

4. ASINHRONSKI STROJI

NALOGA 4.1:

Asinhronski motor z drsnimi obroči ima naslednje podatke: $P_n = 4.0 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $n_n = 2890 \text{ vrt/min}$, $I_{1n} = 9.2 \text{ A}$, $\cos\varphi_{1n} = 0.82$, $I_{2n} = 14.5 \text{ A}$, $E_{20} = 165 \text{ V}$, $M_{om}/M_n = 3.9$.

- a) Kakšna je fazna upornost rotorskih navitij R_2 ?
- b) Pri kateri vrtljni hitrosti ima ta motor s kratkosklenjenimi drsnimi obroči (ni dodatnih zunanjih upornosti v rotorskem tokokrogu) največji vrtljni moment, če je priključen na 380 V, 50 Hz in pri kateri na omrežju 460 V, 60 Hz?
- c) Kako velik je zagonski moment pri kratkosklenjenih drsnih obročih na omrežju 380 V, 50 Hz ter s kakšnimi dodatnimi upori v rotorskem tokokrogu dosežemo, da bo motor na omrežju napetosti 380 V, 50 Hz potegnil z maksimalnim možnim vrtlnim momentom in kakšen je ta moment?

- a) Pri motorju z drsnimi obroči je rotorski tok I_2 :

$$I_2 = \frac{E_{2f}}{Z_2} = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}}$$

E_{2f} fazna inducirana napetost rotorskega navitja

E_{20} napetost pri odprtih sponkah zavrtega rotorja

Ker ima v stabilnem področju obremenilne karakteristike slip s majhne vrednosti (med 0.01÷0.1), sledi $sX_2 \ll R_2$ in izraz za rotorski tok lahko poenostavimo v obliko:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot R_2} \quad (R_2 \text{ in } X_2 \text{ sta fazni veličini}),$$

in rotorska upornost je:

$$R_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_2}.$$

Za nazivno obratovalno stanje poznamo I_{2n} in slip pri nazivni obremenitvi:

$$s_n = \frac{f_2}{f_1} = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2890}{3000} = 0.03667,$$

$$R_2 = \frac{s_n \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}} = \frac{0.03667 \cdot 165}{\sqrt{3} \cdot 14.5} = \underline{\underline{0.24 \Omega}}.$$

b) Vrtilno hitrost, pri kateri ima AM maksimalni (omahni) vrtljni moment izračunamo preko omahnega slipa s_{om} ozziroma Klossove enačbe:

$$\frac{M_n}{M_{om}} = \frac{2}{\frac{s_n}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s_n}} = \frac{1}{3.9}; \quad \frac{M_n}{M_{om}} = a; \quad \frac{s_{om}}{s_n} = x;$$

$$x^2 - \frac{2}{a} \cdot x + 1 = 0,$$

$$x = \frac{1}{a} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 - 1},$$

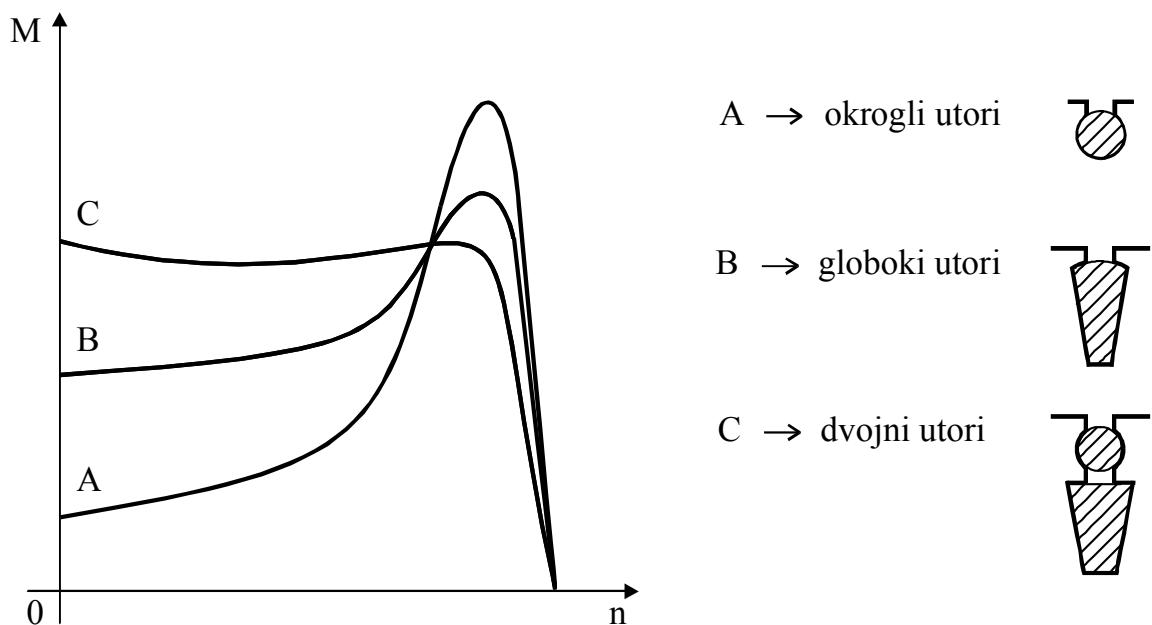
Glede na obliko zunanje (momentne) karakteristike $M = f(n)$ je fizikalno pravilna rešitev kvadratne enačbe večja vrednost x , ker je $s_{om} > s_n$.

