

Proiect

Mașini electrice 2

Mașina de inducție cu rotor în scurtcircuit

Date cunoscute:

$$m := 3 \quad U_N := 400 \quad [V] \quad f_1 := 50 \quad [Hz]$$

$$\text{Tip conexiune : } Y \text{ (stea)} \quad \text{Clasă de izolație : } F \text{ (max. } 120^\circ\text{C)}$$

$$\text{Grupa de protecție: } IP 44 \quad \text{Serviciul: } S1 \text{ (continuu)} \quad \text{Condiții de funcționare: normale}$$

$$P_N := 5.5 \text{ [kW]} \quad n_N := 2920 \text{ [rot/min]} \quad i_p := 7 \quad m_p := 2 \quad m_m := 2.2$$
$$n_1 := 3000 \text{ [rot/min]}$$

1.1 Determinarea mărimilor de calcul ale mașinii

$$p := \frac{60 \cdot f_1}{n_1} = 1 \quad \text{deci nr. de poli : } 2 \cdot p = 2$$

$$\eta := 0.87 \quad \cos\varphi := 0.89$$

$$S_N := \frac{P_N \cdot 1000}{\eta \cdot \cos\varphi} = 7103.19 \quad [VA]$$

$$I_N := \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad I_N := \frac{P_N \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = 10.25 \quad [A]$$

Tensiunea electromotoare si tensiunea de alimentare

$$U_1 := \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 230.94 \quad [V] \quad \text{-pentru conexiunea } Y \text{ (stea)}$$

$$k_E := 0.97 \quad k_E = \frac{U_1}{E_1} \text{ deci} \quad E_1 := k_E \cdot U_1 = 224.01 \quad [V]$$

$$S_i := k_E \cdot S_N = 6890.09 \quad [V] \text{ -putere aparentă interioare}$$

1.2 Calculul dimensiunilor principale

$$k_\omega := 0.92 \quad \text{- factorul de înfășurare pentru armonica fundamentală}$$

$$k_{sd} := 1.3 \quad \text{- coeficientul de saturație magnetică parțial al dinților}$$

$$k_B := 1.09 \quad \text{- factorul de formă al t.e.m}$$

$$\alpha_i := 0.71 \quad \text{- coeficientul de acoperire ideală a pasului polar}$$

Coeficient de utilizare

$$D_{init} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot p}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{60 \cdot S_i}{n_1 \cdot C}}$$

$$S_i := m \cdot E_1 \cdot I_N = 6890.09 \quad [V] \text{ -putere aparentă interioare (verificare)}$$

$$C := 130 \quad [J/dm^3] \text{ - Coeficient de utilizare}$$

$$\lambda := 0.4 \quad \text{- raport de formă pentru mașină}$$

Deci diametrul D va fi :

$$D_{init} := \sqrt[3]{\frac{2 \cdot p}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{60 \cdot S_i}{n_1 \cdot C}} = 1.19 \quad [dm]$$

Calculul diametrelor statorului

$$k_D := 1.68 \quad \text{Din tabelul 1.1 în funcție de nr. de poli}$$

$$D_{ext_init} := k_D \cdot D_{init} = 2 \quad [dm]$$

$$D_e := 21 \quad [cm] \text{ - diametru exterior al statorului (din fig 1.2)}$$

Se recalculează diametrul interior D :

$$D := \frac{D_e}{k_D} = 12.5 \quad [cm] \Rightarrow D := 12.5 \quad [cm]$$

$$\tau := \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 19.63 \quad [cm] \text{ - pasul polar}$$

Calculul lungimilor mașinii asincrone

$$l_i = \frac{60 \cdot S_i}{k_B \cdot k_\omega \cdot \alpha_1 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot n_1 \cdot A \cdot B_\delta} \quad [m] - \text{Lungimea ideală a mașinii asincrone}$$

$$\left. \begin{array}{l} B_\delta := 0.59 \quad [T] - \text{Inducția maximă în întrefier} \\ A := 260 \quad [A/cm] - \text{pătrunderea de curent} \end{array} \right\} \text{solicitări electromagnetice}$$

Deci lungimea ideală a mașinii asincrone este :

$$l_i := \frac{60 \cdot S_i}{k_B \cdot k_\omega \cdot \alpha_i \cdot \pi^2 \cdot (10^{-2} \cdot D)^2 \cdot n_1 \cdot 10^2 \cdot A \cdot B_\delta} = 0.082 \quad [m] - \text{lungimea ideală}$$

$$\lambda := \frac{l_i \cdot 100}{\tau} = 0.41668$$

Geometria miezului

$$l_g := l_i = 0.08$$

$$l_{Fe} := l_i = 0.08$$

1.3 Determinarea lățimii de întrefier

$$\delta := 3 \left(4 + 0.7 \cdot \sqrt{D \cdot 100 \cdot l_g} \right) \cdot 10^{-2} = 0.33 \quad [mm]$$

$$\delta := 0.3 \quad [mm]$$

1.4 Solicitățile electromagnetice ale mașinii asincrone

Solicitările electrice

$$J_1 := 6.5 \quad [A/mm^2] - \text{densitatea de curent în înfășurarea statorului}$$

$$J_b := 4.5 \quad [A/mm^2] - \text{densitatea de curent în înfășurarea rotorului}$$

Solicitările magnetice

Valorile recomandate, ale inducțiilor în diferitele porțiuni ale circuitului magnetic sunt:

a) în jugul statoric: $B_{j1} := 1.45 \quad [T]$

b) în jugul rotoric: $B_{j2} := 1.4 \quad [T]$

c) în dinții statorului:

- creștături cu pereți paraleli:

- în secțiunea minimă a dintelui: $B'_{d1max} := 2 \quad [T]$

- în secțiunea medie a dintelui: $B'_{d1mad} := 1.6 \quad [T]$

- dinți cu pereți paraleli: $B'_{d1} := 1.5 \quad [T]$

c) în dinții rotorului:

- creștături cu pereți paraleli:

- în secțiunea minimă a dintelui: $B'_{d2max} := 1.8 \quad [T]$

- în secțiunea medie a dintelui: $B'_{d2mad} := 1.7 \quad [T]$

- dinți cu pereți paraleli: $B'_{d2} := 1.6 \quad [T]$

1.5 Infășurările și creștăturile statorului

$$k_{w1} := 0.92 \quad \tau = 19.63$$

$$q_1 := 5 \quad - \text{numărul de creștături pe pol și fază}$$

$$y_\tau := m \cdot q_1 = 15$$

- pasul diametral între creștături

$$y_1 := y_\tau \cdot \frac{5}{6} = 12.5$$

- pasul principal

$$\beta_y := \frac{y_1}{y_\tau} = 0.83$$

13

Numărul de creștături ale statorului

$$q_1 := 5$$

- numărul de creștături pe pol și fază

$$Z_1 := 2 \cdot p \cdot m \cdot q_1 = 30$$

- numărul de creștături statorice

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = 1.31 \quad [\text{cm}]$$

- pas dentar

$$0.05 \cdot \tau = 0.98$$

$$0.2 \cdot \tau = 3.93$$

Elementele înfășurării statorului

$$\phi := \alpha_i \cdot \tau \cdot l_i \cdot \frac{B_\delta}{100} = 0.01 \quad [\text{Wb}] \quad - \text{flux}$$

$$w_1 := \frac{k_E \cdot U_1}{4 \cdot k_B \cdot f_1 \cdot k_{w1} \cdot \phi} = 165.98 \quad - \text{numărul de spire pe fază}$$

$$a_1 := 1$$

- numărul de căi în paralel pe o fază

$$n_{c1} := \frac{2 \cdot m \cdot a_1 \cdot w_1}{Z_1} = 33.2$$

- numărul de conductoare efective

Deci =>

$$n_{c1} := 34$$

$$w_1 := \frac{Z_1 \cdot n_{c1}}{2 \cdot m \cdot a_1} = 170$$

- numărul real de spire pe fază

$$N_1 := Z_1 \cdot n_{c1} = 1020$$

- numărul total de conductoare ale înfășurării

$$I := \frac{I_N}{a_1} = 10.25$$

[A] - curentul pe o cale de curent

$$A := \frac{N_1 \cdot I}{\pi \cdot D} = 266.3$$

$\left[\frac{A}{cm} \right]$ - verificarea păturii de curent

$$\Phi := \frac{k_E \cdot U_1}{4 \cdot k_B \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{w1}} = 0.01$$

[Wb] - verificarea fluxului

$$B_{\delta 1} := \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot 10^{-2} \cdot l_i} = 0.58$$

[T] - verificarea valorii maxime a inducției în întrefier

Tipul înfășurării și dimensiunile creștăturii

A) Secțiunea conductorului

$$J_1 = 6.5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

$$S_{Cu1} := \frac{I_N}{a_1 \cdot J_1} = 1.58 \quad [mm^2]$$

- secțiunea conductorului efectiv

• Alegem varianta I din tabelul 1.3.

B) Dimensiunile conductorului și ale creștăturii

$$k_{Fe} := 0.95$$

- coeficient de împachetare

$$B'_{dadm} := 1.7 \quad [T]$$

- amplitudinea inducției
admisibilă în dintele statoric
cu pereți paraleli

$$b_{d1} := \frac{t_1 \cdot l_i \cdot B_\delta \cdot 10}{k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot B'_{dadm}} = 4.78 \quad [mm]$$

- lățimea constantă a dintelui
statoric

$$n_f := 1$$

- numărul total de conductoare
elementare din creștătură

$$n_{tot} := n_{c1} \cdot n_f = 34$$

- numărul total de conductoare
elementare în creștătură

$$k_u := 0.75$$

- coeficient de umplere

$$g_{iz} := 0.4 \quad [mm]$$

- grosimea izolației

$$d_c := \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Cu1}}{\pi \cdot n_f}} = 1.42 \quad [mm]$$

$$d_c := 1.4 \quad [mm]$$

- diametrul conductorului izolat al
înfășurării statorice

$$S_{cond} := \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 1.54 \quad [mm^2]$$

- secțiunea conductorului elementar

$$S_{Cu1} := n_f \cdot S_{cond} = 1.54 \quad [mm^2]$$

- secțiunea conductorului

$$d_{iz} := 1.479 \quad [mm]$$

- diametrul izolat al conductorului

$$S'_{cr} := \frac{n_{tot} \cdot d_{iz}^2}{k_u} = 99.164 \quad [mm^2]$$

- secțiunea netă a creștăturii

$$a_s := d_{iz} + 1.5 = 2.98 \quad [mm]$$

- deschiderea creștăturii

$$g_{iz} := 0.4 \quad [mm]$$

$$h_{pană} := 3 \quad [mm]$$

$$h_{istm1} := 1 \quad [\text{mm}]$$

$$S_{cr1util} := S'_{cr} = 99.164 \quad [\text{mm}^2]$$

$$b_{istm1} := d_{iz} + 2 \cdot g_{iz} = 2.28 \quad [\text{mm}]$$

- lățimea creștăturii satorice la vârful părții trapezoidale

$$b_{cr1v} := \frac{\pi}{Z_1} \cdot (D \cdot 10 + 2 \cdot h_{istm1} + 2 \cdot h_{pană} + 4 \cdot g_{iz}) - b_{d1} = 9.31 \quad [\text{mm}]$$

