzinu rotora iznad sinhronne brzine, motor prelazi u generatorski režim rada i ograničava brzinu spuštanja tereta. U odnosu na sliku 1.1, promenjen je smer kretanja $\omega < 0$ a momenti motora i opterećenja su zadržali smerove. Pošto su brzina obrtanja i moment konverzije asinhronne mašine suprotnih smerova, režim rada je generatorski. U ovom režimu rada klizanje iznosi:

$$s_n = -0,03 [r.j.] \quad (1.11)$$

jer je brzina obrtanja veća od sinhronne brzine i iznosi:

$$n_n = -(1 - s_n) \cdot n_s = -(1 - (-0,03)) \cdot 1000 = -1030 \left[\frac{o}{min} \right] \quad (1.12)$$



Slika 1.2: Radne tačke dizaličnog pogona na mehaničkoj karakteristici motora

Na slici 1.2 prikazana je mehanička karakteristika motora i karakteristika opterećenja m_m . Karakteristika opterećenja je konstantna, i ne zavisi od brzine ni po iznosu ni po smeru. Uvek se podiže i spušta isti teret. Radna tačka podizanja tereta označena je sa A , a radna tačka spuštanja tereta označena je sa B . Ovde je potrebno obratiti pažnju na izgled mehaničke karakteristike motora pri promenjenom smeru obrtnog magnetnog polja.

2. Zadatak: Trofazni kavezni asinhroni motor severnoameričkog proizvođača ima nominalne podatke: $P_n = 3 \text{ kW}$, $n_n = 1746 \text{ o/min}$, $U_n = 220 \text{ V}$, $f_n = 60 \text{ Hz}$, sprega Δ .

a.) Za nominalni režim odrediti klizanje, faktor snage, struju statora, stepen iskorišćenja i obrtni moment.

b.) Motor se preveže u spregu zvezda, priključi na mrežu napona 400 V , 50 Hz i optereti tako da mu je klizanje $s_1 = s_n$. Odrediti struju, moment i stepen iskorišćenja u ovom režimu.

Podaci o motoru (za 60 Hz): $R_s = 1 \Omega$, $R_r = 1,2 \Omega$, $X_{ls} = X_{lr} = 2 \Omega$, $X_m = 80 \Omega$, $P_{gm} = 160 \text{ W}$

REŠENJE:

a.) Nominalni režim

Prvo se treba odrediti nominalno klizanje s_n :

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} [r.j.] \quad (2.1)$$

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.2)$$

Gde je n_n nominalna brzina i njena vrednost je data u zadatku.

n_s predstavlja sinhronu brzinu.

f je frekvencija napona mreže na koju je priključen ovaj motor. Standardne vrednosti frekvencija svetskih mreža su 50 Hz i 60 Hz .

p predstavlja broj pari polova.

Da bi se odredilo klizanje, mora se odrediti sinhrona brzina motora. Kada je motor priključen na standardnu severnoameričku mrežu, frekvencija je $f = 60 \text{ Hz}$. Ukoliko pretpostavimo da je mašina dvopolna, tj. da je broj pari polova 1, tada bi sinhrona brzina i klizanje bili:

$$n_s = 60 \cdot f = 60 \cdot 60 = 3600 \frac{\text{o}}{\text{min}} \quad (2.3)$$

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3600 - 1746}{3600} = 0,515 [r.j.] = 51,5 \% \quad (2.4)$$

Ovakvo rešenje ne odgovara stvarnosti. Kod asinhronih motora malih snaga u nominalnom radu klizanje ne prelazi vrednost od 10%. Kod motora većih snaga nominalno klizanje je često i ispod 2%. Pošto je klizanje blisko povezano sa Džulovim gubicima u rotoru, po ovom rešenju, zbog vrlo visokog klizanja motor bi imao vrlo mali stepen iskorišćenja.

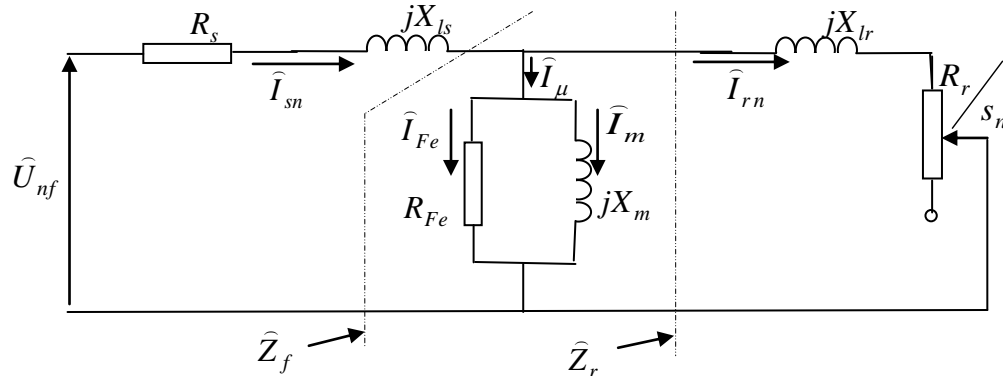
Vrednosti sinhronne brzine, na osnovu izraza (2.2), za različiti broj pari polova p i frekvencije od 50 Hz i 60 Hz date su u tabeli.

	p	1	2	3	4	5
$f = 50 \text{ Hz}$	o/min	3000	1500	1000	750	600
$f = 60 \text{ Hz}$	o/min	3600	1800	1200	900	720

Iz tabele je očigledno da je sinhrona brzina 1800 o/min , što znači da je ovaj motor četvoropolni. Klizanje u nominalnom režimu iznosi:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1800 - 1746}{1800} = 0,03 [r.j.] = 3 \% \quad (2.5)$$

Ekvivalentna šema asinhronog motora u nominalnom režimu prikazana je na slici 2.1. Naponi, struje i impedanse su prikazane kao kompleksni vektori i stoga su nadvučeni. Rotorske veličine su svedene na statorsko kolo.



Slika 2.1: Ekvivalentna šema asinhronog motora (po jednoj fazi).

\hat{U}_{nf} - fazni napon na koji je priključen motor (nominalan),

R_s - omski otpor jedne faze namotaja statora,

R_r - omski otpor jedne faze namotaja rotora (sveden na stator),

X_{ls} - reaktansa rasipanja koja opisuje rasipni fluks statora tj. onaj deo fluksa statora koji ne prodire u magnetno kolo rotora,

X_{lr} - reaktansa rasipnog fluksa rotora (svedena na stator),

R_{Fe} - omski otpor kojim se predstavljaju gubici aktivne snage u gvožđu. U zadatku se ovi gubici zanemaruju tj. $R_{Fe} = \infty$,

X_m - reaktansa magnećenja magnetnog kola,

\hat{I}_{sn} - struja statora (nominalna),

\hat{I}_m - reaktivna komponenta struje magnećenja magnetnog kola,

\hat{I}_μ - ukupna struja magnećenja.

\hat{I}_{Fe} - aktivna komponenta struje magnećenja. Pošto je $R_{Fe} = \infty$, ova struja se zanemaruje, pa je $\hat{I}_m = \hat{I}_\mu$,

\hat{I}_{rn} - struja rotora (nominalna, svedena na stator).

Svi elementi ekvivalentne šeme poznati su iz zadatka i iz podataka o motoru. Za izračunavanje struje statora i faktora snage u nominalnom režimu rada, prvo je potrebno naći vrednost impedanse ekvivalentne šeme. Vrednost ove impedanse menja se sa opterećenjem, odnosno sa promenom klizanja. U ovom slučaju traži se vrednost za nominalnu radnu tačku. Postupak računanja ekvivalentne impedanse simbolički je prikazan na slici 2.1. Impedanse statorskog i rotorskog namotaja, grane magnećenja i cele ekvivalentne šeme date su, respektivno, kao :

$$\widehat{Z}_s = R_s + jX_{ls} = 1 + j2 \quad \Omega \quad (2.6)$$

$$\widehat{Z}_r = \frac{R_r}{s_n} + jX_{lr} = \frac{1,2}{0,03} + j2 = 40 + j2 \quad \Omega \quad (2.7)$$

$$\widehat{Z}_m = jX_m = j80 \quad \Omega \quad (2.8)$$

$$\widehat{Z}_e = \widehat{Z}_s + \widehat{Z}_f = \widehat{Z}_s + \frac{\widehat{Z}_r \cdot \widehat{Z}_m}{\widehat{Z}_r + \widehat{Z}_m} \quad (2.9)$$