$$x = 3.9 + \sqrt{3.9^2 - 1} = 7.67,$$

$$s_{om} = x \cdot s_n = 7.67 \cdot s_n = 7.67 \cdot 0.03667 = 0.281,$$

$$s_{om} = \frac{R_2}{X_2} \Rightarrow X_2 = \frac{R_2}{s_{om}} = \frac{0.24}{0.281} = \underline{\underline{0.86 \Omega}},$$

Vrednost omahnega slipa s_{om} je odvisna od razmerja ohmske in induktivne upornosti rotorkrega navitja, torej od konstrukcije rotorja. Predvsem je pomembna oblika rotorskih utorov, ki vpliva na stresano induktivnost rotorja:



Sl. 4.1: Vpliv oblike rotorskega utora na potek zunanje karakteristike

Vrtilna hitrost, pri kateri ima AM s kratkosklenjenimi drsnimi obroči omahni vrtilni moment, je:

$$s_{om} = \frac{n_s - n_{om}}{n_s} \Rightarrow n_{om} = n_s \cdot (1 - s_{om}) = 3000 \cdot (1 - 0.281) = \underline{\underline{2160 \text{ vrt/min}}}.$$

Pri zvišani frekvenci 60 Hz se spremeni sinhronska vrtilna hitrost n'_s ter rotorska induktivnost X'_2 , s tem pa tudi omahni slip s'_{om} oziroma vrtilna hitrost pri omahnem vrtilnem momentu.

$$n'_s = \frac{60 \cdot f'_1}{p} = \frac{60 \cdot 60}{1} = 3600 \text{ vrt/min},$$

$$X_2 = \omega_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 \Rightarrow X'_2 = \frac{f'_1}{f_1} \cdot X_2 = \frac{60}{50} \cdot 0.86 = 1.03 \Omega,$$

$$s'_{om} = \frac{R_2}{X'_2} = \frac{0.24}{1.03} = 0.23,$$

$$n'_{om} = n'_s \cdot (1 - s'_{om}) = 3600 \cdot (1 - 0.23) = \underline{\underline{2760 \text{ vrt/min}}}.$$

- c) Zagonski vrtilni moment M_z pri nazivnem omrežju (380 V, 50 Hz) izračunamo iz Klossove enačbe (zagonski slip $s_z = 1$).

$$\frac{M_z}{M_{om}} = \frac{2}{\frac{s_z}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s_z}} = \frac{2}{\frac{1}{0.281} + \frac{0.281}{1}} = 0.52,$$

$$M_z = 0.52 \cdot M_{om} = 0.52 \cdot 3.9 \cdot M_n = 2.03 \cdot M_n = 26.8 \text{ Nm},$$

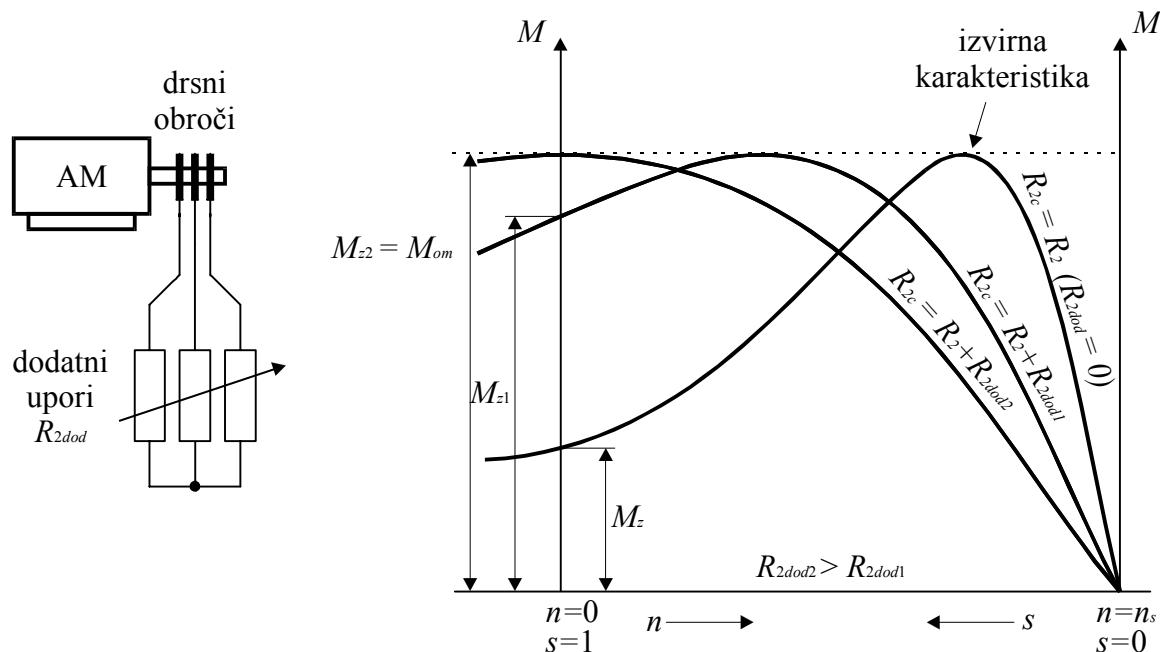
$$M_{om} = 3.9 \cdot M_n = 59.5 \text{ Nm},$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 60}{2\pi \cdot 2890} = 13.2 \text{ Nm}.$$

