

# KES - SEMINARSKA NALOGA

## Asinhronski motor s kratkostično kletko

Začetni podatki:

$$m = 3$$

št. faz

$$P_n = 75 \text{ kW}$$

nazivna moč

$$n_s = 5000 \text{ vrt/min}$$

nazivna vrtilna hitrost

$$U_a = 600 \text{ V}$$

baterijska napetost

Zahteva:  $n_{\max} = 2 \cdot n_s = 10000 \text{ vrt/min}$

Izberem število polovih parov:  $p_p = 2$

Iz baterijske napetosti s pomočjo faktorja modulacije izračunamo fazno in medfazno napetost. Faktor modulacije -  $k_{FM}$  je odvisen od načina vodenja s frekvenčnim pretvornikom. Če imamo  $k_{FM}$  blizu 1, pomeni, da je pretvornik blizu svoje optimalne zmogljivosti, kar zagotavlja boljše delovanje motorja in manjše izgube. Ker smo blizu največji možni napetosti lahko zagotovimo večjo moč in hitrost motorja.

Frekvenčni pretvornik izkorišča moč, ki jo baterije pride delovna moč.

$k_{FM} = 0,95$  faktor modulacije

$$U_{f,ef} = \frac{U_a \cdot k_{FM}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{600 \cdot 0,95}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = 232,7 \text{ V} \quad \text{fazna napetost}$$

$$U_{L-L,ef} = \frac{U_a \cdot k_{FM}}{\sqrt{2}} = \frac{600 \cdot 0,95}{\sqrt{2}} = 403 \text{ V} \quad \text{medfazna napetost}$$

$$f_n = \frac{n_s \cdot p_p}{60} = \frac{5000 \cdot 2}{60} = 166,66 \text{ Hz} \quad \text{nazivna električna frekvenca}$$

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n = 2 \cdot \pi \cdot 166,66 = 1046,6 \text{ rad/s} \quad \text{krožna frekvenca}$$

## PREMER ROTORJA IN DOLŽINA MOTORJA

$$M_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_s}{60}} = \frac{75000}{2 \cdot \pi \cdot \frac{5000}{60}} = \frac{75000}{523,3} = 143,3 \text{ Nm} \quad \text{nazivni navor}$$

Da bi lahko izračunali premer rotorja in dolžino stroja na podlagi tipičnih (izhodiščnih) vrednosti, potrebujemo poleg navora določiti še pripadajoče vrednosti Maxwellovih sil na rotor.

$$M_n = \underline{G_{F,t}} \cdot \pi \cdot \frac{D_r^2}{2} \cdot l$$

$$\underline{G_{F,t}} = A \cdot \frac{\hat{B}_n}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi$$

amplitudna  
efektivna

tangencialna komponenta Maxwellovega napetostnega tenzorja - navorotvorni del

$$\cos \varphi = 0,8$$

faktor moči

$$\hat{B}_n = 0,9 \text{ T}$$

gostota mag. pretoka v zračni reži (0,7 T - 0,9 T)

$$\hat{A} = 50000 \text{ A/m}$$

tokovna obloga (30.000 - 65.000 A/m)

Ker imamo v priporočilih za začetne vrednosti amplitudne vrednosti, jih moramo najprej preračunati v efektivne.

$$B = \frac{0,9}{\sqrt{2}} = 0,636 \text{ T}$$

$$A = \frac{50000}{\sqrt{2}} = 35355 \text{ A/m}$$

$$\underline{G_{F,t}} = 35355 \cdot 0,636 \cdot 0,8 = 18000 \text{ Pa}$$



$$D_R^2 \cdot l = \frac{M_n \cdot 2}{G_{Fe} \cdot \pi} = \frac{143,3 \cdot 2}{18000 \cdot \pi} = 0,00507$$

Za motorje z dvema polovima paroma velja enačba:

$$\gamma_p = \frac{\pi \cdot D_R}{2 \cdot p_p} \rightarrow \frac{l}{\gamma_p} = \frac{\pi \cdot D_R}{2 \cdot p_p} \rightarrow \frac{l}{D_R} = \frac{l}{\gamma_p} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p_p}$$

Kompromis za dober izkoristek:  $\frac{l}{D_R} = 1,5$

$$\frac{l}{D_R} = 1,5 \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 2} = \underline{1,178}$$

$$M_n = G_{Fe} \cdot \pi \cdot \frac{D_R^2}{2} \cdot 1,178 \cdot D_R$$

$$D_R^3 = \frac{0,00507}{1,178} \rightarrow D_R = \sqrt[3]{0,0043} = 0,1626 \text{ m}$$

$$\underline{D_R = 162,6 \text{ mm}}$$

premer rotorja

$$\underline{l = 191,5 \text{ mm}}$$

dolžina motorja

$$\underline{\gamma_p = 127,6 \text{ mm}}$$

polovna delitev motorja

Motor z veliko polovno delitvijo in majhnim številom polovih parov bo imel višji  $\cos \phi$  (manjši  $\cos \phi$  - močnejši napajalnik). Takšno razmerje da dober faktor moči pri razumni ceni.