Ekvivalentna vrednost paralelno vezanih impedansi \widehat{Z}_r i \widehat{Z}_m označena je kao \widehat{Z}_f :

$$\widehat{Z}_f = \frac{\widehat{Z}_r \cdot \widehat{Z}_m}{\widehat{Z}_r + \widehat{Z}_m} = \frac{(40 + j2) \cdot j80}{40 + j2 + j80} = \frac{40,05 \cdot e^{j2,86^\circ} \cdot 80 \cdot e^{j90^\circ}}{40 + j82} = \frac{3204 \cdot e^{j92,862^\circ}}{91,6788 \cdot e^{j63,435^\circ}}$$

$$\widehat{Z}_f = 34,948 \cdot e^{j29,4274^\circ} = (30,439 + j17,17) \Omega \quad (2.10)$$

$$\widehat{Z}_e = \widehat{Z}_s + \widehat{Z}_f = 1 + j2 + 30,439 + j17,17 = (31,439 + j19,17) \Omega \quad (2.11)$$

$$|\widehat{Z}_e| = Z_e = \sqrt{31,439^2 + 19,17^2} = 36,823 \Omega \quad (2.12)$$

Na osnovu poznate impedanse ekvivalentne šeme dobija se faktor snage:

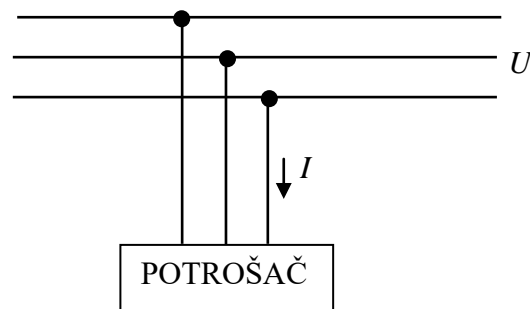
$$\cos \varphi_n = \frac{\operatorname{Re}\{\widehat{Z}_e\}}{|\widehat{Z}_e|} = \frac{31,439}{36,823} = 0,854 \quad (2.13)$$

Struja statora se izračunava na osnovu Omovog zakona. Kako je trofazni namotaj statora spregnut u trougao, fazni napon napajanja na namotaju je isti kao i napon mreže, pa je fazna struja kroz namot :

$$I_{sf n} = |\widehat{I}_{sf n}| = \frac{U_{nf}}{Z_e} = \frac{220}{36,823} = 5,975 \text{ A} \quad (2.14)$$

Pošto je trofazni namotaj statora spregnut u trougao, nominalna struja koja se uzima iz mreže (linijska) je veća od fazne za faktor $\sqrt{3}$, odnosno:

$$I_n = \sqrt{3} I_{sf n} = \sqrt{3} \cdot 5,975 = 10,348 \text{ A} \quad (2.15)$$



Slika 2.2: Prikaz vezivanja trofaznog potrošača na trofazni sistem napona.

Za bilo koji trofazni potrošač priključen na trofaznu mrežu napona U , (slika 2.2) električna snaga uzeta iz mreže izračunava se na osnovu izraza :

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.16)$$

U ovom slučaju traže se podaci za nominalni režim rada, pa je

$$P_{en} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10,348 \cdot 0,854 = 3366,7 \text{ W} \quad (2.17)$$

Ulazna snaga je veća od izlazne za ukupne gubitke koji se razvijaju u mašini, $\sum P_g$, koje čine:

P_{Cus} - gubici u bakru statora, tj. gubici usled proticanja struje kroz namot statora,

P_{Fe} - gubici u gvožđu, odnosno u magnetnom delu,

P_{Cur} - gubici u bakru statora, tj. gubici usled proticanja struje kroz namot rotora, i

P_{gm} - mehanički gubici na trenje i ventilaciju.

$$\sum P_g = P_{ul} - P_{iz} = P_{Cus} + P_{Fe} + P_{Cur} + P_{gm} \quad (2.18)$$

Gubici usled proticanja struje kroz namot statora u nominalnom režimu su:

$$P_{Cusn} = 3 \cdot R_s \cdot I_{sn}^2 = 3 \cdot 1 \cdot 5,975^2 = 107,1 \text{ W} \quad (2.19)$$

Gubici u magnetnom kolu ove mašine su po uslovu zadatka zanemareni, jer je $R_m = \infty$. Kako je frekvencija struje u rotoru proporcionalna klizanju, tj. u normalnim radnim režimima do nekoliko Herca, gubici u gvoždju su skocentrisani samo u statorskom delu magnetnog kola :

$$P_{Fe} = P_{Fes} + P_{Fer} \approx P_{Fes} \quad (2.20)$$

Ukupni gubici u mašini, za nominalni režim će biti:

$$\sum P_{gn} = 3 \cdot R_s \cdot I_{sn}^2 + 3 \cdot R'_r \cdot I_m^2 + P_{gm} \quad (2.21)$$

Da bi se odredili gubici u rotorskom namotu, potrebno je iz ekvivalentne šeme izračunati iznos struje I_r u nominalnom režimu. Gubici u namotaju rotora se mogu izračunati i iz stvarnih podataka rotorskog namota :

$$P_{Cur} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (2.22)$$

Medjutim, kod kaveznih asinhronih namota se ne može direktno izmeriti ni rotorski otpor ni rotorska struja. Zbog toga se gubici u namotaju rotora izračunavaju iz elektromagnetne snage obrtnog polja P_{ob} i klizanja s :

$$P_{Cur} = s \cdot P_{ob} \quad (2.23)$$

Gde se snaga obrtnog polja dobija tako što se od ulazne snage oduzmu ukupni gubici u statoru :

$$P_{ob} = P_e - P_{Cus} - P_{Fe} \quad (2.24)$$

Za nominalni režim ovog motora se dobija obrtna snaga:

$$P_{obn} = 3366,7 - 107,1 = 3259,6 \text{ W} \quad (2.25)$$

Pa su gubici u rotoru:

$$P_{Cur n} = s_n \cdot P_{obn} = 0,03 \cdot 3259,6 = 97,8 \text{ W} \quad (2.26)$$

Po uslovu zadatka, vrednost mehaničkih gubitaka na trenje i ventilaciju P_{gm} iznosi 160 W. Dakle, ukupni gubici ovog motora u nominalnom režimu, na osnovu izraza (2.18) imaju vrednost:

$$\sum P_{gn} = P_{Cusn} + P_{Cur n} + P_{gm} = 107,1 + 97,8 + 160 = 364,9 \text{ W} \quad (2.27)$$

Izlazna, mehanička snaga na vratilu ove mašine u nominalnom režimu rada P_{izn} će biti:

$$P_{izn} = P_n = P_{uln} - \sum P_{gn} = 3366,7 - 364,9 = 3001,8 \text{ W} \quad (2.28)$$

Ovo odgovara nominalnim podacima od 3 kW, sa natpisne pločice motora. Step en iskorišćenja svake mašine, η , definiše se kao odnos izlazne i ulazne snage i u nominalnom režimu je :

$$\eta_n = \frac{P_{izn}}{P_{uln}} = \frac{P_n}{P_{en}} = \frac{3001,8}{3366,7} = 0,892 = 89,2 \% \quad (2.29)$$

Mehanički moment na vratilu (izlazu mašine) po definiciji je količnik mehaničke snage i ugaone brzine:

$$M = \frac{P_{iz}}{\omega} \quad (2.30)$$

odnosno u traženoj nominalnoj radnoj tački:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{3001,8}{1746 \frac{2\pi}{60}} = 16,42 \text{ Nm} \quad (2.31)$$

b.) Promenjeno napajanje

Mašina se sada napaja iz mreže drugačije učestanosti, što ima uticaj na sinhronu brzinu obrtnog magnetnog polja, a time i na brzinu obrtanja rotora. Sada je:

$$n_1 = (1 - s_1) n_{s1} = (1 - s_1) \frac{60 \cdot f_1}{p} = (1 - 0,03) \frac{60 \cdot 50}{2} = 1455 \frac{o}{\text{min}} \quad (2.32)$$