Iz diagrama vidimo, da je za dosego maksimalnega (omahnega) vrtilnega momenta ob zagonu ($n = 0$) potrebno v rotorski tokokrog vključiti dodatno upornost R_{2dod} , ki spremeni naklon stabilnega področja zunanje karakteristike AM (karakteristika vrtilnega momenta M od vrtilne hitrosti n). Omahni slip je v tem primeru $s_{om} = s_z = 1$! Celotno upornost rotorskega navitja R_{2c} določimo iz omahnega slipa:

$$M_z = M_{om} ; \quad s_{om} = 1 = \frac{R_{2c}}{X_2} \Rightarrow R_{2c} = X_2 = R_2 + R_{2dod} = \underline{\underline{0.86 \Omega}}$$

$$R_{2dod} = R_{2c} - R_2 = 0.86 - 0.24 = \underline{\underline{0.62 \Omega}}$$



Vrtilni moment na gredi AM je proporcionalen kvadratu statorske napajalne napetosti U_1 . Vrednost zagonskega momenta M'_z ob zagonu z znižano napetostjo (320 V, 50 Hz) in z vključenimi dodatnimi rotorskimi upori ($R_{2dod} = 0.26 \Omega$) je

$$M'_z = M'_{om} = M_{om} \cdot \left(\frac{U'_1}{U_{1n}} \right)^2 = 51.5 \cdot \left(\frac{320}{380} \right)^2 = \underline{\underline{36.5 \text{ Nm}}}.$$

NALOGA 4.2:

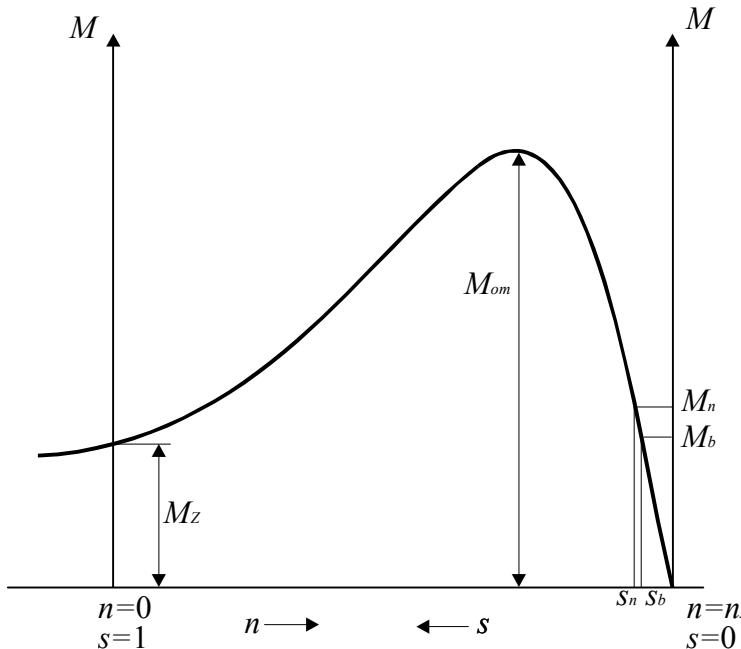
Asinhronski motor z drsnimi obroči nazivne moči $P_n = 15 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $f_{1n} = 50 \text{ Hz}$, $n_n = 1460 \text{ vrt/min}$, $I_{1n} = 32.0 \text{ A}$, $\cos\varphi_n = 0.85$, $I_{2n} = 30.0 \text{ A}$, $E_{20} = 300 \text{ V}$, $M_{om}/M_n = 2.6$, ima na nazivnem omrežju pod neko obremenitvijo 1470 vrt/min.