- înălțimea (radială) părții utile a creștăturii

$$h_{utilcr1} := \frac{\sqrt{(b_{cr1v} - 2 \cdot g_{iz})^2 + 4 \cdot S_{cr1util} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{Z_1}\right)} - (b_{cr1v} - 2 \cdot g_{iz})}{2 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{Z_1}\right)} = 10.33 \quad [\text{mm}]$$

- înălțimea (radială) dintelui satoric

$$h_{d1} := h_{utilcr1} + h_{istm1} + h_{pană} + 4 \cdot g_{iz} = 15.93 \quad [\text{mm}]$$

- lățimea creștăturii satorice la baza părții trapezoidale

$$b_{cr1b} := \frac{\pi}{Z_1} \cdot (D \cdot 10 + 2 \cdot h_{d1}) - b_{d1} = 11.64 \quad [\text{mm}]$$

- lățimea dintelui satoric în zona vârfului creștăturii trapezoidale

$$b_{d1v} := \frac{\pi}{Z_1} \cdot (D \cdot 10 + 2 \cdot h_{istm1} + 2 \cdot h_{pană}) - b_{cr1v} = 4.61 \quad [\text{mm}]$$

- lățimea dintelui satoric în zona bazei creștăturii trapezoidale

$$b_{d1b} := \frac{\pi}{Z_1} \cdot (D \cdot 10 + 2 \cdot h_{d1}) - b_{cr1b} = 4.78 \quad [\text{mm}]$$

- lățimea dintelui satoric în zona medie a înălțimii creștăturii trapezoidale

$$b_{d1m} := \frac{b_{d1b} + b_{d1v}}{2} = 4.7 \quad [\text{mm}]$$

- aria secțiunii nete a creștăturii satorice

$$S_{cr1util} := \frac{(b_{cr1v} - 2 \cdot g_{iz}) + (b_{cr1b} - 2 \cdot g_{iz})}{2} \cdot (h_{d1} - h_{istm1} - h_{pană} - 2 \cdot g_{iz}) = 107.73 \quad [\text{mm}^2]$$

$$h'_{j1} := \frac{D_e \cdot 10^{-2} - D \cdot 10^{-2}}{2} - h_{d1} \cdot 10^{-3} = 0.027 \text{ [m]}$$

$$B_{j1} := \frac{\Phi}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l_i \cdot h'_{j1}} = 1.59 \quad [\text{T}]$$

Valorile rapoartelor si dimensiunilor crescătorii

$$\beta_{a1} := \frac{b_{d1} \cdot 0.1}{t_1} = 0.37 \qquad \beta_{a2} := \frac{b_{d1} \cdot 0.1}{\tau} = 0.02 \qquad h_{d1} = 15.93$$

$$\beta_{a1} := \frac{h_{d1}}{b_{d1}} = 3.33$$

1.6 Infasurarile si crestaturile rotorului

$$Z_2 := 23$$

$$m_2 := Z_2 = 23$$

$$\alpha := p \cdot \frac{2 \cdot \pi}{Z_2} = 0.27 \qquad \text{- Unghiul de defazaj între curenți}$$

$$k_i := \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_1}\right)}{\frac{\pi \cdot p}{Z_1}} = 1 \qquad \text{- Factor de înfășurare}$$

- Dimensionarea infasurarii, crestaturilor si jugului magnetic ale rotorului
- Dimensionarea infasurarii (tip colivie simpla) in scurtcircuit si a crestaturilor rotorului
- T.E.M indusa intr-o bara (inclinata) a coliviei motorului

$$b_{i2} := t_1 = 1.31 \qquad k_E = 0.97 \qquad k_{Fe} = 0.95 \qquad \delta = 0.3 \quad [\text{mm}]$$

$$B_{d2} := 1.7 \quad [\text{T}] \qquad k_\omega = 0.92$$

$$k_{12} := \frac{D}{p \cdot b_{i2}} \cdot \sin\left(\frac{p \cdot b_{i2}}{D}\right) = 1$$

$$U_{e2} := \frac{k_E \cdot U_1}{2 \cdot k_\omega \cdot w_1} = 0.72 \quad [\text{V}]$$

$$U_{20} := \frac{k_E \cdot U_1 \cdot k_i}{2 \cdot k_\omega \cdot w_1} = 0.71 \quad [\text{V}]$$

$$b_{istm2} := 1.2 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Lățimea istmului creștăturii rotorului}$$

$$h_{istm2} := 1 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Înălțimea istmului creștăturii rotorului}$$

$$b_{cr2v} := \frac{\pi}{Z_2} \left(\left(1 - \frac{B_\delta}{k_{Fe} \cdot B_{d2}} \right) \cdot D \cdot 10 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{istm2} \right) = 10.48 \quad [\text{mm}]$$

- Lățimea barei coliviei rotorice la vârful creștăturii trapezoidale

Intensitatea curentului electric din bara (încalinată) a coliviei rotorului

$$k_{rot} := 1.1 \quad I_b := k_{rot} \cdot \frac{P_N \cdot 1000}{Z_2 \cdot U_{e2}} = 367.3 \quad J_{2b} := 5 \quad [\text{A/mm}]$$