Takodje, promena frekvencije napajanja utiče i na induktivnosti, koje se smanjuju za faktor 5/6, pa su ekvivalentne impedanse, istim postupkom kao pod a.) sledeće :

$$\hat{Z}_{s1} = R_s + jX_{ls1} = 1 + j1,667 \quad \Omega \quad (2.33)$$

$$\hat{Z}_{r1} = \frac{R_r}{s_n} + jX_{lr1} = \frac{1,2}{0,03} + j1,667 = 40 + j1,667 \quad \Omega \quad (2.34)$$

$$\hat{Z}_{m1} = jX_{m1} = j66,667 \quad \Omega \quad (2.35)$$

$$\hat{Z}_{f1} = \frac{\hat{Z}_{r1} \cdot \hat{Z}_{m1}}{\hat{Z}_{r1} + \hat{Z}_{m1}} = \frac{40,035 \cdot e^{j2,386^\circ} \cdot 66,667 \cdot e^{j90^\circ}}{40 + j68,333} = \frac{2669 \cdot e^{j92,386^\circ}}{79,69 \cdot e^{j59,036^\circ}}$$

$$\hat{Z}_{f1} = 33,492 \cdot e^{j33,35^\circ} = (27,977 + j18,41) \Omega \quad (2.36)$$

$$\hat{Z}_{e1} = \hat{Z}_{s1} + \hat{Z}_{f1} = 1 + j1,667 + 27,977 + j18,41 = (28,977 + j20,079) \Omega \quad (2.37)$$

$$|\hat{Z}_{e1}| = Z_{e1} = \sqrt{28,977^2 + 20,079^2} = 35,254 \Omega \quad (2.38)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{\operatorname{Re}\{\widehat{Z}_{e1}\}}{|\widehat{Z}_{e1}|} = \frac{28,977}{35,254} = 0,822 \quad (2.39)$$

Kako je trofazni namotaj statora spregnut u zvezdu (namotaj je na naponu između faze i neutralne tačke), fazni napon napajanja na namotaju je $\sqrt{3}$ puta manji nego napon mreže, pa je struja kroz namot :

$$I_{s1} = |\widehat{I}_{1n}| = \frac{U_{f1}}{Z_e} = \frac{400/\sqrt{3}}{35,254} = 6,551 \text{ A} \quad (2.40)$$

Zbog sprege zvezda, linijska struja (koja se uzima iz mreže) je ista kao fazna.

Bilans snaga je sad:

$$P_{e1} = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 6,551 \cdot 0,822 = 3730,5 \text{ W} \quad (2.41)$$

$$P_{Cus1} = 3 \cdot R_s \cdot I_{s1}^2 = 3 \cdot 1 \cdot 6,551^2 = 128,7 \text{ W} \quad (2.42)$$

$$P_{em1} = P_{e1} - P_{Cus1} - P_{Fe} = 3730,5 - 128,7 = 3601,7 \text{ W} \quad (2.43)$$

$$P_{Cur1} = s_1 \cdot P_{em1} = 0,03 \cdot 3601,7 = 108,1 \text{ W} \quad (2.44)$$

Vrednost mehaničkih gubitaka na trenje i ventilaciju P_{gm} će se promeniti jer je došlo do promene brzine. Ako usvojimo da je snaga gubitaka proporcionalna kvadratu brzine, ima se :

$$P_{gm1} = P_{gm} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = 160 \left(\frac{1455}{1746} \right)^2 = 111,1 \text{ W} \quad (2.45)$$

$$\sum P_{g1} = P_{Cus1} + P_{Cur1} + P_{gm1} = 128,7 + 108,1 + 111,1 = 347,9 \text{ W} \quad (2.46)$$

$$P_1 = P_{ul1} - \sum P_{g1} = 3601,7 - 347,9 = 3382,6 \text{ W} \quad (2.47)$$

Ova izlazna snaga je nešto veća od nominalne snage ali napon napajanja je sada 400 V, a ne 380 V (što bi bilo $\sqrt{3} \times 220$). Iako su gubici nešto manji nego u slučaju pod **a.**), postoji umerena opasnost od prekomernog zagrevanja jer je brzina motora smanjena a time i sposobnost hladjenja sopstvenim ventilatorom. Sa druge strane, stepen iskorišćenja i moment sada su:

$$\eta_1 = \frac{P_1}{P_{ul1}} = \frac{3382,6}{3601,7} = 0,939 = 93,9 \% \quad (2.48)$$

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{3382,6}{1455 \frac{2\pi}{60}} = 22,2 \text{ Nm} \quad (2.49)$$

KOMENTAR: Uz odgovarajuću pažnju, asinhroni motori koji su predviđeni za mrežu jednog napona i frekvencije mogu se koristiti i u drugačijoj mreži. U ovom slučaju, brzina će biti manja, a izlazna snaga nešto veća.

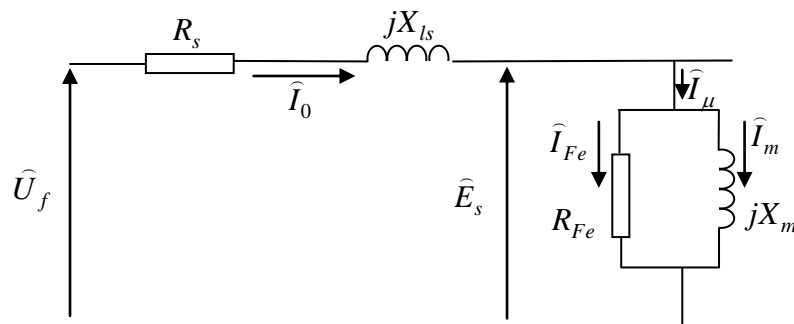
3. Zadatak: Trofazni četvoropoloni asinhroni motor sprege **Y** ispituje se u praznom hodu. Pri naponu $U_n = 380 \text{ V}$, 50 Hz izmerena je struja praznog hoda $I_0 = 1 \text{ A}$ i snaga praznog hoda $P_0 = 100 \text{ W}$. Zatim su pomoću posebne mašine izmereni mehanički gubici od 40 W . Na kraju je motor odspojen od mreže i U - I metodom, jednosmernom strujom, izmeren otpor namotaja jedne faze, $R_s = 2,75 \Omega$. Odrediti parametre grane magnećenja na ekvivalentnoj šemi.

REŠENJE:

Ogled praznog hoda asinhronog motora se obavlja tako što se oslobodi vratilo motora da se obrće bez opterećenja (radi na prazno - prazan hod) i napaja se nominalnim naponom da bi se postigla nominalna pobudjenost mašine. Ovaj ogled, kao i ogled kratkog spoja, izvodi se u cilju određivanja parametara ekvivalentne šeme asinhronne mašine.

Pošto na vratilu ne postoji mehaničko opterećenje, brzina obrtanja je vrlo bliska sinhronoj brzini. Ova mala vrednost klizanja može da se meri pomoću stroboskopa i štoperice. Takođe se mere napon napajanja, struja statora i aktivna snaga. Struja rotora i aktivna komponenta struje statora pokrivaju mehaničke gubitke motora i gubitke u gvoždju, pa su te struje vrlo male. Reaktivna komponenta struje statora služi za magnećenje mašine, a pošto je zazor teško namagnetisati, ona je značajna i tipično iznosi od 70% (za mašine male snage) do 30% (za velike motore).

Vrlo mala struja rotora se može zanemariti $R_r/s \rightarrow \infty$; $I_r \rightarrow 0$, pa se rotorski deo ekvivalentne šeme zanemaruje i dobija ekvivalentna šema u praznom hodu, prikazana na slici 3.1.



Slika 3.1. Ekvivalentna šema asinhronog motora u praznom hodu

- \hat{U}_f - fazni napon na koji je priključen motor ;
- R_s - omski otpor statora ;
- X_{ls} - reaktansa rasipanja statora ;
- R_{Fe} - omski otpor kojim se predstavljaju gubici aktivne snage u gvoždju ;
- X_m - reaktansa magnećenja. Sa \hat{I}_m opisuje reaktivnu snagu potrebnu za magnećenje mašine ;
- \hat{I}_0 - struja statora. Tipična vrednost struje praznog hoda je od 30% do 70% nominalne struje ;
- \hat{I}_μ - struja grane magnećenja ;
- \hat{I}_{Fe} - aktivna komponenta struje magnećenja, koja opisuje gubitke aktivne snage u gvožđu ;
- \hat{I}_m - struja magnećenja magnetnog kola;
- \hat{E}_s - indukovana elektromotorna sila u statorskom namotu.

Parametri sa ekvivalentne šeme u direktnoj grani (R_s i X_{ls}) su mnogo manji nego parametri u poprečnoj grani (R_{Fe} i X_m) tako da se može zanemariti pad napona koji stvara struja praznog hoda na namotaju statora. Zbog toga važi da je u praznom hodu :

$$E_s \approx U_0 \quad (3.1)$$

Na osnovu izmerenih vrednosti može se odrediti faktor snage u praznom hodu :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1} = 0,152 \quad (3.2)$$

Uobičajeno je da se faktor snage praznog hoda $\cos \varphi_0$ kreće u intervalu od 0,1 do 0,2.