- S kako velikim momentom bremena M_b je motor obremenjen?
- S kakšnimi dodatnimi upori v rotorskem tokokrogu bi dosegli, da bi bil zagonski moment enak nazivnemu?
- Kakšne upore moramo vključiti v rotorski tokokrog, da vrtilna hitrost pade od 1470 na 1000 oziroma 600 vrt/min, če je:
 - moment bremena konstanten (neodvisen od vrtilne hitrosti),
 - moment bremena odvisen od kvadrata vrtilne hitrosti (ventilatorska karakteristika bremena)?

Kako velika je moč vrtilnega polja P_{vp} , moč izgub v rotorskem tokokrogu P_{2el} ter mehanska moč P_{meh} pri omenjenih obratovalnih pogojih?

a) Izračun bremenskega momenta:

Zunanja karakteristika AM je v področju od praznega teka (bližina n_s) do nazivnega vrtljnega momenta praktično linearja (premica pod strmim naklonom). Zato velja:



$$\frac{M_b}{M_n} = \frac{s_b}{s_n} .$$

Nazivni slip:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1460}{1500} = \\ = 0.0267$$

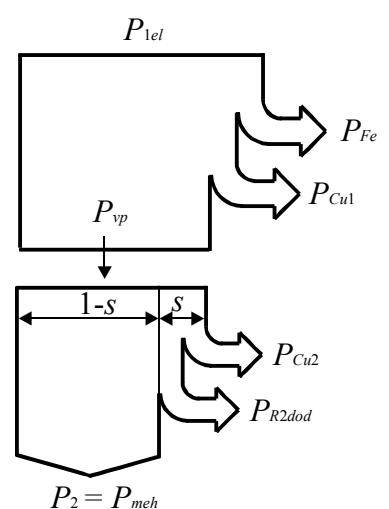
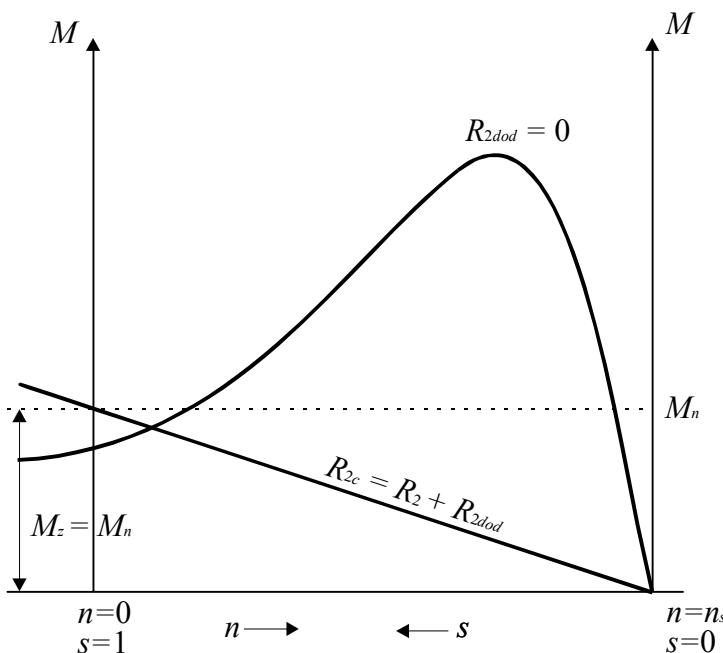
Bremenski slip:

$$s_b = \frac{n_s - n_b}{n_s} = \frac{1500 - 1470}{1500} = \\ = 0.0200$$

Nazivni moment: $M_n = \frac{P_n}{\omega} = \frac{P_n \cdot 60}{2\pi \cdot n_n} = 98 \text{ Nm} .$

Bremenski moment: $M_b = \frac{0.0200}{0.0267} \cdot 98 = 73.5 \text{ Nm} .$

b) Izračun dodatne upornosti:



Upornost rotorskoga navitja je:

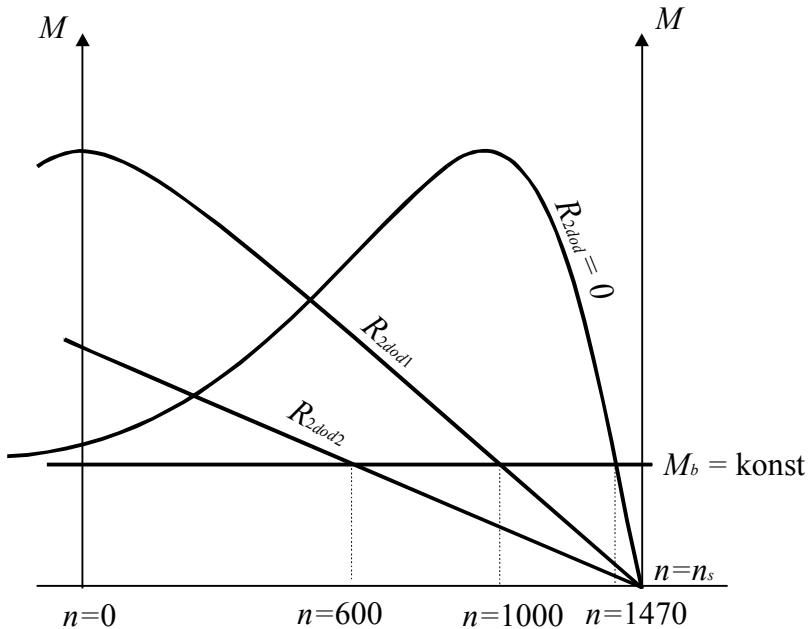
$$R_2 = \frac{s_n \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}} = \frac{0.0267 \cdot 300}{\sqrt{3} \cdot 30.0} = \underline{\underline{0.154 \Omega}}$$

Če želimo motor zagnati z nazivnim vrtilnim momentom M_n ($s = 1$), bo ob zagonu v rotorju tekel tok $I_2 = I_{2n}$ in celotna upornost v rotorskem tokokrogu je:

$$R_{2c} = \frac{1 \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}} = \frac{1 \cdot 300}{\sqrt{3} \cdot 30.0} = \underline{\underline{5.77 \Omega}}.$$

$$R_{2dod} = R_{2c} - R_2 = 5.77 - 0.154 = \underline{\underline{5.62 \Omega}}.$$

c) Konstanten bremenski moment $M_b = \text{konst}$:



Zaradi linearnega poteka vrtilnega momenta v stabilnem delu karakteristike velja:

$$\frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{M_b}{M_n} = \frac{s_b}{s_n}$$

Moč vrtilnega polja (ob zanemaritvi izgub trenja in ventilacije $P_{tr, v}$) je:

$$P_{vp} = M_b \cdot \omega_s = M_b \cdot \frac{2\pi \cdot n_s}{60} = \text{konst.} = 73.5 \cdot \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = \underline{\underline{11.55 \text{ kW}}}.$$

Izgube v rotorskem tokokrogu (v rotorskem navitju in v dodatnih uporih):

$$P_{2el} = P_{Cu2} + P_{2dod} = s_b \cdot P_{vp}.$$

Mehanska moč na gredi rotorja:

$$P_{meh} = M_b \cdot \omega_b = M_b \cdot \frac{2\pi \cdot n_b}{60} = (1 - s_b) \cdot P_{vp}.$$

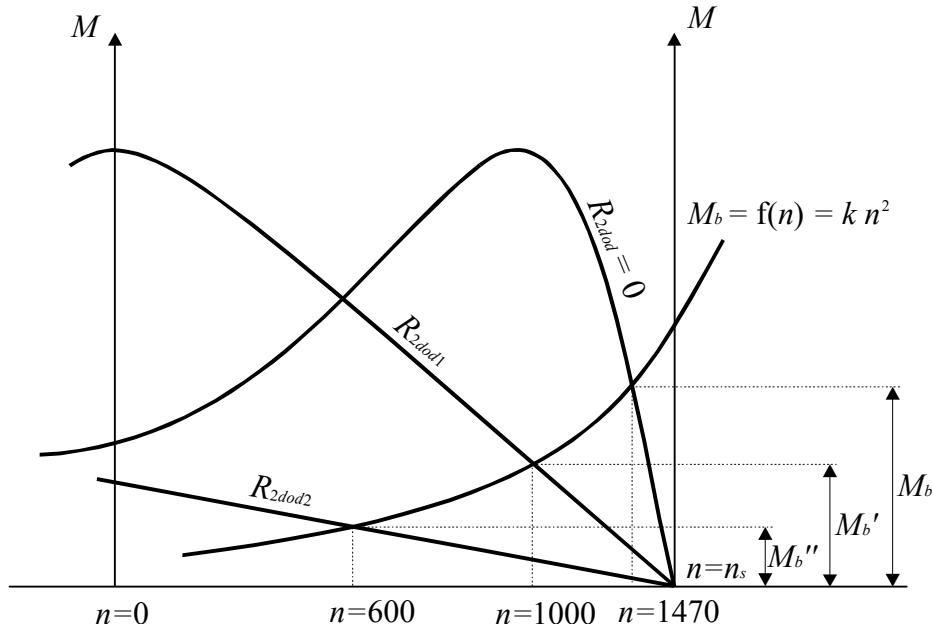
S pomočjo teh enačb izračunamo za različne vrtilne hitrosti vse zahtevane veličine:

n	s_b	M_b	I_2	R_{2dod}	P_{vp}	P_{2el}	P_{meh}
[vrt/min]		[Nm]	[A]	[Ω]	[kW]	[kW]	[kW]
1470	0.0200	73.5	22.5	0	11.55	0.23	11.32
1000	0.3333	73.5	22.5	2.41	11.55	3.85	7.70
600	0.6000	73.5	22.5	4.46	11.55	6.93	4.42

Ventilatorska bremenska karakteristika $M_b = k \cdot n^2$:

Za vsako obratovalno stanje pri n' moramo izračunati moment bremena M'_b in rotorski tok I_2 , ki ustrezata tej obremenitvi.

