

## DATI DI SPECIFICA

Potenza	$P_n := 1500$	kW	Connessione fasi : Y
Tensione	$V_n := 6000$	V	Tipo rotore : rotore avvolto
Frequenza	$f := 50$	Hz	
Fattore di potenza	$\cos\phi := 0.86$		
N° coppie polari	$p := 2$		
Rendimento	$\eta := 0.96$		
Rapporto coppia	$\text{rapp}_C := 2.2$		

---

## DIMENSIONAMENTO E PROGETTO

### Determinazione delle dimensioni principali (D, L)

Potenza apparente	$P_{\text{app}} := \frac{P_n}{\eta \cdot \cos\phi}$	$P_{\text{app}} = 1.817 \times 10^3$	kVA
-------------------	---	--------------------------------------	-----

Rapporto di forma:	$\lambda := 0.96$
--------------------	-------------------

Coefficiente di stipamento lamierini	$k_{\text{st}} := 0.925$
--------------------------------------	--------------------------

Giri / min nominali	$n := 1500$	rpm
---------------------	-------------	-----

Data l'espressione del coefficiente di utilizzazione,  $C_u = \frac{P_{app} \cdot \pi^2}{4 \cdot p^2 \cdot \tau_p^3 \cdot n \cdot \lambda}$

determino il prodotto  $C_u \cdot \tau_p^3$   $C_{u\tau p3} := \frac{P_{app} \cdot \pi^2}{4 \cdot p^2 \cdot n \cdot \lambda}$   $C_{u\tau p3} = 0.778$

Cerco nella curva che dà il coefficiente di utilizzazione in funzione del passo polare per  $p = 2$  una coppia  $(C_u, \tau_p)$

tale che  $C_u \cdot \tau_p^3$  vale  $C_{u\tau p3} = 0.778$

Determino la coppia:  $\tau_p := 0.63 \text{ m}$   $C_u := 3.1$  che dà:  $C_u \cdot \tau_p^3 = 0.775$

Ridefinisco il passo polare in mm:  $\tau_p := 630 \text{ mm}$

Lunghezza di pacco corrispondente tramite fattore di forma:  $L_0 := \lambda \cdot \tau_p$   $L_0 = 604.8 \text{ mm}$

Diametro di alesatura:  $D := \frac{2 \cdot p \cdot \tau_p}{\pi}$   $D = 802.141 \text{ mm}$

Arrotondamento :  $D := 802 \text{ mm}$

Lunghezza di pacco effettiva (solo ferro):  $L_{fe} := L_0 \cdot k_{st}$   $\text{mm}$

Ricalcolo per verifica il fattore di utilizzazione con le dimensioni determinate:

$C_{u\_check} := \frac{P_{app}}{n \cdot (L_0 \cdot 10^{-3}) \cdot (D \cdot 10^{-3})^2} = 3.114$  verificando che sia coerente con quello fornito dalla curva per  $p = 2$  e  $\tau_p = 630$

---

## Dimensionamento del pacco (statore e rotore) e traferro

Lunghezza singolo pacchetto :  $L_{\text{pacchetto}} := 90 \quad \text{mm}$

Numero canali di ventilazione radiali:  $n_{\text{cv}} := \text{round}\left(\frac{L_0}{L_{\text{pacchetto}}} - 1\right) \quad n_{\text{cv}} = 6$

Larghezza canale di ventilazione  $b_{\text{cv}} := 8 \quad \text{mm}$

Lunghezza di pacco totale  $L_T := L_0 + n_{\text{cv}} \cdot b_{\text{cv}} \quad L_T = 652.8 \quad \text{mm}$

Arrotondamento al cm:  $L_T := 650 \quad \text{mm}$

Lunghezza di pacco netta (al netto dei canali):  $L_0 := L_T - n_{\text{cv}} \cdot b_{\text{cv}} \quad L_0 = 602 \quad \text{mm}$

Ricalcolo lunghezza pacchetto:  $L_{\text{pacchetto}} := \frac{L_0}{n_{\text{cv}} + 1} \quad L_{\text{pacchetto}} = 86 \quad \text{mm}$

Ricalcolo lunghezza di pacco effettiva (solo ferro)  $L_{\text{fe}} := L_0 \cdot k_{\text{st}} \quad L_{\text{fe}} = 556.85 \quad \text{mm}$