Aria secțiunii ariei (încalinate) a coliviei rotorului

$$S_{bara} := \frac{I_b}{J_{2b}} = 73.46 \quad [\text{mm}]$$

Lățimea barei coliviei rotorice la vârful creștăturii trapezoidale

$$B_{d2} = 1.7 \quad [\text{T}]$$

$$b_{cr2v} := \frac{\pi}{Z_2} \cdot \left(\left(1 - \frac{B_\delta}{k_{Fe} \cdot B_{d2}} \right) \cdot D \cdot 10 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{istm2} \right) = 10.48 \quad [\text{mm}]$$

Lățimea barei coliviei rotorice la baza creștăturii trapezoidale și înălțimea creștăturii (dintelui) rotorului

$$h_{d2} := \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} \cdot \left(b_{cr2v} - \sqrt{b_{cr2v}^2 - \frac{4 \cdot \pi}{Z_2} \cdot S_{bara}} \right) + h_{istm2} = 8.8 \quad [\text{mm}]$$

$$h_{cr2} := h_{d2}$$

$$b_{cr2b} := b_{cr2v} - \frac{2 \cdot \pi}{Z_2} \cdot (h_{cr2} - h_{istm2}) = 8.35 \quad [\text{mm}]$$

Latimea dintelui rotor in zona varfului barei coliviei

$$b_{d2v} := \frac{\pi}{Z_2} \cdot (D \cdot 10 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{istm2}) - b_{cr2v} = 6.24 \quad [\text{mm}]$$

Latimea dintelui rotor in zona bazei crestaturii trapezoidale

$$b_{d2b} := \frac{\pi}{Z_2} \cdot (D \cdot 10 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{d2}) - b_{cr2b} = 6.24 \quad [\text{mm}]$$

Latimea dintelui statoric in zona medie a inaltimii crestaturii trapezoidale

$$b_{d2m} := \frac{b_{d2b} + b_{d2v}}{2} = 6.24 \quad [\text{mm}]$$

Aria sectiunii trapezoidale a barei coliviei rotorice

$$S_b := \frac{(b_{cr2v} + b_{cr2b}) \cdot (h_{cr2} - h_{istm2})}{2} = 73.46 \quad [\text{mm}^2]$$

$$I_i := \frac{I_b}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right)} = 1.349 \cdot 10^3$$

$$J_{2i} := 0.7 \cdot J_b = 3.15 \quad \left[\frac{A}{mm} \right] \quad S_{2i} := \frac{I_i}{J_{2i}} = 428.17$$

Diametrul exterior al rotorului

$$D_r := D - 2 \cdot \delta \cdot \frac{1}{10} = 12.44 \quad [\text{cm}] \quad t_2 := \frac{\pi \cdot D_r}{Z_2} = 1.7 \quad [\text{cm}] \quad l_{fe} := l_i$$

Verificari necesare

$$h'_{j2} := \frac{\phi}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l_i \cdot B_{j2}} = 0.03 \quad [\text{m}] \quad - \text{Înălțimea preliminară a jugului rotoric}$$

$$D_{ir} := D_r - 2 \cdot \left(\frac{h_{cr2}}{10} + h'_{j2} \cdot 100 \right) = 4.5 \quad [\text{cm}] \quad - \text{Diametrul interior al rotorului}$$

$$D_{ir} := 4.5 \quad [\text{cm}]$$

$$d_{cap_ax} := 38 \quad [\text{mm}]$$

$$d_{ax} := 1.1 \cdot d_{cap_ax} = 41.8 \quad [\text{mm}]$$

1.7 Calculul curentului de magnetizare

$$H := 50 \quad [\text{A/cm}] \quad l_i = 0.08 \quad [\text{m}]$$

$$U_{mm} := H \cdot l_i \cdot 10^2 = 409.08 \quad [\text{A}] \quad - \text{Tensiunea magnetomotoare}$$

A) Tensiunea electromotoare a întrefierului

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.257 \cdot 10^{-6} \quad [\text{H/m}]$$

$$\gamma_1 := \frac{\left(\frac{b_{istm1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{istm1}}{\delta}} = 4.58 \quad \gamma_2 := \frac{\left(\frac{b_{istm2}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{istm2}}{\delta}} = 1.78$$

$$k_{C1} := \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta \cdot 10^{-1}} = 1.12 \quad k_{C2} := \frac{t_2 \cdot 10}{t_2 \cdot 10 - \gamma_2 \cdot \delta} = 1.03$$

- Deci coeficientul total este:

$$k_C := k_{C1} \cdot k_{C2} = 1.15$$

$$\delta' := k_C \cdot \delta = 0.35$$

$$U_{m\delta} := 2 \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta' \cdot 10^{-3} = 324.95 \quad - \text{Tensiunea magnetomotoare a întrefierului}$$

B) Tensiunea electromotoare a dinților statorului, respectiv ai rotorului

$$B_{d1} := B'_{d1} = 1.5 \quad B_{d2} = 1.7$$

$$H_{d1} := 12 \quad [\text{A/cm}] \quad H_{d2} := 50 \quad [\text{A/cm}]$$

$$U_{md1} := 2 \cdot H_{d1} \cdot h_{d1} \cdot 10^{-1} = 38.23 \quad [\text{A}]$$

$$U_{md2} := 2 \cdot H_{d2} \cdot h_{d2} \cdot 10^{-1} = 88.02 \quad [\text{A}]$$

- Verificarea coeficientului partial de saturație magnetică

$$k_{sd} = 1.3 \quad - \text{Valoarea înainte de verificare}$$

$$k_{sd} := \frac{U_{m\delta} + U_{md1} + U_{md2}}{U_{m\delta}} = 1.39 \quad - \text{Nu depășește 25\% din valoarea de dinaintea verificării}$$