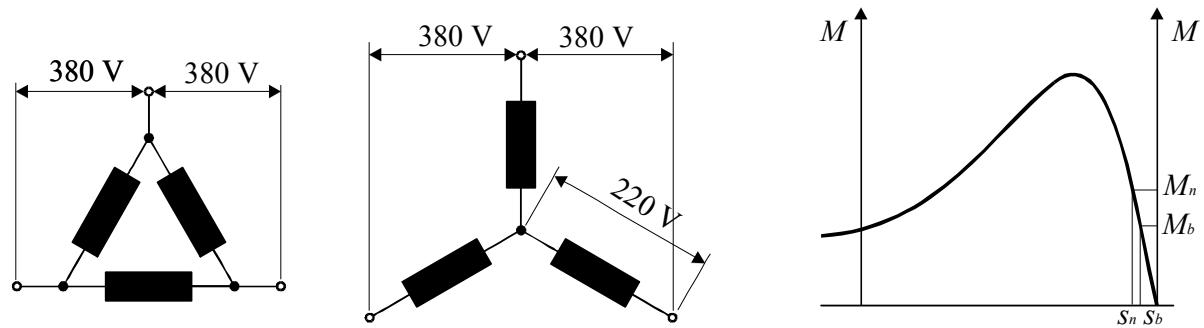
$$M'_b = M_b \cdot \left(\frac{n'}{n_b} \right)^2 ; \quad I_2 = I_{2n} \cdot \frac{M'_b}{M_n} .$$



n	s	M_b	I_2	R_{2dod}	P_{vp}	P_{2el}	P_{meh}
[vrt/min]		[Nm]	[A]	[Ω]	[kW]	[kW]	[kW]
1470	0.0200	73.5	22.5	0	11.5	0.23	11.32
1000	0.3333	34.0	10.4	5.39	5.35	1.78	3.56
600	0.6000	12.3	3.75	27.57	1.92	1.15	0.77

NALOGA 4.3:

Kratkostični AM ima nazivne podatke: 3 kW, 380 V, 50 Hz, 1420 vrt/min, 6.7 A, $\cos\varphi = 0.83$, vezava Δ , $I_k/I_n = 5.4$, $M_k/M_n = 2.3$, $M_{om}/M_n = 2.7$. Motor priključimo na nazivno omrežje in obremenimo z momentom $M_b = 11$ Nm. Iz vezave Δ ga pri nespremenjenem momentu bremena preklopimo v vezavo Y. Kakšno vrtilno hitrost in frekvenco rotorskih veličin ima v vezavi Δ in kakšne v vezavi Y?



Nazivni moment:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n \cdot 60}{2\pi \cdot n_n} = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 60}{2\pi \cdot 1420} = 20 \text{ Nm}, \quad \frac{s_b}{s_n} = \frac{M_b}{M_n} = \frac{11}{20}.$$

Nazivni slip:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0.0534.$$

Bremenski slip:

$$s_b = s_n \cdot \frac{M_b}{M_n} = 0.0534 \cdot \frac{11}{20} = 0.0285.$$

Vrtilna hitrost pri bremenskem momentu $M_b = 11$ Nm:

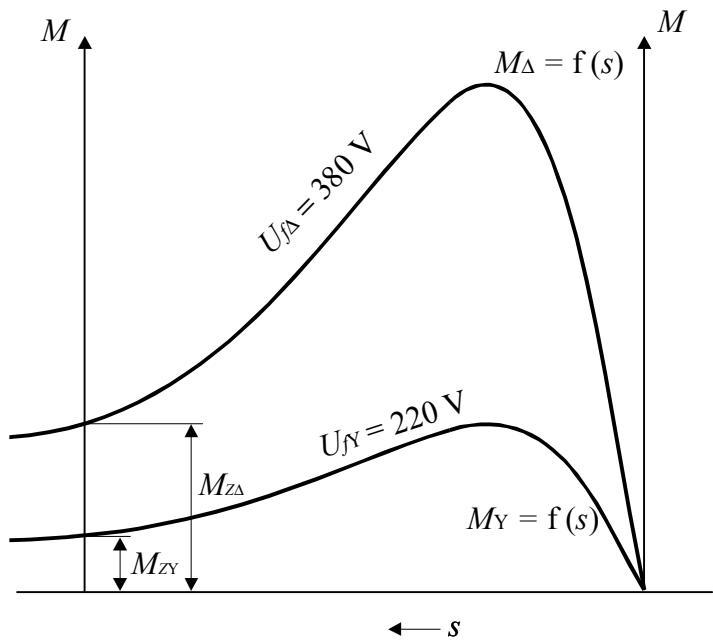
$$n_b = n_s \cdot (1 - s_b) = 1500 \cdot (1 - 0.0285) = 1457 \text{ vrt/min}.$$