Traferro  $\theta := \frac{6 \cdot D}{1000 \cdot \sqrt{2} \cdot p} \quad \theta = 2.406 \quad \text{mm}$

Arrotondamento al decimo di mm:  $\theta := 2.4$

---

## Avvolgimento di statore

Trifase, a bobine in piattina embricate, regressivo, a doppio strato, a passo raccorciato

Determinazione del numero di cave per polo fase

Se  $q := 3$  trovo un passo cava di:  $\tau_c := \frac{\pi \cdot D}{6 \cdot p \cdot q}$   $\tau_c = 69.988$  mm

Se  $q := 4$  trovo un passo cava di:  $\tau_c := \frac{\pi \cdot D}{6 \cdot p \cdot q}$   $\tau_c = 52.491$  mm

Se  $q := 5$  trovo un passo cava di:  $\tau_c := \frac{\pi \cdot D}{6 \cdot p \cdot q}$   $\tau_c = 41.993$  mm

Se  $q := 6$  trovo un passo cava di:  $\tau_c := \frac{\pi \cdot D}{6 \cdot p \cdot q}$   $\tau_c = 34.994$  mm

Scelgo il numero di cave per polo/fase:  $q := 6$

Passo cava:  $\tau_c := \frac{\pi \cdot D}{6 \cdot p \cdot q}$   $\tau_c = 34.994$  mm

Numero di cave:  $Z := 6 \cdot p \cdot q$   $Z = 72$  cave

Numero di cave per polo:  $Q := 3 \cdot q$   $Q = 18$  cave

Raccorciamento di passo in numero di cave:  $Z_{\text{racc}} := \text{round}\left(\frac{Q}{6}\right)$   $Z_{\text{racc}} = 3$  cave

Raccorciamento di passo in per unit del passo polare;  $r := \frac{Q - Z_{\text{racc}}}{Q}$   $r = 0.833$

Angolo elettrico di cava

$$\alpha := \frac{\pi}{Q} \quad \alpha = 0.175 \quad \text{rad elettrici}$$

Fattore di distribuzione:

$$k_{d1} := \frac{\sin\left(\frac{\alpha \cdot q}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad k_{d1} = 0.956$$

Fattore di raccorciamento

$$k_{r1} := \sin\left(r \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad k_{r1} = 0.966$$

Fattore di avvolgimento:

$$k_{a1} := k_{d1} \cdot k_{r1} \quad k_{a1} = 0.924$$

Induzione media per polo (primo tentativo):  $B'_{\theta.m} := 0.56 \quad \text{T}$

Flusso per polo:  $\Phi' := B'_{\theta.m} \cdot L_T \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p \cdot 10^{-3} \quad \Phi' = 0.229 \quad \text{wb}$

Tensione di fase nominale:  $E_n := \frac{V_n}{\sqrt{3}} \quad E_n = 3.464 \times 10^3 \quad \text{V}$

Numero di spire in serie per fase teorico:  $N'_s := \frac{E_n}{0.97 \cdot 4.44 \cdot f \cdot \Phi' \cdot k_{a1}}$   $N'_s = 75.955$

Scelta del numero di spire per bobina e del numero di circuiti in parallelo per fase:

Se  $N_{cp} := 1$  con  $N_{sb} := 3$  avrei  $\frac{Z}{3} \cdot \frac{N_{sb}}{N_{cp}} = 72$

con  $N_{sb} := 4$  avrei  $\frac{Z}{3} \cdot \frac{N_{sb}}{N_{cp}} = 96$

Se  $N_{cp} := 2$  con  $N_{sb} := 6$  avrei  $\frac{Z}{3} \cdot \frac{N_{sb}}{N_{cp}} = 72$

con  $N_{sb} := 7$  avrei  $\frac{Z}{3} \cdot \frac{N_{sb}}{N_{cp}} = 84$

Se  $N_{cp} := 4$  con  $N_{sb} := 12$  avrei  $\frac{Z}{3} \cdot \frac{N_{sb}}{N_{cp}} = 72$

con  $N_{sb} := 13$  avrei  $\frac{Z}{3} \cdot \frac{N_{sb}}{N_{cp}} = 78$

Scelgo  $N_{cp} := 1$  e  $N_{sb} := 3$

in quanto con tale scelta mi avvicino al numero di spire in serie per fase teorico e minimizzo il volume occupato dall'isolamento di spira