C) Tensiunea magnetomotoarea a jugului statoric, respectiv rotoric

$$B_{j1} := 1.45$$

$$B_{j2} := 1.4$$

$$H_{j1} := 9 \text{ [A/cm]}$$

$$H_{j2} := 7 \text{ [A/cm]}$$

$$\zeta_1 := 0.375$$

$$\zeta_2 := 0.4$$

$$L_{j1} := \frac{\pi \cdot (D_e - h'_{j1} \cdot 100)}{2 \cdot p} = 28.81 \text{ [cm]} \quad \text{- Lungimea media a liniei de câmp în jurul statorului}$$

$$L_{j2} := \frac{\pi \cdot (D_{ir} - h'_{j2} \cdot 100)}{2 \cdot p} = 2.21 \text{ [cm]} \quad \text{- Lungimea media a liniei de câmp în jurul rotorului}$$

$$U_{mj1} := \zeta_1 \cdot H_{j1} \cdot L_{j1} = 97.24 \text{ [A]}$$

$$U_{mj2} := \zeta_2 \cdot H_{j2} \cdot L_{j2} = 6.19 \text{ [A]}$$

Tensiunea magnetomotoare a circuitului magnetic pe o pereche de poli

$$U_{mcirc} := U_{m\delta} + U_{md1} + U_{md2} + U_{mj1} + U_{mj2} = 554.642 \text{ [A]}$$

$$k_s := \frac{U_{mcirc}}{U_{m\delta}} = 1.71 \quad \text{- Coeficient total de saturatie magnetica}$$

Curentul de funcționare în gol a motorului de inducție

$$I_\mu := \frac{p \cdot U_{mcirc}}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_\omega} = 1.31$$

$$I_{\mu procent} := \frac{I_\mu}{I_N} \cdot 100 = 12.81 \text{ \%}$$

1.8 Parametrii înfășurărilor mașinii asincrone

Tipuri de bobine și dimensiunile lor

$$t_{1med} := \frac{\pi \cdot (D \cdot 10 + h_{utilcr1})}{Z_1 \cdot 10} = 1.42 \quad [mm] \quad - \text{pas dentar mediu}$$

$$D = 12.5$$

$$R_{med} := y_1 \cdot \frac{t_{1med}}{2} = 8.86 \quad [mm] \quad - \text{raza medie}$$

$$A := 0 \quad [cm] \quad - \text{valoarea cotei A}$$

$$l_{fmed} := \pi \cdot R_{med} + A = 27.83 \quad [cm] \quad - \text{lungimea media frontală}$$

$$l_{wmed} := l_g + l_{fmed} = 27.91 \quad [cm] \quad - \text{lungimea medie a unei jumătăți de spire}$$

Determinarea rezistențelor înfășurărilor

A. Rezistența pe fază a înfășurării statorului

$$k_r := 1$$

$$\rho_{20} := \frac{1}{56} \quad \left[\Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \right]$$

$$\rho_{115} := 1.38 \cdot \rho_{20} = 0.02 \quad \left[\Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \right]$$

$$L_1 := 2 \cdot w_1 \cdot l_{wmed} \cdot 10^{-2} = 94.89 \quad [m]$$

$$R_1 := k_r \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{S_{Cu1} \cdot a_1} = 1.52 \quad [\Omega] \quad - \text{rezistența pe înfășurarea statorică}$$

B. Rezistența pe fază a înfășurării rotorului în scurtcircuit

$$m_2 := Z_2 = 23$$

$$I_2 := I_b = 367.3 \quad [A]$$

$$\rho_{20} := \frac{1}{32} = 0.03 \quad \left[\Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \right]$$

$$\rho_{115} := 1.35 \cdot \rho_{20} = 0.04 \quad \left[\Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \right]$$

$$\rho_b := \rho_{115} = 0.04 \quad \left[\Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \right]$$

$$\rho_i := \rho_{115} = 0.04 \quad \left[\Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \right]$$

$$D_r = 12.44 \quad [cm]$$

$$D_{isc} := D_r - 2 \cdot h_{d2} \cdot 10^{-1} = 10.68 \quad \text{- diametrul mediu al inelului de scurtcircuit al coliviei rotorice}$$

$$L_i := \frac{\pi \cdot D_{isc} \cdot 10^{-2}}{Z_2} = 0.01 \quad [m]$$

$$L_b := l_g = 0.08 \quad [m]$$

$$R_b := \rho_b \cdot \frac{L_b}{S_b} = 4.7 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega] \quad \text{- rezistența barei}$$

$$R_i := \rho_i \cdot \frac{L_i}{S_i} = 8.93 \cdot 10^{-8} \quad [\Omega] \quad \text{- rezistența inelului de scurtcircuitare}$$

$$R_2 := R_b + \frac{R_i}{2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right)^2} = 4.94 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega] \quad \text{- rezistența pe fază a rotorului în scurtcircuit}$$

Determinarea reactanțelor înfășurărilor

$$b_{cr1v} = 9.31 \quad [mm] \quad b_{istm1} = 2.28 \quad [mm] \quad \beta_y = 0.83$$

$$h_{utilcr1} = 10.33 \quad [mm] \quad h_{istm1} = 1 \quad [mm]$$

$$\lambda_{cr2} := \frac{h_{cr2} - h_{istm2}}{3 \cdot b_{cr2v}} = 0.25$$

$$k'_\beta := \frac{1 + 3 \cdot \beta_y}{4} = 0.88 \quad k_\beta := \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot k'_\beta = 0.91$$

$$\lambda_{c1} := \frac{h_{utilcr1}}{3 \cdot b_{cr1v}} \cdot k_\beta + \left(0.785 - \frac{b_{istm1}}{2 \cdot b_{cr1v}} + \frac{2 \cdot g_{iz}}{b_{cr1v}} + \frac{h_{istm1}}{b_{istm1}} \right) \cdot k'_\beta = 1.37$$