Če povečamo  $D_R$  se magnetilni tok  $I_m$  zmanjša in  $\cos \phi$  zveča.

Če povečamo  $p_p$  se magnetilni tok  $I_m$  zviša.

# STATORSKO NAVITJE

Če želimo enoplastno navitje moramo imeti vsaj 12 utorov, saj imamo 3-fazno navitje s 4-polnim magnetnim poljem.

$$Q_s = n \cdot 12 = 36 \quad \text{število utorov statorja}$$

$$q = \frac{Q_s}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{12} = 3 \quad \text{število utorov na pol}$$

12 utorov - večji harmoniki, slabše magnetno polje v zračni reži

24 utorov - dober kompromis med magnetnim poljem in kompleksnostjo navitja

36 utorov - kompleksnejša izdelava a bolj sinusen potoke magnetnega polja.

Na spletni strani EMETOR izrišemo navjalni načrt in za naše podatke dobimo:

$$k_{ws} = 0,96 \quad \text{faktor navitja osnovnega harmonika}$$

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{ind}}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot k_{ws} \cdot \alpha_i \cdot \hat{B}_g \cdot \zeta_p \cdot l} \quad \text{število ovjev statorskega navitja}$$

$$E_{ind} = 0,97 \cdot U_1 = 0,97 \cdot 232,7 = 225,7 \text{ V} \quad \text{fazna inducirana napetost}$$

↑ priključna fazna napetost

koefficient za izgube in neidealnosti iz prakse (0,96 - 0,98)

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \quad \text{koefficient aritmetičnega povprečenja - za sinusno porazdelitev gostote magnetnega pretoka v zračni reži}$$



$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot 225,7}{2 \cdot \pi \cdot 166,6 \cdot 0,96 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 0,9 \cdot 0,1276 \cdot 0,1915} = \frac{319,19}{14,07} = 22,7$$

$$Z_g = \frac{2 \cdot m \cdot N}{Q_s} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 22,7}{36} = 3,78$$

$Z_g = 4$       število vodnikov na ustor

$N = \frac{Z_g \cdot Q}{2 \cdot m} = \frac{4 \cdot 36}{2 \cdot 3} = 24$       število obojev statorskega navitja

Sedaj moramo spet preveriti ali je  $\hat{B}_s$  v dovoljenih mejah za naše preračunano navitje.

$$\hat{B}_s = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{ind}}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot k_{ws} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \gamma_p \cdot l \cdot N} = \frac{319,19}{375,18} = \underline{0,85, T}$$

$\hat{B}_s$  je v dovoljenih mejah 0,7 - 0,9 T

opazimo v

5. avlo

1. pri

1. pri

1. pri

1. pri

## ZRAČNA REŽA

Čim manjša kot je zračna reža, čim boljše imamo magnetilne razmere

$\delta = 0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4}$       izhodiščna enačba zračne reže za  $p_p > 1$

$\delta = 0,18 + 0,006 \cdot 75000^{0,4} = 0,18 + 0,535 = 0,715 \text{ mm}$

Z upoštevanjem Carterjevega faktorja bomo povečali zračno režo in s tem upoštevali, da magnetno polje pod zobmi ni konstantno. S tem ko

povečamo zračno režo homogeniziramo magnetno polje v zračni reži ( $B_s$  postane konstanta). Ker imamo asinhronski motor s kratkostično kletko se med zobmi rotorja prav tako pojavljajo harmoniki, zato moramo izračunati skupen Carterjev faktor za stator in rotor, ki ga upoštevamo pri izračunu zračne reže.

Carterjev faktor je tudi razmerje med maksimalnim  $B_s$  in povprečnim (konstantnim)  $B_s$ .

za izračun Carterjevega faktorja statorja najprej predpostavimo gladek rotor.

$$K_s = \frac{\frac{b_1}{\delta}}{5 + \frac{b_1}{\delta}} = \frac{\frac{2,5}{0,715}}{5 + \frac{2,5}{0,715}} = \frac{3,49}{8,49} = \underline{0,41} \quad \text{konstanta iz geometrijskih podatkov}$$

$$b_1 = \underline{2,5 \text{ mm}} \quad (1,5 - 2,5) \quad \text{širina utorске odprtine}$$

↳ paziti moramo v nadaljevanju, da velja:  $b_1 = S_0 = 2 \sim 2,3 \text{ dž}$  !  
Izbrati moramo debelino žice, ki jo lahko spravimo čez utorško odprtino (slot opening), če pa to ni mogoče, moramo žico razdeliti na snop žic z enako površino.

$$K_{cs} = \frac{\gamma_{us}}{\gamma_{us} - K_s \cdot b_1} = \frac{14,18}{14,18 - 0,41 \cdot 2,5} = \underline{1,08} \quad \text{Carterjev faktor statorja}$$

$$\gamma_{us} = \frac{D_s \cdot \pi}{Q_s} = \frac{162,6 \cdot \pi}{36} = \underline{14,18 \text{ mm}} \quad \text{utorska delitev na statorju}$$

Tu velja, da je notranji premer statorja  $\approx$  zunanji premer rotorja

za izračun Carterjevega faktorja rotorja predpostavimo gladek stator.