Reaktivna komponenta struje praznog hoda je :

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (3.3)$$

Kao što je već rečeno, ovo je struja magnećenja koja obezbeđuje magnetisanje asinhronne mašine. Zbog niskog faktora snage u praznom hodu, struja magnećenja je vrlo bliska po modulu sa strujom praznog hoda, i izračunava se kao :

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 1 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = 1 \cdot \sqrt{1 - 0,152^2} = 0,9884 \text{ A} \quad (3.4)$$

Pošto je motor spregnut u zvezdu (Y), nominalni fazni napon U_{nf} je :

$$U_{nf} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,39 \text{ V} \quad (3.5)$$

Reaktansa magnećenja X_m će biti :

$$X_m = \frac{E_s}{I_m} \approx \frac{U_{nf}}{I_\mu} = \frac{380}{9,9885} = 221,97 \ \Omega \quad (3.6)$$

Sličan postupak se NE MOŽE PRIMENITI za aktivnu komponentu struje, odnosno

$$I_{Fe} \neq I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (3.7)$$

jer aktivna komponenta struje pokriva i mehaničke gubitke, koji nisu obuhvaćeni ekvivalentnom šemom. Struja I_{Fe} kroz otpor R_{Fe} predstavlja samo gubitke u gvoždju statora :

$$P_{Fe} = 3 \cdot R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 \quad (3.8)$$

Sa druge strane, aktivna snaga, koju motor u praznom hodu povlači iz mreže, troši se na Džulove gubitke usled proticanja struje praznog hoda kroz namotaje statora P_{Cu0} , gubitke u gvoždju P_{Fe} i gubitke na trenje i ventilaciju P_{gm} :

$$P_0 = P_{Cu0} + P_{Fe} + P_{gm} \quad (3.9)$$

Džulovi gubici u režimu praznog hoda P_{Cu0} mogu se odrediti uobičajenim izrazom :

$$P_{Cu0} = 3 \cdot R_s \cdot I_0^2 = 3 \cdot 2,75 \cdot 1^2 = 8,25 \text{ W} \quad (3.10)$$

Na osnovu izraza (3.9) dobija se:

$$P_{Fe} = P_0 - P_{Cu0} - P_{gm} = 100 - 8,25 - 40 = 51,75 \text{ W} \quad (3.11)$$

Iz izraza (3.8) dobija se vrednost omskog otpora kojim se predstavljaju gubici aktivne snage u gvoždju, a zatim i vrednost aktivne komponente struje (I_{Fe}) :

$$R_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_{nf}^2}{P_{Fe}} = 3 \cdot \frac{\left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2}{51,75} = 2790,3 \Omega \quad (3.12)$$

$$I_{Fe} = \frac{E}{R_{Fe}} \approx \frac{U_{nf}}{R_{Fe}} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{2637,4} = 0,0786A \quad (3.13)$$

DISKUSIJA: Gubici u gvoždju P_{Fe} postoje praktično samo na statoru a zavise od nivoa magnetne indukcije i od frekvencije struje. Frekvencija rotorske struje je srazmerna klizanju. Pošto je klizanje u nominalnom režimu od 2% do 10%, a u režimu praznog hoda je klizanje približno nula, može se zaključiti da su, u normalnim radnim režimima, gubici u gvoždju asinhronne mašine skocentrisani u statoru:

$$P_{Fe} = P_{Fes} + P_{Fer} \approx P_{Fes} \quad (3.14)$$

Ova snaga se „troši“ na gubitke naizmeničnog/periodičnog magnećenja feromagnetnog jezgra. Ti gubici se javljaju usled histerezisnog ponašanja feromagnetnog materijala i usled vrtložnih struja u magnetnom materijalu.

Kako su, preko magnetne indukcije i frekvencije, gubici u gvoždju povezani sa elektromotornom silom statora E_s , a koja se (zbog relativno malih vrednosti R_s i X_{ls}) vrlo malo menja, može se zaključiti da gubici u gvoždju NE ZAVISE OD OPTEREĆENJA u normalnim režimima rada. To znači da su gubici u gvoždju u režimu praznog hoda približno isti kao i pri nominalnom opterećenju, pod uslovom da je napon napajanja nepromenjen.

DIGRESIJA :

Ogled praznog hoda može se vršiti za nekoliko nivoa napona napajanja, tipično od 80% do 120% od nominalnog, a često i pri nižim naponima . Na taj način se mogu dobiti dve stvari :

1. Analizom zavisnosti $I_0 = f(U_0)$ se dobija kriva koja predstavlja deo krive magnećenja, te se može proceniti da li je mašina malo ili umereno zasićena pri nominalnom naponu napajanja.
2. Sračuna se snaga $(P_0 - P_{Cu0})$ i nacрта kao funkcija od U_0 . Ova snaga se naziva snaga užih gubitaka praznog hoda, a u stvari predstavlja zbir $(P_{Fe} + P_{gm})$. Ekstrapolacijom ove krive ka nultom naponu teoretski bi se mogli razdvojiti mehanički gubici iz ovog zbira. Kako je ovu ekstrapolaciju teško izvesti sa prihvatljivom tačnošću, crta se funkcija $(P_0 - P_{Cu0}) = f(U_0^2)$. Pod uslovom da je magnetno kolo nezasićeno, ova funkcija predstavlja pravu, čijom se ekstrapolacijom do nultog napona dobija iznos mehaničkih gubitaka. Ovo se naziva Rihterova metoda razdvajanja gubitaka kod asinhronih motora.

4. Zadatak: Trofazni asinhroni motor sa kaveznim rotorom ima podatke: 4 kW, 380 V, 50 Hz, 9 A, 1440 o/min, $v = M_{pr} / M_n = 3$. Motor pokreće dizalicu čiji je moment konstantan i jednak 80 % nazivnog momenta motora. Podešavanje brzine obrtanja vrši se promenom učestanosti uz uslov $U / f = \text{const}$. Koristeći Klosovu jednačinu odrediti brzinu obrtanja ako je učestanost napona napajanja 35 Hz.

REŠENJE:

Karakteristika momenta dizalice u zadatku je:

$$M_{opt} = 0,8 \cdot M_n = \text{konst.} \quad (4.1)$$

Klosova jednačina je:

$$\frac{M}{M_{pr}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{ps}} + \frac{s_{pr}}{s}} \quad (4.2)$$

pri tome je u stacionarnom pogonu $M = M_{opt}$. Klosova jednačina pokazuje da statička karakteristika momenta zavisi samo od prevalnog momenta M_{pr} i prevalnog klizanja s_{pr} . Sređivanjem Klosove jednačine (4.2) dobija se kvadratna jednačina:

$$s^2 - 2 \cdot \frac{M_{pr}}{M_{ob}} s \cdot s_{pr} + s_{pr}^2 = 0 \quad (4.3)$$

Odnos M_{pr} / M je preopteretivost v , pa je kvadratna jednačina:

$$s^2 - 2v \cdot s \cdot s_{pr} + s_{pr}^2 = 0 \quad (4.4)$$

Ako je poznat prevalni moment M_{pr} , razvijeni moment M i klizanje s kod tog momenta rešavanjem kvadratne jednačine (4.4) dobijaju se sledeća rešenja:

$$s_{pr1,2} = s \cdot \left(v \pm \sqrt{v^2 - 1} \right) \quad (4.5)$$

od kojih je samo jedno pravo. Ako je poznato prevalno klizanje s_{pr} klizanje s je:

$$s_{1,2} = s_{pr} \cdot \left(v \pm \sqrt{v^2 - 1} \right) \quad (4.6)$$

Ako je $M_{pr} = M_{prn}$ i $M = M_n$ tada je $s_{pr} = s_{prn}$ i $s = s_n$, v je tada nazivni koeficijent preopteretljivosti. Na osnovu datih podataka o motoru mogu se odrediti M_{pr} i s_{pr} u nominalnom režimu. Nominalni i prevalni moment motora iznose:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\frac{2\pi}{60} \cdot n_n} = \frac{4000}{\frac{2\pi}{60} \cdot 1440} = 26,5 \text{ Nm} \quad (4.7)$$

$$M_{pr} = v \cdot M_n = 3 \cdot 26,5 = 79,5 \text{ Nm} \quad (4.8)$$

Nominalno i prevalno klizanje iznose:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04 = 4 \% \quad (4.9)$$

$$s_{pr} = s_n \cdot \left(\nu + \sqrt{\nu^2 - 1} \right) = 0,04 \cdot \left(3 + \sqrt{3^2 - 1} \right) = 0,233 = 23,3\% \quad (4.10)$$

Povećanje frekvencije - uz konstantan napon napajanja - dovodi do sniženja glavnog (zajedničkog) fluksa u mašini, odnosno smanjenja polaznog i prevalnog momenta. Ako se pak smanji frekvencija, glavni fluks raste, a sa njim i prevalni i polazni moment motora. Ustvari, povećanjem frekvencije dobija se ista situacija kao kad bi se statorski napon snizio ispod nazivnog, i obrnuto, smanjenjem frekvencije dobija se ista situacija kao pri povišenom naponu. Kada je napon snižen ispod nominalnog dolazi do preopterećenja motora, a kada je povišen iznad nominalnog raste struja magnetisanja (motor ulazi u zasićenje, pa struja praznog hoda može uzeti veće vrednosti od nominalne). U oba slučaja dolazi do pregrevanja motora.