λ_c - permeanță specifică în creștătură

$$h_1 := h_{d1} - h_{pană} - h_{istm1} - 3 \cdot g_{iz} = 10.73 \quad [mm]$$

$$\rho_{d1} := 0.97$$

$$k_{01} := 1 - 0.033 \cdot \frac{b_{istm1}^2}{\delta \cdot t_1} = 0.56 \quad \sigma_{d1} := 0.0052$$

$$\lambda_{d1} := \frac{0.9 \cdot t_1 \cdot 10 \cdot (q_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot \rho_{d1} \cdot \sigma_{d1}}{k_C \cdot \delta} = 3.63$$

$$\lambda_{f1} := 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_i \cdot 100} \cdot (l_{fmed} - 0.64 \cdot \beta_y \cdot \tau) = 3.61$$

$$\lambda_1 := \lambda_{f1} + \lambda_{d1} + \lambda_{c1} = 8.61$$

$$X_{\sigma 1} := 0.158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_i \cdot 100}{p \cdot q_1} \cdot \lambda_1 = 3.22 \quad [\Omega] \quad \text{- reactanța de scăpări pe faza statorului}$$

$$I_\mu = 1.31$$

$$X_m := \frac{U_1 - I_\mu \cdot X_{\sigma 1}}{I_\mu} = 172.61 \quad [\Omega] \quad \text{- reactanța utilă a circuitului de magazinare}$$

Determinarea parametrilor electromagnetici

- factorul de raportare a înfășurării rotorice în scurtcircuit la rotor

$$w_1 = 170 \quad \text{- spire}$$

$$k_{i2} := \frac{D}{p \cdot b_{i2}} \cdot \sin \left(\frac{p \cdot b_{i2}}{D} \right) = 1$$

$$K := \frac{12 \cdot (k_{w1} \cdot w_1)^2}{Z_2 \cdot k_{i2}^2} = 12808.99$$

- rezistența electrică a materialului coliviei rotorice:

$$\rho_2 := \frac{1}{19} \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$$

- înălțimea inelului de scurtcircuitare a coliviei rotorice

$$h_{d2} := h_{d2} \cdot 10 = 88.02 \quad [mm]$$

$$h_{isc} := h_{d2} + 7 = 95.02 \quad h_{isc} = 95.02 \quad [mm]$$

- lățimea inelului de scurtcircuitare a coliviei rotorice

$$b_{isc} := \frac{S_{2i}}{h_{isc}} = 4.51 \quad [mm]$$

- valoarea finală a arie secțiunii inelului de scurtcircuitare a coliviei rotorice

$$S_i := b_{isc} \cdot h_{isc} = 428.17 \quad [mm^2]$$

- diametrul mediu al inelului de scurtcircuitare al coliviei rotorice

$$D_{i.sc} := D \cdot 10 - 2 \cdot \delta - h_{isc} = 29.38 \quad [mm]$$

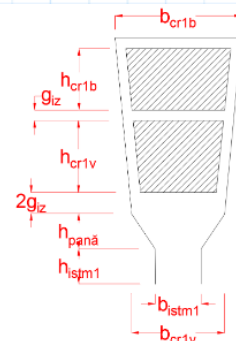
Determinarea reactanțelor înfășurării statorice:

- lățimea creștăturii statorice în planul de separație dintre cele două straturi

$$b_{cr1m} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (b_{cr1v}^2 + b_{cr1b}^2)} = 10.54$$

- înălțimea stratului superior (dinspre vârful creștăturii)

$$h_{cr1} := h_{d1} = 15.93$$



$$h_{cr1v} := \frac{b_{cr1m} - b_{cr1v}}{b_{cr1b} - b_{cr1v}} \cdot (h_{cr1} - h_{istm1} - h_{pană} - 4 \cdot g_{iz}) = 5.45$$

- înălțimea stratului superior (dinspre baza creștăturii)

$$h_{cr1b} := \frac{b_{cr1b} - b_{cr1m}}{b_{cr1b} - b_{cr1v}} \cdot (h_{cr1} - h_{istm1} - h_{pană} - 4 \cdot g_{iz}) = 4.88$$

$$K_{Cu} := 6 \cdot \frac{p \cdot y_1}{Z_1} + 1.67 = 4.17 \quad K_h := 6 \cdot \frac{p \cdot y_1}{Z_1} = 2.5$$

- permeanța geometrică specifică a scăpărilor în creștătură

$$\lambda_{cr1} := \frac{1}{4} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{h_{cr1b}}{b_{cr1b} + b_{cr1m}} + \frac{g_{iz}}{b_{cr1m}} + K_{Cu} \cdot \frac{h_{cr1v}}{b_{cr1m} + b_{cr1v}} \right) + \frac{1}{4} \cdot K_h \cdot \left(\frac{h_{pană} + 2 \cdot g_{iz}}{b_{cr1v}} + \frac{2 \cdot h_{pană}}{b_{cr1v} + b_{istm1}} + \frac{h_{istm1}}{b_{istm1}} \right)$$

$$\lambda_{cr1} = 1.19$$

- permeanța geometrică specifică a scăpărilor diferențiale:

$$\lambda_{d1} := \frac{t_1 \cdot 10}{11.9} \cdot \frac{k_{w1}^2}{k_C \cdot \delta} = 2.69 \quad [\text{cm}]$$

- permeanța geometrică specifică a scăpărilor în părțile frontale:

$$\lambda_{f1} := 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_i \cdot 100} \cdot \left(l_{fmed} - 0.64 \cdot \frac{y_1}{y_\tau} \cdot \tau \right) = 3.6059 \quad [\text{cm}]$$