Najprej iz tabele priporočil izberemo število utorov rotorja.

$$Q_R = \underline{22} \quad \text{število utorov rotorja}$$



$$b_2 = 1,8 \text{ mm} \quad (1 - 2 \text{ mm}) \quad \text{širina utorske odprtine rotorja}$$

$$K_R = \frac{\frac{b_2}{\delta}}{5 + \frac{b_2}{\delta}} = \frac{\frac{1,8}{0,715}}{5 + \frac{1,8}{0,715}} = \frac{2,52}{7,52} = 0,34$$

$$\tau_{UR} = \frac{D_R \cdot \pi}{Q_R} = \frac{162,6 \cdot \pi}{22} = 23,2 \text{ mm} \quad \text{utorska delitev rotorja}$$

$$k_{CR} = \frac{\tau_{UR}}{\tau_{UR} - K_R \cdot b_2} = \frac{23,2}{23,2 - 0,34 \cdot 1,8} = 1,03 \quad \text{Carterjev faktor rotorja}$$

$$k_c = k_{cs} \cdot k_{CR} = 1,08 \cdot 1,03 = 1,11 \quad \text{Carterjev faktor}$$

$$\delta_e = k_c \cdot \delta = 1,11 \cdot 0,715 = 0,794 \text{ mm} \quad \text{ekvivalentna zračna reža}$$

## DIMENZIJE ZOB

Za dimenzioniranje statorja in rotorja, se moramo najprej odločiti katero pločevino vzeti. Statorsko jedro mora biti narejeno iz materiala, ki se lahko hitro magnetizira - želimo večjo učinkovitost, hkrati pa čim manjše izgube. Prav tako želimo material z visoko permeabilnostjo saj omogoča magnetnemu polju lažji pretok, kar izboljšuje učinkovitost motorja. Za rotorsko jedro želimo material z dobrimi magnetnimi lastnostmi, vendar tu lahko izberemo nižjo kakovost kot pri statorju in se odločimo za cenevo in bolj ugodno verzijo. (ne potrebuje tako hitre magnetizacije kot stator, ker ni izpostavljen magnetnemu polju, ki ga proizvaja izmenična napetost iz inverterja)

Za stator izberem material proizvajalca isovac 350-50A z visoko permeabilnostjo, za rotor pa isovac 400-50A, ki ima visoko nivo nasičenja (inducirani tok v rotorju ob zagonu motorja je najvišji, mogoče bi vzela kar oba 350-50?).

zato moramo zagotoviti, da rotor ne pade v nasičenje). Obe pločevini sta debeline 0,5 mm. Ker v podatkovnem listu ni bil naveden polnihi faktor, vzamem polnihi faktor za to debelino iz priporočil.

$k_{Fe} = 0,98$  faktor polnjenja - razmerje pločevina : izolacija 98% pločevina

Iz priporočil vzamem vrednosti za gostoto magnetnega polja v statorskih in rotorskih zobeh:

$B_{ds} = 1,5 \text{ T}$  gostota magnetnega polja v statorskih zobeh

$B_{dr} = 1,7 \text{ T}$  v rotorskih zobeh

$$b_{ds} = \frac{B_s \cdot \gamma_{us} \cdot l}{k_c \cdot B_{ds} \cdot k_{Fe} \cdot l} = \frac{0,85 \cdot 0,01418 \cdot 0,1915}{1,11 \cdot 1,5 \cdot 0,98 \cdot 0,1915} = \frac{0,0023}{0,312} = \underline{7,37 \text{ mm}}$$

$$b_{dr} = \frac{B_s \cdot \gamma_{ur} \cdot l}{k_c \cdot B_{ds} \cdot k_{Fe} \cdot l} = \frac{0,85 \cdot 23,2 \cdot 191,5}{1,11 \cdot 1,7 \cdot 0,98 \cdot 191,5} = \frac{3776}{354} = \underline{10,67 \text{ mm}}$$

širini statorskega in rotorskega zoba

Širino širšega dela zob izračunam kot razliko med utorsko delitvijo in širino utorske odprtine.