Ricalcolo il numero di spire in serie per fase :

$$N_s := \frac{Z \cdot N_{sb}}{3 \cdot N_{cp}} \quad N_s = 72$$

Ricalcolo il flusso per polo:

$$\Phi := \frac{E_n}{0.97 \cdot 4.44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{a1}} \quad \Phi = 0.242 \quad \text{wb}$$

Ricalcolo l'induzione media per polo al traferro:

$$B_{\theta m} := \frac{\Phi}{L_T \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p \cdot 10^{-3}} \quad B_{\theta m} = 0.591 \quad \text{T}$$

---

## Progetto della cava e della bobina di statore (piattina)

Induzione massima nel dente:  $B_{d\_max} := 1.78 \quad \text{T}$

Minima larghezza del dente:  $w_{d\_min} := \frac{\pi \cdot B_{\theta m} \cdot L_T \cdot \tau_c}{2 \cdot B_{d\_max} \cdot L_{fe}} \quad w_{d\_min} = 21.295 \quad \text{mm}$

Passo cava:  $\tau_c := \frac{\pi \cdot D}{Z} \quad \tau_c = 34.994 \quad \text{mm}$

Larghezza della cava al traferro:  $w_c := \tau_c - w_{d\_min}$   $w_c = 13.699$  mm

Larghezza dente al traferro:  $w_d := \tau_c - w_c$   $w_d = 21.295$  mm

Verifica del rapporto tra larghezza dente e larghezza cava (1.25 - 1.8):

$$\frac{w_d}{w_c} = 1.555$$

Bispessore di isolamento di conduttore (smalto amidico imidico)  $b_{is\_cond} := 0.15$  mm

Bispessore di isolamento di spira (nastro di vetro)  $b_{is\_sp} := 0.40$  mm

Bispessore di isolamento contro massa  
(5 nastrature mezze sovrapposte di nastro micato)  $b_{is\_cm} := 0.6 \cdot 5$   $b_{is\_cm} = 3$  mm

Bispessore nastratura protettiva di elettrovetro:  $b_{is\_ev} := 0.24$  mm

Bispessore del ricoprimento conduttivo in cava:  $b_{is\_rc} := 1.1$

Determinazione della larghezza di piattina

Tolleranza in cava in senso orizzontale:  $\delta_{toll\_h} := 0.3$  mm

Lasco cava-bobina in senso orizzontale:  $\delta_{lasco\_h} := 0.4$  mm

Larghezza teorica di piattina in base alla larghezza di cava e all'isolamento scelto:

$$b' := w_c - b_{is\_cond} - b_{is\_sp} - b_{is\_cm} - b_{is\_ev} - b_{is\_rc} - \delta_{toll\_h} - \delta_{lasco\_h} \quad b' = 8.109 \quad \text{mm}$$



Posso usare una sola piattina per spira in senso orizzontale, cioè:

Numero di piattine affiancate:  $N_{ceh} := 1$

Scelgo la larghezza di piattina da tabella standard:  $b := 8$  mm

Ridefinisco tolleranza e lasco:  $\delta_{toll\_h} := 0.31$   $\delta_{lasco\_h} := 0.4$  mm

Ricalcolo la larghezza di cava:

$w_c := b + b_{is\_cond} + b_{is\_sp} + b_{is\_cm} + b_{is\_ev} + b_{is\_rc} + \delta_{toll\_h} + \delta_{lasco\_h}$   $w_c = 13.6$  mm

Ricalcolo la larghezza del dente al traferro:

$w_d := \tau_c - w_c$   $w_d = 21.394$  mm

Ricalcolo il rapporto tra larghezza dente e cava al traferro;

$$\frac{w_d}{w_c} = 1.573$$

Determinazione del numero di piattine in parallelo e dell'altezza di piattina.

Densità di corrente:  $\sigma_1 := 3.5$  A / mm<sup>2</sup>

Corrente nominale:  $I_{n1} := \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\phi \cdot \eta}$   $I_{n1} = 174.827$  A

Corrente nominale di fase:  $I_{f1} := I_{n1}$  A

Corrente di spira:  $I_{sp} := \frac{I_{f1}}{N_{cp}}$   $I_{sp} = 174.827$  A

Sezione teorica di spira:  $S_{sp} := \frac{I_{sp}}{\sigma_1}$   $S_{sp} = 49.951$  mm<sup>2</sup>

Per avvicinarmi alla sezione teorica di spira scelgo:

Numero di piattine sovrapposte per spira:  $N_{cev} := 4$

Altezza singola piattina (da tabella)  $a := 1.6$  mm

Sezione netta singola piattina (da tabella):  $S_{ce} := 12.6$  mm<sup>2</sup>

Sezione di spira:  $S_{sp} := S_{ce} \cdot N_{cev} \cdot N_{ceh}$   $S_{sp} = 50.4$  mm<sup>2</sup>

Densità di corrente effettiva:  $\sigma_1 := \frac{I_{sp}}{S_{sp}}$   $\sigma_1 = 3.469$  A / mm<sup>2</sup>

Determinazione dell'altezza di cava

Altezza bietta:  $h_b := 2.5$  mm

Altezza intaglio:  $h_t := 1$  mm

Tolleranza e lasco in senso verticale:  $\delta_{toll\_v} := 0.32$   $\delta_{lasco\_v} := 0.4$  mm

Altezza di cava:  $h_c := 2 \cdot [N_{sb} \cdot [N_{cev} \cdot (a + b_{is\_cond}) + b_{is\_sp}] + b_{is\_cm} + b_{is\_ev} + b_{is\_rc}] + h_b + h_t + \delta_{toll\_v} + \delta_{lasco\_v}$   $h_c = 57.3$  mm

Verifico il rapporto tra altezza e larghezza di cava:  $\frac{h_c}{w_c} = 4.213$

---

## Giogo e diametro esterno di statore

Induzione massima nel giogo:  $B_{g\_max} := 1.34$  T

Altezza del giogo:  $h_g := \frac{\Phi}{2 \cdot B_{g\_max} \cdot L_{fe} \cdot 10^{-3}} \cdot 10^3$   $h_g = 162.104$

Diametro esterno statore:  $D_{1\_max} := D + 2 \cdot h_c + 2 \cdot h_g$   $D_{1\_max} = 1.241 \times 10^3$  mm

Arrotondamento al centimetro:  $D_{1\_max} := 1240$  mm

---

## Gabbia e cave di rotore

Gabbi di scoiattolo in alluminio con cava semichiusa.

Altezza ponticello:  $h_{t2} := 1$  mm

Diametro esterno di rotore:  $D_{2\_ext} := D - 2 \cdot \theta$   $D_{2\_ext} = 797.2$  mm

Numero di cave:  $Z_2 := Z + 4 \cdot p$   $Z_2 = 80$

Induzione massima nel dente di rotore;  $B_{d2max} := 1.6$  T

Passo cava:  $\tau_{c2} := \frac{\pi \cdot D_{2\_ext}}{Z_2}$   $\tau_{c2} = 31.306$  mm

Larghezza dente:  $w_{d2} := \frac{\pi \cdot B_{\theta m} \cdot L_T \cdot \tau_{c2}}{2 \cdot B_{d2max} \cdot L_{fe}}$   $w_{d2} = 21.194$  mm

Diametro massimo circonferenza di raccordo:  $d_{max} := \frac{D_{2\_ext} \cdot (\tau_{c2} - w_{d2}) - 2 \cdot h_{t2} \cdot \tau_{c2}}{D_{2\_ext} + \tau_{c2}}$   $d_{max} = 9.654$  mm

Sezione di rame totale:  $S_{cu\_tot} := 2 \cdot Z \cdot N_{sb} \cdot S_{sp}$   $S_{cu\_tot} = 2.177 \times 10^4$  mm<sup>2</sup>

Sezione di barra:  $S_{barra} := \frac{S_{cu\_tot}}{Z_2}$   $S_{barra} = 272.16$  mm<sup>2</sup>

$d_{min} := 2$  "initial guess value"

Given

$$\left[ \frac{D_{2\_ext}}{2} - \frac{d_{max}}{2} - h_{t2} - \frac{D_{2\_ext} \cdot (d_{min} + w_{d2})}{2 \cdot \tau_{c2}} \right] \cdot \left( \frac{d_{min} + d_{max}}{2} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot d_{max}^2 + \frac{\pi}{8} \cdot d_{min}^2 = S_{barra}$$

$$\frac{1}{1.6} = 0.625$$

$d_{min} := \text{Find}(d_{min})$   $d_{min} = 7.739$  mm

Altezza h2 tra centri circonferenze di raccordo:  $h_2 := \frac{D_{2\_ext}}{2} - \frac{d_{max}}{2} - h_{t2} - \frac{D_{2\_ext} \cdot (d_{min} + w_{d2})}{2 \cdot \tau_{c2}}$   $h_2 = 24.381$  mm