- reactanței de scăpări pentru înfășurarea statorului mașinii de inducție

$$X_{\sigma 1} := 0.158 \cdot f_1 \cdot w_1^2 \cdot \frac{l_i \cdot 100}{p \cdot q_1} \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{cr1} \cdot \lambda_{d1} \cdot \lambda_{f1}) = 4.3 \quad [\Omega]$$

Determinarea reactanțelor coliviei rotorice:

- permeanța geometrică specifică a scăpărilor în creștătură:

$$b_{cr2} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (b_{cr2v}^2 + b_{cr2b}^2)} = 9.48 \quad - \text{lățimea medie a creștăturii rotorice}$$

$$\lambda_{cr2} := \left(\frac{h_{cr2} - h_{istm2}}{3 \cdot b_{cr2}} + \frac{h_{istm2}}{b_{istm2}} \right) = 1.11$$

- permeanța geometrică specifică a scăpărilor diferențiale:

$$\lambda_{d2} := \frac{10}{119} \cdot \frac{t_2 \cdot 10}{k_C \cdot \delta} = 4.13 \quad [\text{cm}]$$

- permeanța geometrică specifică a scăpărilor în părțile frontale:

$$\lambda_{f2} := \frac{2.3 \cdot D_{i.sc} \cdot 10^{-2}}{4 \cdot Z_2 \cdot l_i \cdot \left(\sin \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right) \right)^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot D_{i.sc} \cdot 10}{h_{isc} + 2 \cdot b_{isc}} \right) = 5.437$$

$$h_{isc} = 95.02$$

$$D_{i.sc} = 29.38$$

- expresia reactanței de scăpări pentru rotorul în scurtcircuit este:

$$X_{\sigma 2} := 7.9 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{cr1} \cdot \lambda_{d1} \cdot \lambda_{f1}) = 3.7156263373 \cdot 10^{-4} \quad [\Omega]$$

- expresia reactanței de scăpări pentru rotorul în scurtcircuit este:

$$X_m := \frac{U_1 - I_\mu \cdot X_{\sigma 1}}{I_\mu} = 171.53 \quad [\Omega]$$

- factorul de raportare a înfășurării în scurtcircuit la stator

$$K := \frac{12 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{Z_2} = 1.276 \cdot 10^4$$

- rezistența și reactanța de scăpări ale rotorului raportate la stator sunt:

$$R'_2 := K \cdot R_2 = 0.63 \quad [\Omega] \quad X'_{\sigma 2} := K \cdot X_{\sigma 2} = 4.742 \quad [\Omega]$$

Calculul pierderilor și randamentului mașinii asincrone

• Pierderi principale în fier:

- pierderi principale în fier în jurul statorului:

$$D_{ij1} := D + 2 \cdot \frac{h_{d1}}{10} = 15.69 \quad [\text{cm}]$$

$$D_{ej1} := D_e = 21 \quad [\text{cm}]$$

$$\gamma_{Fe} := 7.8 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$$

$$\rho_{10} := \frac{2.6}{50} = 0.05$$

$$l_{Fe} = 0.08$$

$$G_j := \gamma_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ej1}^2 - D_{ij1}^2) \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot 10^{-1} = 9.28 \quad [\text{kg}]$$

$$k_j := 1.3$$

$$p_{j1} := 2.4 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1.3} \cdot B_{j1}^2 = 5.05 \quad \left[\frac{W}{kg} \right]$$

$$P_{j1} := k_j \cdot p_{j1} \cdot G_j = 60.89 \quad [W]$$

- pierderi principale în fier în dinții statorului:

$$k_D := 1.8$$

$$p_{d1} := 2.4 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1.3} \cdot B_{d1}'^2 = 5.4 \quad \left[\frac{W}{kg} \right]$$

$$G_{d1} := h_{d1} \cdot b_{d1m} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot Z_1 \cdot \gamma_{Fe} \cdot 10^{-3} = 1.36 \quad [kg]$$

deci:

$$P_{d1} := k_D \cdot p_{d1} \cdot G_{d1} = 13.23 \quad [W]$$

- pierderi principale totale în fier

$$P_{Fepr} := P_{j1} + P_{d1} = 74.12 \quad [W]$$

• pierderi suplimentare în fier la funcționarea în gol

- pierderi de suprafață ale statorului

$$k_0 := 1.6$$

$$\frac{b_{istm2}}{\delta} = 4 \quad \text{deci:} \quad \beta_{01} := 0.25$$

$$B_{01} := \beta_{01} \cdot k_C \cdot B_{\delta} = 0.17 \quad [T]$$

$$p_{supr1} := \left(0.5 \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_1}{10^4} \right)^{1.5} \cdot (B_{01} \cdot t_2)^2 \right) \cdot 10 = 12.12 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$P_{supr1} := \left(2 \cdot p \cdot \left(\frac{t_1 \cdot 10 - a_s}{t_1 \cdot 10} \right) \cdot \tau \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot p_{supr1} \right) \cdot 10 = 285.73 \quad [W]$$

- pierderi de pulsație în dinții statorului

$$\frac{b_{istm1}}{\delta} = 7.6$$

$$k_0 := 1.6 \quad k'_0 := 0.1$$

$$\beta_{02} := 0.36 \quad B_{02} := \beta_{02} \cdot k_C \cdot B_\delta = 0.25 \quad [T]$$

deci:

$$p_{supr2} := 0.5 \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_1}{10^4} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2 = 1.49 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$P_{supr2} := 2 \cdot p \cdot \left(\frac{t_2 \cdot 10 - a_s}{t_2 \cdot 10} \right) \cdot \tau \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot p_{supr2} \cdot 10 = 37.54 \quad [W]$$

$$B_{puls1} := \frac{\gamma_2 \cdot \delta \cdot 10^{-1}}{2 \cdot t_1} \cdot B_{d1} = 0.03 \quad [T]$$

$$P_{puls1} := k'_0 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_1}{10^4} \cdot 10 \cdot B_{puls1} \right)^2 \cdot G_{d1} = 0.61 \quad [W]$$