$b_{dss} = \gamma_{us} - b_1 = 14,18 - 2,5 = 11,68 \text{ mm}$  širši del zob statorja

$b_{drs} = \gamma_{ur} - b_2 = 23,2 - 1,8 = 21,4 \text{ mm}$  rotorja



## DIMENZIJE UTOROV

Najprej potrebujemo statorski tok, ki ga izračunamo s pomočjo predpostavljenega izkoristka

$$\eta = 90\% \quad ; \quad \text{velja:} \quad \begin{cases} < 10 \text{ kW} & 80 - 90\% \\ 10 \text{ kW} - 100 \text{ kW} & 88 - 92\% \\ 100 \text{ kW} < & 90 - 95\% \end{cases} \quad \text{izkoristek}$$

$$I_s = \frac{P_n}{\eta \cdot m \cdot U_{n, \text{faz}} \cdot \cos \varphi} = \frac{75000}{0,9 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 232,7} = 149,2 \text{ A} \quad \text{statorski tok}$$

Dolžiti moram tudi faktor poljeyja utora, ki je za nizkonapetostne stroje običajno med 0,5 in 0,6.

$$k_{cu} = 0,5 \quad \text{faktor poljeyja utora}$$

Prav tako na podlagi priporočil izberem gostoto toka statorskega navitja. Večja kot je gostota, boljše hlajenje potrebujemo.

$$J_s = 7 \text{ A/mm}^2 \quad \text{gostota toka statorskega navitja} \quad (3 - 8 \text{ A/mm}^2)$$

$$S_{cs} = \frac{I_s}{J_s} = \frac{149,2}{7} = 21,3 \text{ mm}^2 \quad \text{preseki žice statorskega navitja}$$

↳ v tem primeru bi bila debelina žice več kot 5 mm, takšne žice pa ne moremo navijati v motor strojno, prav tako takšna žica ne gre skozi širino utorske odprtine 2,5 mm. V ta namen predpostavimo vzporedne vodnike - eno žico razdelimo na 8 tanjših žic z enakim skupnim presekom. Na ta način tudi izboljšamo hlajenje, saj imamo okoli vsake žice izolacijo.

$$S_{cs-s} = 2,66 \text{ mm}^2$$

Ker ta presek ni standardni, izberem najbližji večji presek.

$$\underline{S_{cs-s} = 2,835 \text{ mm}^2}$$

preseki žice

$$\underline{d_z = 1,9 \text{ mm}}$$

debelina žice

$$\underline{S_{cs} = 8 \cdot S_{cs-s} = 22,68 \text{ mm}^2}$$

skupni preseki vzporednih vodnikov

$$\underline{S_{us} = \frac{S_{cs} \cdot z_g}{k_{cu}} = \frac{22,68 \cdot 4}{0,5} = 181,44 \text{ mm}^2}$$

površina utora statorja

$$\underline{b_s = \tau_{us} - b_{ds} = 14,18 - 7,37 = 6,81 \text{ mm}}$$

širina utora statorja

$$\underline{h_s = \frac{S_{us}}{b_s} = \frac{181,44}{6,81} = 26,64 \text{ mm}}$$

višina utora = višina zoba

Na podlagi priporočil za rotor vzamemo vrednost gostote toka rotorskega navitja za aluminij

$$\underline{J_R = 4 \text{ A/mm}^2}$$

gostota toka rotorskega navitja

(3 - 6,5 A/mm<sup>2</sup>)

$$\underline{I_R = z_g \cdot \frac{Q_s}{Q_R} \cdot I_s \cdot \cos \varphi = 4 \cdot \frac{36}{22} \cdot 149,2 \cdot 0,8 = 781,3 \text{ A}}$$

rotorski tok

$$\underline{S_{uR} = \frac{I_R}{J_R} = \frac{781,3}{4} = 195,3 \text{ mm}^2}$$

površina utora (in aluminijastega droga)

$$\underline{b_R = \tau_{uR} - b_{dR} = 23,2 - 10,67 = 12,53 \text{ mm}}$$

širina utora rotorja

$$\underline{h_R = \frac{S_{uR}}{b_R} = \frac{195,3}{12,53} = 15,59 \text{ mm}}$$

višina utora rotorja



# VIŠINA STATORSKEGA IN ROTORSKEGA JARMA

Iz priporočil ocenimo:

$B_{ys} = 1,6 \text{ T}$  gostota magnetnega pretoka v jarnu statorja (1,4-1,7)  
 $B_{yr} = 1,5 \text{ T}$  rotorja (1-1,6)

$$h_{ys} = \frac{\alpha_i \cdot \hat{B}_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_e}{2} + \delta \right)}{2 \cdot p_p \cdot B_{ys} \cdot k_c} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot 0,85 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{162,6}{2} + 0,715 \right)}{2 \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 1,1} =$$
$$= \frac{277,8}{7,1} = \underline{39,1 \text{ mm}} \quad \text{višina statorskega jarma}$$

$$h_{yr} = \frac{\alpha_i \cdot \hat{B}_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_n}{2} + \delta \right)}{2 \cdot p_p \cdot B_{yr} \cdot k_c} = \frac{277,8}{6,66} = \underline{41,7 \text{ mm}} \quad \text{višina rotorskega jarma}$$