Regulisanje brzine obrtanja motora promenom frekvencije naziva se U/f upravljanje (skalarno upravljanje). Pri smanjivanju brzine ($n < n_n$), da ne bi došlo do povećanja toplotnih gubitaka (zbog ulaska magnetnog kola u zasićenje), zajedno sa smanjenjem frekvencije smanjuje se i statorski napon i to toliko da bude ispunjen uslov:

$$U_s / f_s = \text{const.}, \quad f_s > f_{sn} \quad (4.11)$$

Tada je, naime, fluks u vazдушnom zazoru jednak nominalnom. Kod povećanja brzine ($n > n_n$) ne ide se, uz povećanje frekvencije, sa povećanjem napona zbog izolacije namotaja; tada je:

$$U_s = U_{sn}, \quad f_s < f_{sn} \quad (4.12)$$

Prema tome kod U/f - upravljanja postoje dve oblasti rada:

1. Bazna oblast: $n \in [0, n_n]$, kada je $\Phi_q = \Phi_n = \text{const.}$ i
2. Oblast slabljenja polja: $n > n_n$.

Kad se zanemari statorski omski otpor R_s izraz za obrtni moment je:

$$M = \frac{q_s}{\omega_s} \cdot U_{sf}^2 \cdot \frac{R_r' / s}{\left(\frac{R_r'}{s} \right)^2 + X_k^2} \quad (4.13)$$

gde je $X_k = X_{\gamma s} + X_{\gamma r}'$ reaktansa kratkog spoja. Prevalno klizanje iznosi:

$$s_{pr} = \pm \frac{R_r'}{X_k} = \pm \frac{R_r'}{X_{\gamma s} + X_{\gamma r}'} = \pm \frac{R_r'}{2\pi \cdot f_s (L_{\gamma s} + L_{\gamma r}')} \quad (4.14)$$

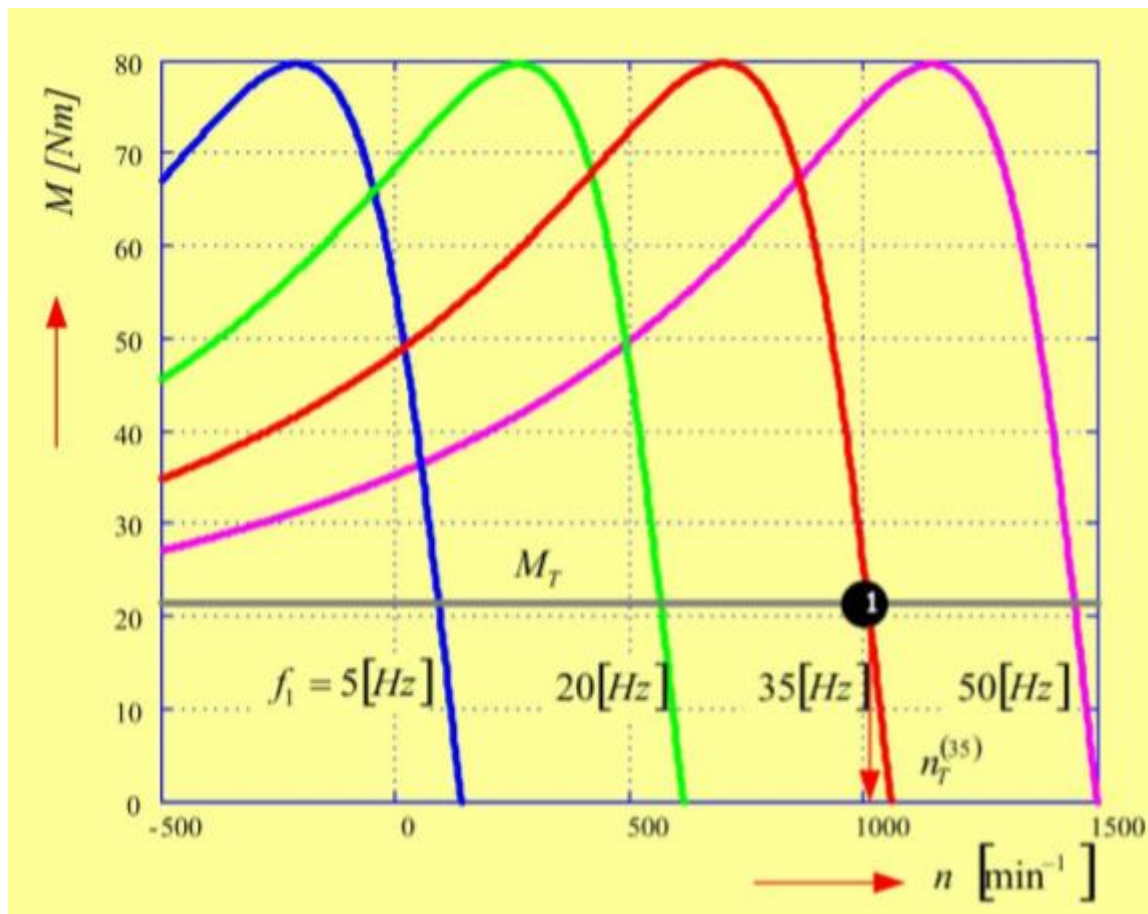
Vidi se da se prevalno klizanje s_{pr} menja obrnuto proporcionalno sa frekvencijom f_s . Uvrstivši (4.14) u (4.13) dobija se prevalni moment u motorskoj oblasti:

$$M_{pr} = \frac{q_s}{2\pi \cdot f_s} \cdot U_{sf}^2 \cdot \frac{R_r' / s_{pr}}{\left(\frac{R_r'}{s_{pr}} \right)^2 + X_k^2} = \frac{q_s}{4\pi \cdot f_s} \cdot U_{sf}^2 \cdot \frac{1}{X_k} \quad (4.15)$$

odnosno:

$$M_{pr} = \frac{p \cdot q_s}{8\pi^2} \cdot \left(\frac{U_{sf}}{f_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{\gamma s} + L_{\gamma r}'} \quad (4.16)$$

Iz izraza (4.16) vidi se da je, kod smanjenja frekvencije, prevalni moment M_{pr} konstantan sve dok je $U/f = \text{const}$. Na slici 4.1 je prikazana familija karakteristika momenta motora pri različitim frekvencijama (nižih od nazivne vrednosti).



Slika 4.1: Familija statičkih karakteristika momenta motora za različite frekvencije

U stvarnom slučaju, kada statorski otpori nisu zanemareni, M_{pr} se nešto smanjuje sa smanjenjem frekvencije.

Ovde motor radi u baznoj oblasti, pa je $M_{pr} = M_{pm} = \text{const}$. Klizanje s_l kod frekvencije $f_{s1} = 35$ Hz se jednostavno nalazi iz (4.6) ako se zna prevalno klizanje s_{pr1} pri toj frekvenciji. Prevalno klizanje pri frekvenciji 35 Hz, na osnovu (4.14), iznosi:

$$s_{pr} = \frac{f_{sn}}{f_{s1}} s_{prm} = \frac{50}{35} \cdot 0,233 = 0,333 \quad (4.17)$$

Preopteretljivost motora u ovom slučaju je:

$$v = \frac{M_{pm}}{0,8 \cdot M_n} = \frac{v_n}{0,8} = \frac{3}{0,8} = 3,75 \quad (4.18)$$

pa je prema (4.6):

$$s_{1,2} = 0,333 \cdot \left(3,75 \pm \sqrt{3,75^2 - 1} \right) \quad (4.19)$$

$$s_{1,1} = 2,45 \quad s_{1,2} = 0,045 \quad (4.20)$$

Klizanje iznosi $s_l = 0,045$. Brzina obrtnog polja pri frekvenciji 35 Hz je:

$$n_{s1} = \frac{60f_{s1}}{p} = \frac{60 \cdot 35}{2} = 1050 \text{ o/min} \quad (4.21)$$

Brzina obrtanja rotora pri frekvenciji 35 Hz iznosi:

$$n_1 = (1 - s_1) \cdot n_{s1} = (1 - 0,045) \cdot 1050 = 1002,75 \text{ o/min} \quad (4.22)$$

Uočava se da je ostvarena značajna promena brzine obrtanja uz malu promenu klizanja, što metod regulacije promenom frekvencije napona napajanja čini ekonomičnim. Ovaj metod regulacije je danas dominantan u primeni.