Rotorska frekvenca pri $M_b = 11$ Nm in $n_b = 1475$ vrt/min:

$$f_2 = s_b \cdot f_1 = 0.0285 \cdot 50 = 1.4 \text{ Hz}.$$

Ko preklopimo motor iz vezave Δ v vezavo Y, se napetost na enem faznem navitju zmanjša za $\sqrt{3}$ (glej skico), zato se spremeni tudi zunanjega karakteristika AM $M = f(n)$! Glede na spremenjeno karakteristiko pri znižani napetosti pomeni enak bremenski moment $M'_b = M_b$ relativno povečanje obremenitve motorja. Nova vrednost slipa, pri kateri deluje motor je:

$$\frac{s'_b}{s_b} = \frac{M'_b}{M_b} = \left(\frac{U_n}{U'_n} \right)^2$$



$$M_Y = M_\Delta \cdot \left(\frac{U_Y}{U_\Delta} \right)^2 = \\ = M_\Delta \cdot \left(\frac{\frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}}{U_\Delta} \right)^2 = \frac{M_\Delta}{3}$$

$$s'_b = \left(\frac{U_n}{U'_n} \right)^2 \cdot s_b = \left(\frac{U_n}{U_n / \sqrt{3}} \right)^2 \cdot s_b = 3 \cdot s_b = 3 \cdot 0.0285 = 0.0855,$$

$$n'_b = n_s \cdot (1 - s'_b) = 1500 \cdot (1 - 0.0855) = 1372 \text{ vrt/min},$$

$$f'_2 = s'_b \cdot f_1 = 0.0855 \cdot 50 = 4.3 \text{ Hz}.$$

NALOGA 4.4:

Dva asinhronska motorja s kratkostično kletko, grajena za napetost 460 V, 60 Hz, imata spojeni gredi in sta priključena na nazivno omrežje. Njuni podatki so:

AM1: $P_{1n} = 18.4 \text{ kW}$ 3515 vrt/min 183 A $\eta = 0.87$

AM2: $P_{2n} = 22.1 \text{ kW}$ 3540 vrt/min 218 A $\eta = 0.865$

Motorja sta skupaj obremenjena z bremenskim momentom $M_b = 120 \text{ Nm}$.

- a) Kolikšen del obremenitve prevzame posamezni motor?
- b) Kolikšna je skupna dopustna moč obremenitve, ne da bi bil kateri izmed obeh motorjev preobremenjen?

- a) Motorja imata različna naklona stabilnega dela zunanje (momentne) karakteristike, zato sta pri obratovanju na skupni gredi ($n_1 = n_2 = n$) različno obremenjena.

$$M_{1n} = 50 \text{ Nm} \quad s_{1n} = 0.0236, \quad (f=60 \text{ Hz}),$$

$$M_{2n} = 60 \text{ Nm}, \quad s_{2n} = 0.0167,$$

$$M_b = M_1 + M_2 = M_{1n} \cdot \frac{s}{s_{1n}} + M_{2n} \cdot \frac{s}{s_{2n}},$$

$$s = \frac{M_b}{M_{1n}/s_{1n} + M_{2n}/s_{2n}} = \frac{120}{50/0.0236 + 60/0.0167} = 0.0207,$$

$$M_1 = M_{1n} \cdot \frac{s}{s_{1n}} = 50 \cdot \frac{0.0207}{0.0236} = 44 \text{ Nm},$$

$$n = n_1 = n_2 = n_s \cdot (1 - s) = 3600 \cdot (1 - 0.0207) = 3525 \text{ vrt/min},$$

$$\underline{\underline{P_1}} = M_1 \cdot \omega = \underline{\underline{16.06 \text{ kW}}} = 0.87 \cdot P_{1n} \quad \dots \quad \text{podobremenitev}$$

$$M_2 = M_{2n} \cdot \frac{s}{s_{2n}} = 60 \cdot \frac{0.0207}{0.0167} = 74 \text{ Nm},$$

$$\underline{\underline{P_2}} = M_2 \cdot \omega = \underline{\underline{27.25 \text{ kW}}} = 1.24 \cdot P_{2n} \quad \dots \quad \text{preobremenitev}$$