## MAGNETNE NAPETOSTI

### → V STATORSKEM ZOBU

Predpostavimo, da je v zobu magnetni pretok enak kot v zračni reži

$$\Phi_{zs} = \hat{B}_s \cdot \gamma_{zs} \cdot l \cdot \frac{k_{fe}}{k_c} = 0,85 \cdot 0,01418 \cdot 0,1915 \cdot \frac{0,98}{1,1} = \underline{2,04 \text{ mWb}}$$

magnetni pretok v statorskem zobu

Če zobe niso nasičeni (lahko se vedno prenašajo več magnetnega toka - povečanje zunanje polja  $H$  še vedno poveča magnetizacijo  $B$ ), bo skoraj ves magnetni tok tekkel skozi zobe. To pa zato, ker magnetni material zob zagotavlja pot z nizko magnetno upornostjo.

Zaradi tega ne bo skoraj nič toka v režah in izolaciji - ne bo vrtilčnih tokov, energijskih izgub in obremenitev izolacijskega materiala.

$$B_{zs} = \frac{\Phi_{zs}}{b_{ds} \cdot k_{Fe} \cdot l} = \frac{2,04 \cdot 10^{-3}}{0,00737 \cdot 0,98 \cdot 0,1915} = \underline{1,47 \text{ T}}$$

dejanska gostota magnetnega pretoka v statorskih zobeh

Na podlagi te vrednosti iz BH krivulje materiala M350-50A odčitamo:

$$H_{zs} = \underline{930 \text{ A/m}} \quad \text{magnetna poljska jakost}$$

$$G_{zs} = H_{zs} \cdot h_s = 930 \cdot 0,02664 = \underline{24,8 \text{ A}} \quad \text{magnetna napetost statorskega zoba}$$

→ V ROTORSKEM ZOBU

$$\Phi_{zR} = \hat{B}_s \cdot \tau_{ur} \cdot l \cdot \frac{k_{Fe}}{k_c} = 0,85 \cdot 0,0232 \cdot 0,1915 \cdot \frac{0,98}{1,11} = \underline{3,33 \text{ mWb}}$$

$$B_{zR} = \frac{\Phi_{zR}}{b_{dR} \cdot k_{Fe} \cdot l} = \frac{3,33 \cdot 10^{-3}}{0,01067 \cdot 0,98 \cdot 0,1915} = \underline{1,66 \text{ T}}$$

$$H_{zR} = \underline{2500 \text{ A/m}} \quad \text{material } \underline{M400-50A}$$

Za rotor sem vzela drugačen material, saj bi bil material, ki sem ga uporabila za stator blizje nasičenju pri vrednosti  $B=1,66 \text{ T}$ .

$$G_{zR} = H_{zR} \cdot h_R = 2500 \cdot 0,01559 = \underline{38,98 \text{ A}}$$



## → V ZRAČNI REŽI

$$I_s = \frac{\hat{B}_s}{\mu_0} \cdot \delta = \frac{0,85}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,000715 = \underline{483,9 \text{ A}}$$

## → V STATORSKEM JARMU

$$\Phi_{ys} = \alpha_i \cdot \hat{B}_s \cdot \tau_p \cdot l = \frac{2}{\pi} \cdot 0,85 \cdot 0,1276 \cdot 0,1915 = \underline{13,2 \text{ mWb}}$$

$$B_{ys} = \frac{\Phi_{ys}}{2 \cdot h_{ys} \cdot l \cdot k_{Fe}} = \frac{13,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0391 \cdot 0,1915 \cdot 0,98} = \underline{0,9 \text{ T}}$$

$$H_{ys} = \underline{108 \text{ A/m}} \quad \text{material} \quad \underline{350-50A}$$

Za izračun magnetne napetosti v jarmu potrebujemo dolžino magnetne poti.

$$\tau_{ys} = \frac{\pi \cdot (D_{st} - h_{ys})}{2 \cdot p_p} = \frac{\pi \cdot (295,4 - 39,1)}{4} = \underline{201,2 \text{ mm}} \quad \begin{array}{l} \text{srednja dolžina} \\ \text{mag. poti v s.j.} \end{array}$$

$$D_{st} = D_R + (\delta + h_s + h_{ys}) \cdot 2 = 162,6 + (0,715 + 26,6 + 39,1) \cdot 2 = 162,6 + 132,8 = \underline{295,4 \text{ mm}}$$

zunanjí premer motorja

Določiti moram še korekcijski faktor  $c$ , ki upošteva, da je jakost polja v jarmu močno nelinearna in se nelinearnost še poveča z nasičenjem jarma. Faktor uvedemo, ker je zaradi neenakomerne porazdelitve magnetnega pretoka - še posebej blizu zob in rež, magnetna pot drugačna od fizične. Faktor pomaga zagotoviti, da izračunana magnetna napetost natančno odraža dejanske magnetne razmere

v jarmu ob upoštevanju kompleksnosti geometrije motorja.