Ovde je još interesantno uporediti apsolutne vrednosti klizanja (razlika sinhronne brzine i rotorske brzine obrtanja) za nominalnu vrednost frekvencije napajanja i nižu vrednost frekvencije uz uslov $U/f = \text{const}$. Lako se može pokazati da vrednost apsolutnog klizanja pri istom momentu opterećenja ostaje približno ista.

Klizanje pri datom teretu i nominalnoj frekvenciji napajanja $f_{sn} = 50$ Hz iznosi:

$$s_{1,2n} = 0,233 \cdot \left(3,75 \pm \sqrt{3,75^2 - 1} \right) = 0,316 = 3,16\% \quad (4.23)$$

pa je tada apsolutno klizanje:

$$\Delta n_{1n} = s_{1n} n_{sn} = s_{1n} \frac{60f_{sn}}{p} = 0,316 \cdot \frac{60 \cdot 50}{2} = 47,46 \text{ o/min} \quad (4.24)$$

Dok je vrednost apsolutnog klizanja pri istom teretu i frekvenciji napajanja $f_{s1} = 35$ Hz:

$$\Delta n_1 = n_{s1} - n_1 = 1500 - 1002,75 = 47,25 \text{ o/min} \quad (4.25)$$

5. Zadatak: Trofazni asinhroni kavezni motor pokreće radnu mašinu, koja ima moment kvadratno zavisian od brzine i radi u nazivnom režimu. Ako se regulacija brzine obrtanja vrši promenom napona napajanja, šta treba uraditi da bi se brzina podesila na 150 rad/s ?

Podaci o motoru: 230 V , 60 Hz , 183 rad/s , $2p = 4$, sprega Y, $R_s = 0,227 \ \Omega$, $R'_r = 0,4 \ \Omega$, $X_{\gamma s} = 0,512 \ \Omega$, $X'_{\gamma r} = 0,769 \ \Omega$, $X_\mu = 9,86 \ \Omega$

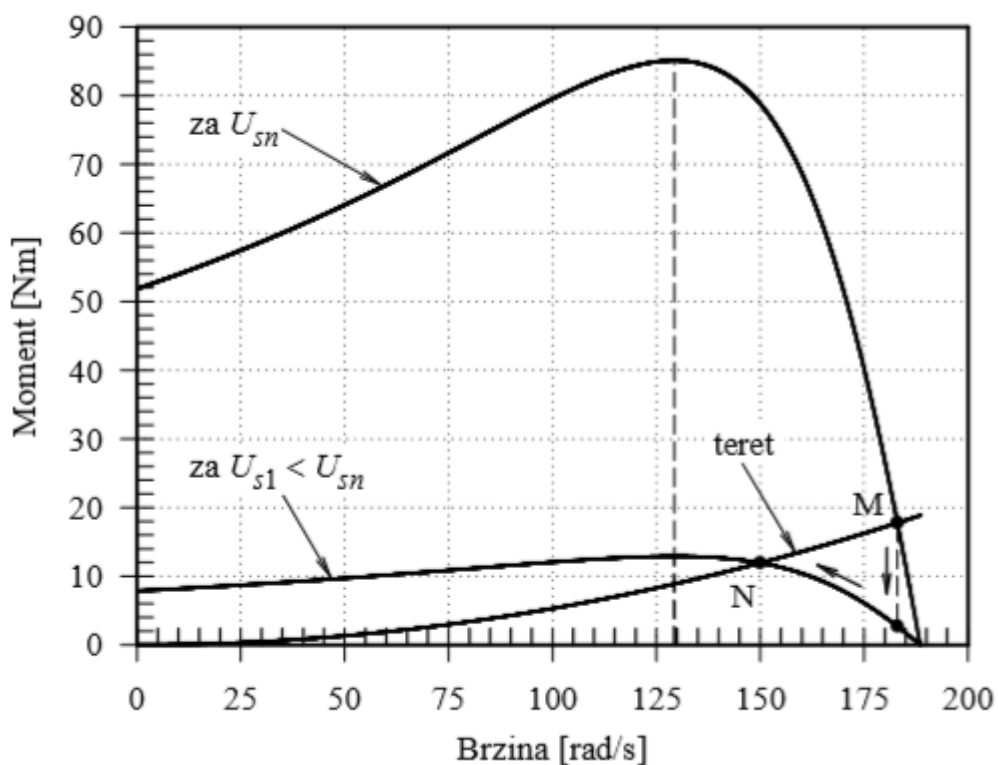
REŠENJE:

U stacionarnom pogonu obrtni moment koji razvija motor M jednak je momentu radne mašine M_{opt} . Motor se tada obrće konstantnom brzinom. Moment koji razvija asinhroni motor direktno je proporcionalan naponu na kvadrat:

$$M = \frac{q_s}{\omega_s} \cdot U_{sf}^2 \cdot \frac{R'_r/s}{\left(R_s + \sigma \cdot \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\gamma s} + \sigma \cdot X'_{\gamma r}\right)^2} \quad (5.1)$$

Kada se opterećenom motoru smanji napon smanji se i obrtni moment, prema (5.1), što prouzrokuje razliku momenata $\Delta M = M - M_{opt} < 0$, koja usporava rotor (povećeva klizanje) sve dok se obrtni moment ne izjednači sa momentom opterećenja, tj. dok se ne dostigne novo ravnotežno stanje. Dakle, ako se spusti napon napajanja motora brzina obrtanja mora pasti.

Na slici 5.1 prikazana je karakteristika momenta asinhronog motora pri nominalnom i sniženom naponu i karakteristika momenta radne mašine (opterećenja). Nakon sniženja napona motor prelazi iz nominalne radne tačke M u novu radnu tačku N u kojoj karakteristika momenta opterećenja seče karakteristiku momenta motora pri sniženom naponu.



Slika 5.1: Regulacija brzine obrtanja asinhronog motora promenom napona napajanja

Koordinate nominalne radne tačke M su: (ω_n, M_n) . Nominalna brzina je data i iznosi:

$$\omega_n = 183 \text{ rad/s} \quad (5.2)$$

Nominalni moment je:

$$M_n = \frac{q_s}{\omega_s} \cdot U_{sf}^2 \cdot \frac{R_r' / s_n}{\left(R_s + \sigma \cdot \frac{R_r'}{s_n} \right)^2 + \left(X_s + \sigma \cdot X_r' \right)^2} \quad (5.3)$$

Pri tome je sinhrona brzina obrtanja:

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{2\pi \cdot 60}{2} \approx 188,5 \text{ rad/s} \quad (5.4)$$

Nominalno klizanje iznosi:

$$s_n = \frac{\omega_s - \omega_n}{\omega_s} = \frac{\frac{2\pi \cdot 60}{2} - 183}{\frac{2\pi \cdot 60}{2}} = 0,0291 = 2,91\% \quad (5.5)$$

Koeficijent rasipanja je:

$$\sigma = 1 + \frac{X_{rs}}{X_m} = 1 + \frac{0,512}{9,86} = 1,052 \quad (5.6)$$

Dakle nominalni moment motora iznosi:

$$M_n = \frac{3}{\frac{2\pi \cdot 60}{2}} \cdot \left(\frac{230}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{0,4/0,0291}{\left(0,227 + 1,052 \cdot \frac{0,4}{0,0291} \right)^2 + \left(0,512 + 1,052 \cdot 0,769 \right)^2} = 17,7 \text{ Nm} \quad (5.7)$$

Koordinate radne tačke N su: (ω_1, M_1) , gde je tražena brzina obrtanja $n_1 = 150 \text{ rad/s}$, a $M_1 = M_{opt}$. Moment opterećenja, po uslovu zadatka, zavisi od brzine obrtanja na kvadrat:

$$M_{opt} = c \cdot \omega^2 \quad (5.8)$$

Budući da u stacionarnom pogonu važi $M = M_{opt}$, to znači da je u nazivnom režimu:

$$M_{opt} = M_n = c \cdot \omega_n^2 \quad (5.9)$$

Pri traženoj brzini moment opterećenja iznosi:

$$M_{opt1} = c \cdot \omega_1^2 \quad (5.10)$$

Deljenjem jednačina (5.9) i (5.10) dobija se:

$$\frac{M_n}{M_{opt1}} = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^2 \quad (5.11)$$

odakle sledi iznos momenta opterećenja kod tražene brzine:

$$M'_{opt} = M_n \left(\frac{\omega'}{\omega_n} \right)^2 = 17,7 \cdot \left(\frac{150}{183} \right)^2 = 11,9 \text{ Nm} \quad (5.12)$$