- b) Motor z bolj strmo zunanojo karakteristiko (AM2) je pri delovanju na skupni gredi bolj obremenjen, zato so minimalni dopustni vrtljaji za zahtevano obratovalno stanje (noben od obeh motorjev ne sme biti obremenjen več kot nazivno) n_{2n} .

$$n = n_{2n} = 3540 \text{ vrt/min}, \quad P_2 = P_{2n} = 22.1 \text{ k W}$$

$$P_1 \cong P_{1n} \cdot \frac{n_s - n}{n_s - n_{1n}} = 18.4 \cdot \frac{3600 - 3540}{3600 - 3515} = 13 \text{ kW},$$

$$\underline{\underline{P_{dopustni}}} = P_1 + P_2 = \underline{\underline{35.1 \text{ kW}}},$$

$$\underline{\underline{M_{dopustni}}} = \frac{P_{dopustni}}{\omega} = \frac{P_{dopustni}}{2\pi \cdot n} \cdot 60 = 95 \text{ Nm}.$$

NALOGA 4.5:

AM z drsnimi obroči 2.8 kW, 380 V, 50 Hz, 2880 vrt/min, 7.2 A, $\cos\varphi = 0.8$, $I_{2n} = 13.4$ A, $E_{20} = 126$ V, $M_{om}/M_n = 3.6$ je obremenjen s konstantnim bremenom $M_b = 6.7$ Nm. S kakšnimi dodatnimi upori v rotorskem tokokrogu nastavimo vrtljaje na 2000 vrt/min. Kolikšna moč vrtilnega polja takrat prehaja iz statorja na rotor, kolikšen je pri tem delež mehanske moči, izgub v navitju rotora in izgub na zunanjih uporih?

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{2880 \cdot 60}{2\pi \cdot 2880} = 9.28 \text{ A} \quad ; \quad s_n = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0.04$$

$$R_2 = \frac{s_n \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}} = \frac{0.04 \cdot 126}{\sqrt{3} \cdot 13.4} = 0.217 \Omega$$

$$M_b = 6.7 \text{ Nm} ; \quad I_b = I_{2n} \cdot \frac{M_b}{M_n} = 13.4 \cdot \frac{6.7}{9.28} = 9.67 \text{ A}$$

$$s_b = \frac{3000 - 2000}{3000} = 0.33$$

$$R_{2c} = \frac{s_b \cdot E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_b} = \frac{0.33 \cdot 126}{\sqrt{3} \cdot 9.67} = 2.51 \Omega$$

$$R_{2dod} = R_{2c} - R_2 = 2.51 - 0.217 = \underline{\underline{2.30 \Omega}}$$

$$P_{vp} = M_b \cdot \omega_s = 6.7 \cdot 2\pi \cdot \frac{3000}{60} = \underline{\underline{2.1 \text{ kW}}}$$

$$P_{meh} = M_b \cdot \omega_b = 6.7 \cdot 2\pi \cdot \frac{2000}{60} = \underline{\underline{1.4 \text{ kW}}}$$

$$P_{2el} = P_{vp} \cdot s_b = 2.1 \cdot 0.33 = 700 \text{ W} = P_{Cu2} + P_{2dod}$$

$$\frac{P_{Cu2}}{P_{2dod}} = \frac{I_b^2 \cdot R_2}{I_b^2 \cdot R_{2dod}} = \frac{0.217}{2.30} = 0.0943$$

$$P_{2dod} + 0.0943 \cdot P_{2dod} = 700 \text{ W}$$

$$P_{2dod} = \underline{\underline{640 \text{ W}}} ; \quad P_{Cu2} = \underline{\underline{60 \text{ W}}}$$

NALOGA 4.6:

Trifazni AM s kratkostično kletko 22 kW, 380 V, 50 Hz, 2935 vrt/min, vezave Δ , 42 A, $\cos\varphi = 0.88$, $I_z/I_n = 5.5$, $M_z/M_n = 1.7$, $M_{om}/M_n = 2.6$, mora ob zagonu razviti vsaj $M_z = 34 \text{ Nm}$ vrtilnega momenta. Na kakšno vrednost se sme znižati napetost omrežja pri zagonu, če je motor v vezavi Y in kakšen tok potegne iz omrežja?

Rešitev: $U = 350 \text{ V}$, $I_z = 71 \text{ A}$.

NALOGA 4.7:

AM motor 50 kW, 380 V, 50 Hz, 480 vrt/min, 29 A, $\cos\varphi = 0.8$, $I_z/I_n = 5.0$, $M_z/M_n = 1.5$, $M_{om}/M_n = 2.0$, dviga breme z $0.8 \cdot M_n$. Pri kakšni napetosti motor ne zmore več dviganja?

Rešitev: $U = 230 \text{ V}$.