$C_{ys} = 0,62$  korekcijski faktor

$I_{ys} = C_{ys} \cdot H_{ys} \cdot \tau_{ys} = 0,62 \cdot 108 \cdot 0,2012 = 13,47 \text{ A}$

## → V ROTORSKEM JARMU

$\Phi_{yR} = \alpha_i \cdot \hat{B}_s \cdot \tau_p \cdot l = 13,2 \text{ mWb}$

$B_{yR} = \frac{\Phi_{yR}}{2 \cdot k_{re} \cdot l \cdot h_{yR}} = \frac{13,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,98 \cdot 0,1915 \cdot 0,0417} = 0,84 \text{ T}$

$H_{yR} = 94 \text{ A/m}$  material 400-50A

$C_{yR} = 0,65$

$\tau_{yR} = \frac{\pi (D_{st} - h_{yR})}{2 \cdot p_p} = \frac{\pi \cdot (0,2954 - 0,0417)}{4} = 199 \text{ mm}$

$I_{yR} = C_{yR} \cdot H_{yR} \cdot \tau_{yR} = 0,65 \cdot 94 \cdot 0,199 = 12,16 \text{ A}$

## → SKUPNO MAGNETNO VZBUJANJE

Vsota magnetnih napetosti v posameznih delih je enaka magnetnemu vzburjanju, ki ga mora zagotavljati vzbujačni tok na statorski strani. Zrak ima največjo magnetno upornost - reluktanco, zato potrebujemo največjo magnetno napetost v zračni reži, za enak



pretok kot v zobeh in jarmu.

$$I_m = I_\delta + I_{zs} + I_{zr} + \frac{I_{ys}}{2} + \frac{I_{yr}}{2} = 483,9 + 24,8 + 38,98 + \frac{13,47}{2} + \frac{12,16}{2} =$$

$$= \underline{560,5 \text{ A}} \quad \text{magnetno vzbujanje}$$

Ker gre pot magnetnega vzbujanja čez jarma samo 1x, delimo njuno vrednost z 2.

## IZGUBE V BAKRU

Izgube v bakru so produkt statorskega toka in upornosti faznega navitja.

$$l_{cs} = (2 \cdot (m \cdot g) \cdot \tau_{ns} + 2 \cdot \pi \cdot \tau_{ns} + 2 \cdot l) \cdot N = (2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0,01418 + 2 \cdot \pi \cdot 0,01418 + 2 \cdot 0,1915) \cdot 24$$

$$= (0,255 + 0,089 + 0,383) \cdot 24 = \underline{17,5 \text{ m}} \quad \text{dolžina žice}$$

dve poti navitja

koliko rotorov

polov

ukrivljena dela

- po dveh straneh

preči žica ene

delitev

na obeh straneh

okoli zoba

207. faze, preden se

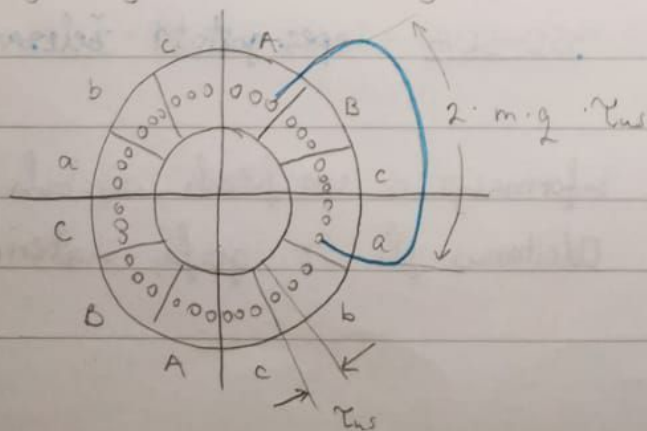
statorja

zoba - kjer naredi

(spredaj, zadaj)

vrne nazaj

žica zavoj



Za izračun upornosti faznega navitja potrebujemo upornost bakra pri delavni temperaturi - recimo  $80^{\circ}\text{C}$

← temperaturni koeficient upornosti bakra

$$\underline{P_{cu, 80^{\circ}\text{C}}} = P_{cu, 20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \Delta T \cdot \alpha_{cu}) = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 60 \cdot 3,81 \cdot 10^{-3}) =$$

$$= \underline{2,15 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}} \quad \text{upornost bakra pri } 80^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{R_{cs}} = P_{cu, 80^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{l_{cs}}{a \cdot S_{cs-s}} = 2,15 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{17,5}{8 \cdot 2,835 \cdot 10^{-6}} = \underline{16,59 \text{ m}\Omega} \quad \begin{array}{l} \text{upornost} \\ \text{faznega} \\ \text{navitja} \end{array}$$

$$\underline{P_{cu}} = R_{cs} \cdot I_s^2 \cdot m = 0,01659 \cdot 149,2^2 \cdot 3 = \underline{1107,9 \text{ W}} \quad \text{izgube v bakru}$$