Altezza cava:  $h_{c2} := h_2 + \frac{d_{min}}{2} + \frac{d_{max}}{2} + h_t$   $h_{c2} = 34.078$  mm

Angolo elettrico tra barre:  $\alpha_b := \frac{2 \cdot \pi}{Z_2} \cdot p$   $\alpha_b = 0.157$  rad elt

Sezione anello:  $S_{anello} := \frac{0.65}{\sin\left(\frac{\pi}{Z_2} \cdot p\right)} \cdot S_{barra}$   $S_{anello} = 2.255 \times 10^3$  mm<sup>2</sup>

Altezza anello (in senso radiale) assunta doppia dell'altezza di barra:

$$h_{\text{anello}} := 2 \left( h_2 + \frac{d_{\text{min}}}{2} + \frac{d_{\text{max}}}{2} \right) \quad h_{\text{anello}} = 66.156 \quad \text{mm}$$

Lunghezza anello (in senso assiale):

$$L_{\text{anello}} := \frac{S_{\text{anello}}}{h_{\text{anello}}} \quad L_{\text{anello}} = 34.082 \quad \text{mm}$$

## Giogo e diametro interno di rotore

Induzione massima nel giogo:

$$B_{g2\_max} := 1.6 \quad \text{T}$$

Altezza del giogo:

$$h_{g2} := \frac{\Phi}{2 \cdot B_{g2\_max} \cdot L_{fe}} \cdot 10^3 \quad h_{g2} = 135.762 \quad \text{mm}$$

Diametro interno massimo di rotore:

$$D_{2int\_min} := D_{2\_ext} - 2 \cdot h_{c2} - 2 \cdot h_{g2} \quad D_{2int\_min} = 457.52 \quad \text{mm}$$

## CALCOLO E VERIFICA

### Calcolo della corrente magnetizzante

#### Calcolo delle amperspire al traferro

Coefficiente di Carter per lo statore (rotore liscio):

$$k_{C1} := \frac{\frac{\tau_c}{w_c}}{\frac{\tau_c}{w_c} - \frac{\frac{w_c}{\theta}}{5 + \frac{w_c}{\theta}}} \quad k_{C1} = 1.26$$

Coefficiente di Carter complessivo:

$$k_C := k_{C1} \quad k_C = 1.26$$

Coefficiente di ventilazione (canali di statore e di rotore affacciati)

$$k_V := \left( 1 - \frac{n_{cv} + 1}{L_T + b_{cv}} \cdot \frac{2 \cdot b_{cv}^2}{5 \cdot \theta + 2 \cdot b_{cv}} \right)^{-1} \quad k_V = 1.051$$

Valore di induzione al traferro di prima armonica:

$$B_{\theta 1} := \frac{\pi}{2} \cdot B_{\theta m} = 0.928 \quad T$$

Calcolo delle amperspire al traferro;

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad AS_{\theta} := \frac{B_{\theta 1}}{\mu_0} \cdot k_C \cdot k_V \cdot \theta \cdot 10^{-3} \quad AS_{\theta} = 2.348 \times 10^3 \quad A$$

#### Calcolo delle amperspire nei denti di statore

Larghezze del dente di statore a 1/6, 1/2 e 5/6 dell'altezza del dente:

$$W_{\min 1} := w_d \cdot \frac{\frac{D}{2} + \frac{h_c}{6}}{\frac{D}{2}} \quad W_{\min 1} = 21.903 \quad \text{mm}$$

$$W_{\text{med}1} := w_d \cdot \frac{\frac{D}{2} + \frac{h_c}{2}}{\frac{D}{2}} \quad W_{\text{med}1} = 22.922 \quad \text{mm}$$

$$W_{\max 1} := w_d \cdot \frac{\frac{D}{2} + \frac{5h_c}{6}}{\frac{D}{2}} \quad W_{\max 1} = 23.941 \quad \text{mm}$$

Induzione nel dente alle diverse altezze:

$$B_{\max 1} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_c \cdot L_T}{W_{\min 1} \cdot L_{fe}} \quad B_{\max 1} = 1.731 \quad \text{T}$$

$$B_{\text{med}1} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_c \cdot L_T}{W_{\text{med}1} \cdot L_{fe}} \quad B_{\text{med}1} = 1.654 \quad \text{T}$$

$$B_{\min 1} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_c \cdot L_T}{W_{\max 1} \cdot L_{fe}} \quad B_{\min 1} = 1.583 \quad \text{T}$$