- pierderi de pulsație în dinții rotorici

$$B_{puls2} := \frac{\gamma_1 \cdot \delta \cdot 10^{-1}}{2 \cdot t_2} \cdot B_{d2} = 0.07 \quad [T]$$

$$G_{d2} := h_{d2} \cdot b_{d2m} \cdot l_{Fe} \cdot Z_2 \cdot \gamma_{Fe} \cdot 10^{-3} = 8.06 \quad [kg]$$

$$P_{puls2} := 0.1 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10^4} \cdot B_{puls2} \right) \cdot G_{d2} = 0.5 \quad [W]$$

$$P_{Fe} := P_{Fepr} + P_{supr1} + P_{puls1} + P_{supr2} + P_{puls2} = 398.5 \quad [W]$$

- pierderi în înfășurarea statorului

$$P_{el1} := m \cdot R_1 \cdot I_N^2 = 479.01 \quad [W]$$

- pierderi în înfășurarea rotorului

$$P_{el2} := m_2 \cdot R_2 \cdot I_b^2 = 153.27 \quad [W]$$

- pierderi electrice principale totale

$$P_{el} := P_{el1} + P_{el2} = 632.27 \quad [W]$$

- pierderi mecanice prin frecare și ventilație

$$P_{mec} := 1.2 \cdot 2 \cdot p \cdot \left(\frac{\tau}{10} \right)^3 \cdot 11 = 199.85 \quad [W]$$

- pierderi suplimentare în fier

$$P_{SFe} := 0.0005 \cdot P_N \cdot 10^3 = 2.75 \quad [W]$$

- pierderi totale

$$P_{tot} := P_{Fe} + P_{el} + P_{mec} + P_{SFe} = 1233.37 \quad [W]$$

$$P_{totkW} := P_{tot} \cdot 10^{-3} = 1.23 \quad [kW]$$

• Randamentul mașinii la funcționarea nominală

$$P_N = 5.5 \quad [kW]$$

$$\eta_N := \frac{P_N}{P_N + P_{totkW}} = 0.82 \quad [\%]$$

1.9 Calculul caracteristicilor mașinii asincrone cu parametrii constanți

- componenta activă a curentului de funcționare în gol:

$$P_{el0} := m \cdot R_1 \cdot I_\mu^2 = 7.86 \quad [W] \quad I_{0a} := \frac{P_{Fe} + P_{mec} + P_{el0}}{m \cdot U_1} = 0.87$$

- curentul de funcționare în gol

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_\mu^2} = 1.58 \quad [A]$$

- factor de putere la funcționarea în gol

$$\cos \varphi_0 := \frac{I_{0a}}{I_0} = 0.55$$

- Curentul absorbit

$$c_1 := 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m} = 1.03$$

$$R_k := c_1 \cdot R_1 + c_1^2 \cdot R'_2 = 2.22 \quad [\Omega]$$

$$X_k := c_1 \cdot X_{\sigma 1} + c_1^2 \cdot X'_{\sigma 2} = 9.39 \quad [\Omega]$$

$$I''_{2k} := \frac{U_N}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = 41.48 \quad [A]$$

$$I'_{2k} := c_1 \cdot I''_{2k} = 42.51 \quad [A]$$

$$\cos \varphi_{2k} := \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = 0.23$$

$$I'_{2ka} := I'_{2k} \cdot \cos \varphi_{2k} = 9.78 \quad [A]$$

$$\sin \varphi_{2k} := \frac{X_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = 0.97$$

$$I'_{2kr} := I'_{2k} \cdot \sin \varphi_{2k} = 41.37 \quad [A]$$

$$I_{1k} := \sqrt{(I_{0a} + I'_{2ka})^2 + (I_{\mu} + I'_{2kr})^2} = 44 \quad [A]$$

- alunecarea nominală

$$I'_{2N} := \frac{Z_2}{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{w1}} \cdot I_b = 9 \quad [A]$$

$$s := \frac{n_1 - n_N}{n_1} = 0.03$$

$$s_N := \frac{R'_2 \cdot I'_{2N}}{k_E \cdot U_1} = 0.03$$

- factor de putere nominală

$$I'_{2aN} := \frac{U_1 \cdot \left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s_N} \right)}{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s_N} \right)^2 + \left(X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2} \right)^2} = 7.67 \quad [A]$$

$$I'_{2rN} := \frac{U_1 \cdot \left(X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2} \right)}{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s_N} \right)^2 + \left(X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2} \right)^2} = 2.597 \quad [A]$$

$$I_{1N} := \sqrt{\left(I_{0a} + I'_{2aN} \right)^2 + \left(I_{\mu} + I'_{2rN} \right)^2} = 9.39 \quad [A]$$

$$\cos \varphi_N := \frac{I_{0a} + I'_{2aN}}{I_{1N}} = 0.91$$

- Cuplu nominal

$$M_N := \frac{60 \cdot P_N \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot n_N} = 17.99 \quad [Nm]$$

$$c_1 := 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m} = 1.03$$

$$M := \frac{m \cdot p \cdot U_1^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left(\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2} \right)^2 \right)} = 15.75 \quad [Nm]$$