V navitju statorja je  $1,47\%$  izgub

## IZGUBE V ŽELEZU

### → STATORSKI ZOBJE IN JAREM

$\underline{k_{Fe,n}} = 1,8$  polnični faktor železa, ki vsebuje parazitne vplive - zobje

$$\underline{V_{zs}} = b_{ds} \cdot b_s \cdot k_{Fe,n} \cdot l = 7,37 \cdot 6,81 \cdot 1,8 \cdot 191,5 = \underline{17300 \text{ mm}^3} \quad \text{volumen zoba}$$

$$\underline{m_{zs}} = V_{zs} \cdot \rho_{Fe} = 17300 \cdot 7,71 \cdot 10^{-6} = \underline{0,133 \text{ kg}} \quad \text{masa enega zoba}$$

$$\underline{\rho_{Fe}} = 7,71 \text{ g/cm}^3 \quad \text{material } \underline{350-50A} \quad \text{spec. gostota železa}$$

Za izračun izgub v zobeh potrebujemo informacijo o specifičnih izgubah pri naši gostoti magnetnega pretoka. Odcitamo jih iz grafa materiala za približek B.



$$B_{zs} = 1,47 \text{ T}$$

$$B_{est,zs} = 1,5 \text{ T}$$

$$P_{zs} = 3 \text{ W/kg} \quad \text{specifične izgube železa @ } B=1,5 \text{ T}, f=50 \text{ Hz}$$

$$P_{Fe,zs1} = k_{Fe,n} \cdot P_{zs} \cdot m_{zs} \cdot \left( \frac{B_{zs}}{B_{est,zs}} \right)^2 = 1,8 \cdot 3 \cdot 0,133 \cdot \left( \frac{1,47}{1,5} \right)^2 = 0,69$$

izgube za 1 zob

$$P_{Fe,zs} = P_{Fe,zs1} \cdot Q_s = 0,69 \cdot 32 = 22,08 \text{ W} \quad \text{izgube v statorskih zobeh}$$

$$k_{Fe,n} = 1,6 \quad \text{faktor za jarek}$$

Površina jarma je različna med površino motorja in površino brez jarma.

$$V_{ys} = k_{Fe,n} \cdot l \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_{st}}{2} - \left( \frac{D_{st}}{2} - h_{ys} \right) \right)^2 = 1,6 \cdot 191,5 \cdot \pi \cdot \left( \frac{295,4}{2} - \left( \frac{295,4}{2} - 39,1 \right) \right)^2 =$$

$$= 962,1 \cdot (147,7 - 108,6)^2 = 1470868 \text{ mm}^3 \quad \text{površina statorskega jarma}$$

$$m_{ys} = V_{ys} \cdot \rho_{Fe} = 1470868 \cdot 7,71 \cdot 10^{-6} = 11,3 \text{ kg} \quad \text{masa statorskega jarma}$$

$$B_{ys} = 0,9 \text{ T}$$

$$P_{ys} = 1,1 \text{ W/kg}$$

$$P_{Fe,ys} = k_{Fe,n} \cdot P_{ys} \cdot m_{ys} \cdot \left( \frac{B_{ys}}{B_{est,ys}} \right)^2 = 1,6 \cdot 1,1 \cdot 11,3 \cdot 1 = 19,89 \text{ W}$$

$$P_{Fe,s} = P_{Fe,zs} + P_{Fe,ys} = 22,08 + 19,89 = 41,97 \text{ W} \quad \text{skupne izgube statorja (Fe)}$$

## → ROTORSKI ZOBJE IN JAREM

$$k_{Fe,n} = 1,8$$

$$V_{zR} = b_{dR} \cdot b_e \cdot k_{Fe,n} \cdot l = 10,67 \cdot 12,53 \cdot 1,8 \cdot 191,5 = 46084,7 \text{ mm}^3$$

$$m_{zR} = V_{zR} \cdot \rho_{Fe} = 46084,7 \cdot 7,76 \cdot 10^{-6} = 0,358 \text{ kg}$$

$$\rho_{Fe} = 7,76 \text{ g/cm}^3 \quad \text{material } 400-50A$$

$$B_{zR} = 1,66 \text{ T}$$

$$B_{est,zR} = 1,7 \text{ T}$$

$$\rho_{zR} = 4,27 \text{ W/kg}$$

$$P_{Fe,zR} = k_{Fe,n} \cdot \rho_{zR} \cdot m_{zR} \cdot \left( \frac{B_{zR}}{B_{est,zR}} \right)^2 \cdot Q_R = 1,8 \cdot 4,27 \cdot 0,358 \cdot \left( \frac{1,66}{1,7} \right)^2 \cdot 22 = 53,62 \text{ W}$$