U stacionarnom režimu motor treba da obezbedi taj moment. Tražena brzina iznosi 150 rad/s, pa je klizanje u tački N:

$$s_1 = \frac{\omega_s - \omega_1}{\omega_s} = \frac{\frac{2\pi \cdot 60}{2} - 150}{\frac{2\pi \cdot 60}{2}} = 0,204 = 20,4\% \quad (5.13)$$

Moment kojeg motor treba da razvija pri toj brzini (u novom ravnotežnom stanju) je:

$$M_1 = M_{opt} = \frac{q_s}{\omega_s} \cdot U_{sf}^2 \cdot \frac{R'_r/s_1}{\left(R_s + \sigma \cdot \frac{R'_r}{s_1} \right)^2 + \left(X_{js} + \sigma \cdot X'_{jr} \right)^2} \quad (5.14)$$

U prethodnom izrazu jedina je nepoznata veličina traženi napon napajanja i iznosi:

$$U_{sf} = \sqrt{\frac{M_{opt} \cdot \omega_s}{q_s} \cdot \frac{\left(R_s + \sigma \cdot \frac{R'_r}{s_1} \right)^2 + \left(X_{js} + \sigma \cdot X'_{jr} \right)^2}{R'_r/s_1}} =$$

$$U_{sf} = \sqrt{\frac{11,9 \cdot \frac{2\pi \cdot 60}{2}}{3} \cdot \frac{\left(0,227 + 1,052 \cdot \frac{0,4}{0,204} \right)^2 + (0,512 + 1,052 \cdot 0,769)^2}{0,4/0,204}} = 51,6 \text{ V} \quad (5.15)$$

Vrednost linijskog napona koji treba dovesti na motor je:

$$U_s = \sqrt{3} \cdot U_{sf} = \sqrt{3} \cdot 51,6 = 89,4 \text{ V} \quad (5.16)$$

Statorski napon se snižava pomoću tiristorskog regulatora. Prednost ovakvog načina regulisanja brzine jeste u jednostavnosti i niskoj ceni. Mana je što dolazi do pregrevanja motora usled povećanja klizanja, te se ovaj način regulacije brzine ne može primentiti na većim motorima. Smanjenje brzine obrtanja se vrši samo u uskom opsegu brzina, maksimalno do prevalnog klizanja.

6. Zadatak: Trofazni asinhroni motor sa namotanim rotorom sa podacima: 380 V; sprega Y; nazivna brzina obrtanja 1400 o/min; nazivna učestanost $f_s = 50$ Hz; induktivnosti rasipanja statora i rotora $L_{\gamma s} = L'_{\gamma r} = 8,8$ mH; induktivnost magnećenja $L_{m \rightarrow \infty}$ mH; otpornost statora $R_s \approx 0$ Ω ; otpornost rotora svedena na stator $R'_r = 2,5$ Ω ; pušta se u rad pomoću rotorskog otpornika. Koeficijent transformacije ovog kliznokolutnog motora iznosi 4.

Odrediti:

- Vrednost otpora koji treba uključiti u rotor da se ostvari polazak sa najvećim mogućim polaznim momentom.
- Vrednost otpora za koji se dobija najveći moment pri brzini od 600 o/min.
- Vrednost najveće brzine pri kojoj se može postići najveći mogući moment motora.
- Vrednost statorske struje u slučajevima a), b) i c)? Koliki je najveći moment motora?

REŠENJE:

a.) Najveći moment motora je prevalni moment $M_{max} = M_{pr}$. Da bi se ostvario uslov zadatka u rotorsko kolo treba dodati otpor R'_{da} , tako da prevalno klizanje bude jednako klizanju pri polasku $s_{pol} = 1$, odnosno da važi:

$$s_{pr} = \frac{R'_r + R'_{da}}{\omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L'_{\gamma r})} = s_{pol} = 1 \Rightarrow R'_{da} = \omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L'_{\gamma r}) - R'_r \quad (6.1)$$

$$R'_{da} = 2\pi \cdot 50 \cdot (0,0088 + 0,0088) - 2,5 = 3,03 \Omega \quad (6.2)$$

$$R_{da} = \frac{1}{m^2} \cdot R'_{da} = \frac{1}{4^2} \cdot 3,03 = 0,19 \Omega \quad (6.3)$$

b.) Vrednost dodatnog otpora treba smanjiti na vrednost pri kojoj je prevalno klizanje jednako klizanju pri traženoj brzini obrtanja od $n_b = 600$ min⁻¹ (po uslovu zadatka):

$$s_b = \frac{n_s - n_b}{n_s} = \frac{1500 - 600}{1500} = \frac{900}{1500} = \frac{3}{5} = 0,6 \quad (6.4)$$

$$s_{pr} = \frac{R'_r + R'_{db}}{\omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L'_{\gamma r})} = s_b = 0,6 \Rightarrow R'_{db} = s_b \cdot \omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L'_{\gamma r}) - R'_r \quad (6.5)$$

$$R'_{db} = 0,6 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot (0,0088 + 0,0088) - 2,5 = 0,82 \Omega \quad (6.6)$$

$$R_{db} = \frac{1}{m^2} \cdot R'_{db} = \frac{1}{4^2} \cdot 0,82 = 0,05 \Omega \quad (6.7)$$

c.) Najveća brzina sa prevalnim momentom je brzina koja odgovara ovom momentu na prirodnoj karakteristici motora, a to je brzina:

$$s_{pr} = \frac{R_r'}{\omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L_{\gamma r}')} = \frac{2,5}{2\pi \cdot 50 \cdot (0,0088 + 0,0088)} = 0,452 \quad (6.8)$$

$$n_{pr}(1 - s_{pr}) \cdot n_s = (1 - 0,452) \cdot 1500 = 822 \text{ o/min} \quad (6.9)$$

Za brzine motora veće od ove ne može se dobiti vrednost momenta jednak prevalnom (maksimalni moment) jer je za ovu brzinu motora vrednost otpora u kolu rotora minimalna i jednaka otporu rotorskog namotaja (vrednost dodatnog otpora je nula).

d.) U opštem slučaju važi, pošto su za vrednost prevalnog klizanja, vrednosti ukupnih omskih i induktivnih otpora iste:

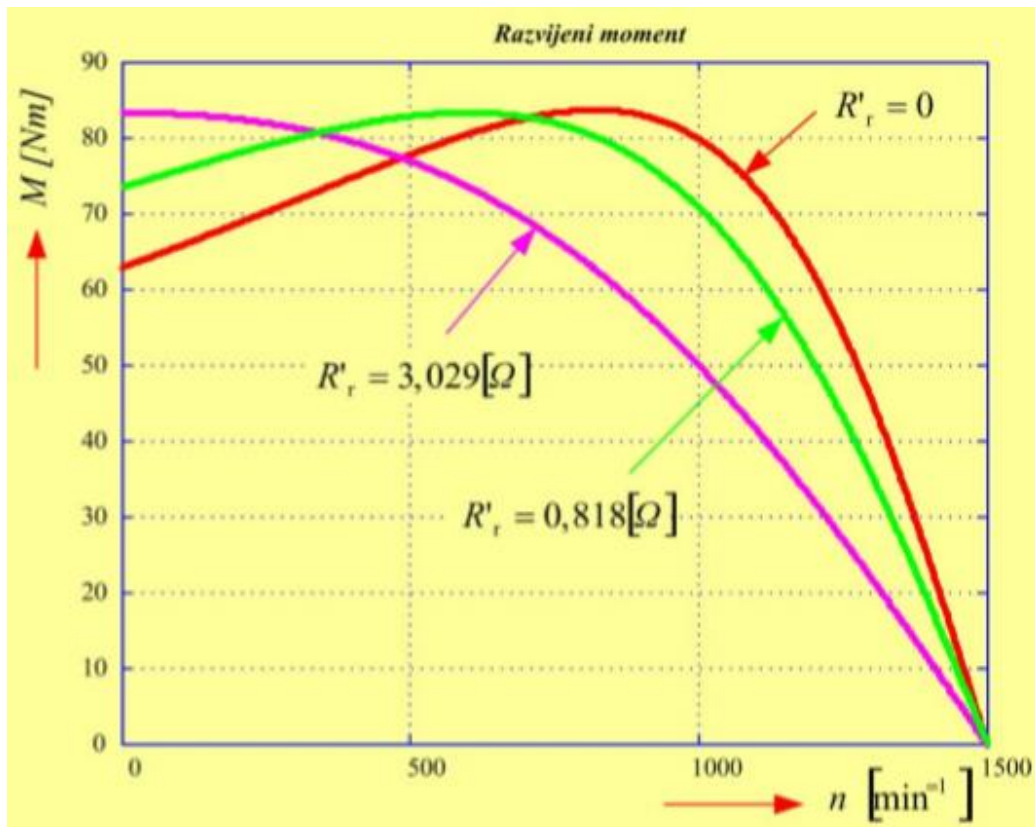
$$\begin{aligned} I_{si} = I_{sfi} &= \frac{U_{sf}}{\sqrt{\left(\frac{R_r' + R_{di}'}{s_i}\right)^2 + \omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L_{\gamma r}')^2}} = \frac{U_{sf}}{\omega_s \cdot (L_{\gamma s} + L_{\gamma r}') \cdot \sqrt{2}} = \\ &= \frac{380/\sqrt{3}}{2\pi \cdot 50 \cdot (0,0088 + 0,0088) \cdot \sqrt{2}} = 28,06 \text{ A} \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$i = a, b, c$$