$$k_{Fe,n} = 1,6$$

$$V_{yR} = k_{Fe,n} \cdot l \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_{st}}{2} - \left( \frac{D_{st}}{2} - h_{yR} \right) \right)^2 = 1,6 \cdot 191,5 \cdot \pi \cdot \left( \frac{295,4}{2} - \left( \frac{295,4}{2} - 41,7 \right) \right)^2 =$$

$$= 962,1 \cdot (147,7 - 106)^2 = 1672986 \text{ mm}^3$$

$$m_{yR} = V_{yR} \cdot \rho_{Fe} = 1672986 \cdot 7,76 \cdot 10^{-6} = 12,98 \text{ kg}$$

$$B_{yR} = 0,84 \text{ T}$$

$$B_{est,yR} = 0,8 \text{ T}$$

$$\rho_{yR} = 1 \text{ W/kg}$$



$$P_{Fe,yr} = k_{Fe,n} \cdot f_{yr} \cdot m_{yr} \cdot \left( \frac{B_{yr}}{B_{st,yr}} \right)^2 = 1,6 \cdot 1 \cdot 12,98 \cdot \left( \frac{0,84}{0,8} \right)^2 = \underline{22,9 \text{ W}}$$

$$P_{Fe,R} = P_{Fe,zR} + P_{Fe,yr} = 53,62 + 22,9 = \underline{76,52 \text{ W}}$$

$$P_{Fe} = P_{Fe,s} + P_{Fe,R} = 41,97 + 76,52 = \underline{118,49 \text{ W}} \quad \text{skupne izgube v železu}$$

Izgube v železu predstavljajo 0,16 %

## UPORNOST V ALUMINIJU - KRATKOSTIČNA KLETKA

2D analiza (v FEMM) ne upošteva upornosti kratkostičnih obročev. Ker te upornosti niso zanemarljive jih moramo prav tako upoštevati v modelu.

Uplivajo tudi na električne razmere v rotorju.

$$R_{ko} = \frac{\rho_{Al} \cdot \gamma_p}{2 \cdot A_p} \quad \text{upornost kratkostičnih obročev}$$

$$\rho_{Al} = 0,02903 \cdot 10^{-6} \Omega/m \quad \text{spec. } \overset{\text{upornost?}}{\text{gostota aluminija}}$$

$$r_{ko} = \frac{D_R}{2} - \frac{h_R}{2} = \frac{162,6}{2} - \frac{15,59}{2} = \underline{73,5 \text{ mm}} \quad \text{polmer kratkostičnega obroča}$$

$$A_p = S_{ur} = 195,3 \text{ mm}^2 \quad \text{površina palice}$$

$$R_{ko} = \frac{0,02903 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0735 \cdot \frac{\pi}{2}}{2 \cdot 0,0001953} = \underline{8,6 \mu\Omega}$$

$$\gamma_p = \frac{2\pi}{2 \cdot p_p} = \frac{\pi}{2}$$

$$R_p = 2 \cdot \frac{\rho_{Al} \cdot l}{A_p} = \frac{0,02903 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1915}{0,0001953} \cdot 2 = \underline{56,9 \mu\Omega} \quad \text{zaporedna upornost dveh palic}$$

$$R_{sk} = R_{ko} + R_p = 8,6 + 56,9 = \underline{65,5 \mu\Omega} \quad \text{skupna upornost}$$

Faktor za katerega potem v programu povečamo specifično upornost materiala, uporabljenega za kratkostično kletko

$$k_R = \frac{R_{sk}}{R_p} = \frac{65,5}{56,9} = \underline{1,15}$$

Na ta način se pri izračunu toka v kratkostični kletki navidezno upošteva tudi upornost kratkostičnih obročev.

$$P_{KK} = k_R \cdot \rho_{Al, 20^\circ C} = k_R \cdot \frac{1}{\sigma_{Al, 20^\circ C}} = 1,15 \cdot \frac{1}{34,45 \cdot 10^6} = \underline{0,0334 \cdot 10^{-6} \Omega m}$$

$$\sigma_{KK} = \frac{1}{P_{KK}} = \frac{1}{0,0334 \cdot 10^{-6}} = \underline{29,94 MS/m} \quad \text{spec. upornost} \quad \text{specifična prevodnost (za FEMM)}$$

Izračunamo še skupno upornost kratkostične kletke pri delavni temperaturi.

$$\alpha_{Al} = \underline{0,0049 K^{-1}} \quad \text{temperaturni koeficient upornosti za aluminij}$$

$$R_{KK} = R_{sk} \cdot (1 + \Delta T \cdot \alpha_{Al}) = 65,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 60 \cdot 0,0049) = \underline{84,7 \mu\Omega}$$

skupna upornost k.k. pri delavni temperaturi  $80^\circ C$