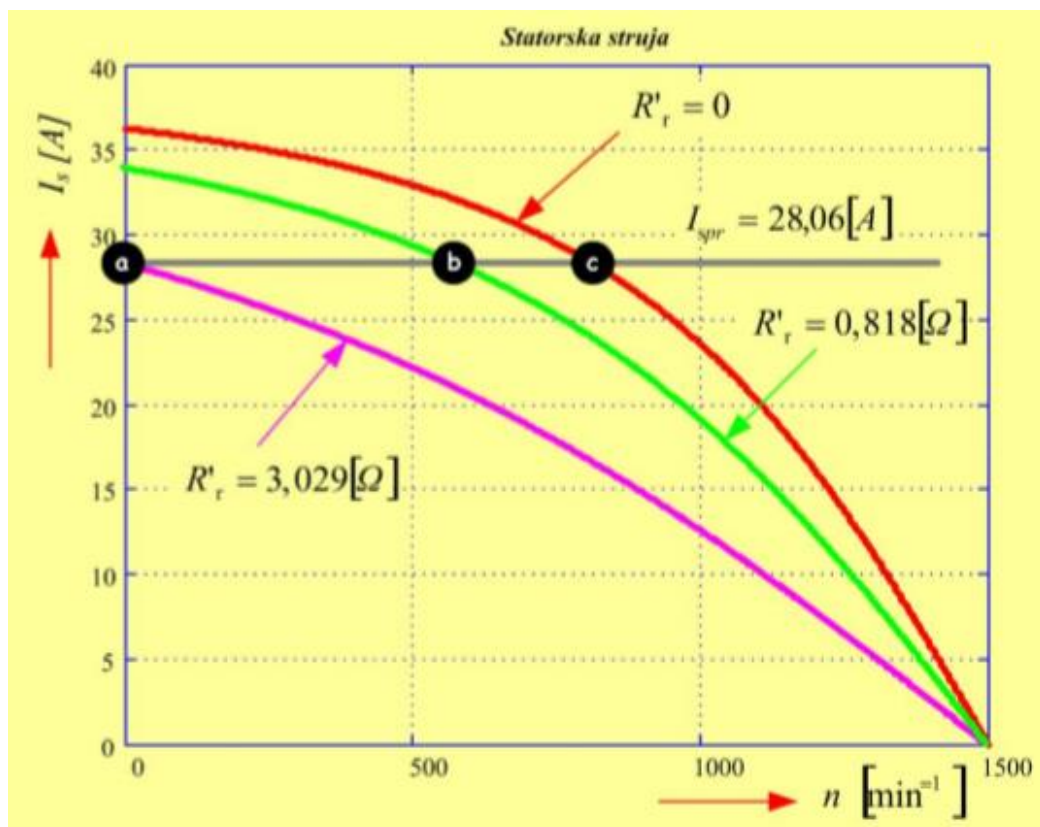
Vrednost maksimalnog, prevalnog momenta iznosi:

$$\begin{aligned} M_{pr} &= \frac{3 \cdot \frac{R_r'}{s_{pr}} \cdot I_r'^2(s = s_{pr})}{\omega_s} = 3 \cdot p \cdot \left(\frac{U_{sf}}{\omega_s}\right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot (L_{\gamma s} + L_{\gamma r}')^2} = \\ &= 3 \cdot 2 \cdot \left(\frac{380/\sqrt{3}}{2\pi \cdot 50}\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,0088 + 0,0088)} = 83,13 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Razvijeni moment i statorska struja motora u zavisnosti od klizanja i za različite vrednosti otpora u kolu rotora u zadatku, prikazani su na slikama 6.1 i 6.2.



Slika 6.1: Mehanička karakteristika motora za razne vrednosti otpora u kolu rotora



Slika 6.2: Struja motora u zavisnosti od klizanja za razne vrednosti dodatnog otpora u kolu rotora. Struja pri prevalnim klizanjima za razne vrednosti dodatnog rotorskog otpornika ne menja vrednost.

Zadaci za vežbanje

7. Zadatak: Trofazni kavezni asinhroni motor sprege Δ , za $U_n = 380\text{ V}$, pogoni ventilator i pušta se u rad pomoću ručnog prebacivača zvezda-trougao.

- Odrediti polaznu struju i polazni moment u sprezi zvezda.
- Moment ventilatora je takav da se zalet u sprezi zvezda obavi do brzine od 1395 o/min . Izračunati moment pri toj brzini. Zatim izračunati koliki će biti konačna brzina i moment ventilatora nakon prebacivanja u spregu Δ .
- Odrediti polaznu struju i polazni moment koji bi se razvili pri polasku u sprezi Δ .

Podaci o motoru: $R_s = 1,2\ \Omega$, $R_r = 1,3\ \Omega$, $X_{ls} = X_{lr} = 3\ \Omega$. Zanemariti magnećenje, P_{Fe} i P_{meh} .

8. Zadatak: Asinhroni motor iz trećeg zadatka ispituje se u kratkom spoju. Kada je priključen na napon $U_k = 100\text{ V}$, izmereni su struja $I_k = 4\text{ A}$ i snaga $P_k = 240\text{ W}$. Odrediti parametre ekvivalentne šeme i polazni moment, kao i polazni moment pri nominalnom naponu.

9. Zadatak: Trofazni asinhroni motor sa kaveznim rotorom ima podatke: 4 kW , 380 V , 9 A , 1440 o/min , 50 Hz , $v = M_{max} / M_n = 2,5$. Motor pokreće dizalicu čiji je moment stalan i iznosi 50% nazivnog momenta motora. U cilju podešavanja brzine moguća je kontinualna promena učestanosti uz uslov $U / f = \text{const}$. Koristeći Klosovu jednačinu odrediti brzinu ako je učestanost napona 70 Hz .

10. Zadatak: Trofazni kavezni asinhroni motor $4,4\text{ kW}$, 380 V , $8,9\text{ A}$, 50 Hz , 1465 o/min , sprega Y, ima sledeće parametre ekvivalentne šeme $X_{\gamma s} = X_{\gamma r}' = 3\ \Omega$, $R_s = 1\ \Omega$. Gubici u gvožđu i mehanički gubici se mogu zanemariti. Odrediti da li ovaj motor može startovati pri nominalnom momentu opterećenja ako napon napajanja padne za 15% .

11. Zadatak: Trofazni asinhroni motor sa namotanim rotorom sa podacima: fazni napon 220 V ; nazivna brzina obrtanja 1400 o/min ; induktivnosti rasipanja $L_{\gamma s} = L_{\gamma r}' = 8,8\text{ mH}$; zajednička induktivnost $L_m \rightarrow \infty\text{ mH}$; otpornost statora $R_s \approx 0\ \Omega$; otpornost rotora svedena na stator $R_r' = 2,5\ \Omega$; nazivna učestanost $f_s = 50\text{ Hz}$, pušta se u rad pomoću rotorskog otpornika koji se može kontinualno menjati.

Odrediti:

- Zavisnost vrednosti dodatnog otpora od brzine tako da se u toku polaska održava stalni i maksimalni moment.
- Izvesti zavisnost struje statora od brzine ako se polazak ostvaruje prema a).
- Nacrtati dijagrame promene dodatnog otpora i struje statora u funkciji brzine, do brzine stacionarnog stanja kod opisanog načina polaska.