Implementazione della caratteristica B-H per interpolazione:

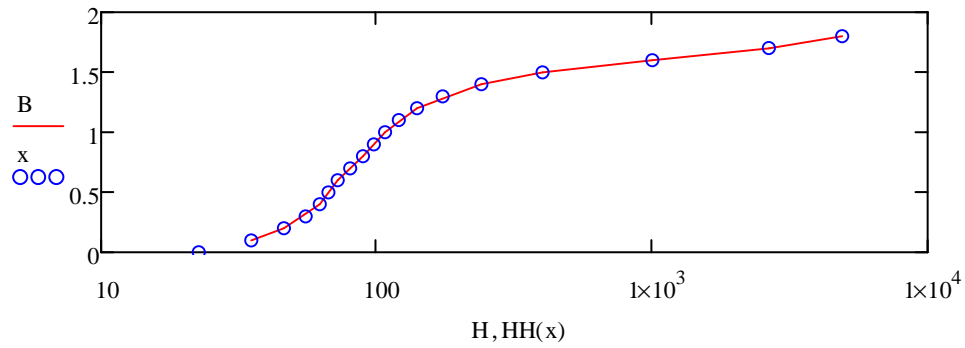
$B := \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 0.6 \\ 0.8 \\ 1 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.6 \\ 1.7 \\ 1.8 \end{pmatrix}$ 
 $H := \begin{pmatrix} 35 \\ 46 \\ 62 \\ 72 \\ 89 \\ 107 \\ 140 \\ 240 \\ 400 \\ 1000 \\ 2650 \\ 4900 \end{pmatrix}$

$\tau$       A / m      Campioni presi dalla curva B-H del lamierino e usati per l'interpolazione

vs := cspline(B, H)

HH(x) := interp(vs, B, H, x)

x := 0, 0.1.. 1.8



In rosso: curva interpolante

Cerchi blu: punti (H,B) campione



Calcolo del campo magnetico H corrispondente alle varie induzioni nel dente:

$$H_{\max 1} := \text{HH}(B_{\max 1}) \quad H_{\max 1} = 3.309 \times 10^3 \quad \text{A / m}$$

$$H_{\text{med}1} := \text{HH}(B_{\text{med}1}) \quad H_{\text{med}1} = 1.765 \times 10^3 \quad \text{A / m}$$

$$H_{\min 1} := \text{HH}(B_{\min 1}) \quad H_{\min 1} = 833.75 \quad \text{A / m}$$

Calcolo delle amperspire:

$$AS_{d1} := (H_{\max 1} + H_{\text{med}1} + H_{\min 1}) \cdot \frac{h_c \cdot 10^{-3}}{3} \quad AS_{d1} = 112.833$$

### **Calcolo delle amperspire nei denti di rotore**

Larghezza minima del dente :  $w_{d2} = 21.194 \quad \text{mm}$

Induzione nel dente  $B_{d2} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_{c2} \cdot L_T}{w_{d2} \cdot L_{fe}} \quad B_{d2} = 1.6 \quad \text{T}$

Campo nel dente:  $H_{d2} := \text{HH}(B_{d2}) \quad H_{d2} = 1 \times 10^3 \quad \text{A / m}$

Calcolo delle amperspire:  $AS_{d2} := H_{d2} \cdot h_{c2} \cdot 10^{-3} \quad AS_{d2} = 34.078 \quad \text{A}$

### Calcolo delle amperspire nel giogo di statore

Induzione nel giogo di statore;  $B_{g1} := 0.85 \cdot \frac{\Phi}{h_g \cdot L_{fe}} \cdot 10^6$   $B_{g1} = 1.139$  T

Campo H nel giogo di statore:  $H_{g1} := HH(B_{g1})$   $H_{g1} = 126.791$  A / m

Lunghezza azimutale del giogo:  $L_g := \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_c + h_g)}{2 \cdot p}$   $L_g = 847.212$  mm

Calcolo delle amperspire:  $AS_{g1} := H_{g1} \cdot L_g \cdot 10^{-3}$   $AS_{g1} = 107.419$  A

### Calcolo delle amperspire nel giogo di rotore

Induzione nel giogo di rotore;  $B_{g2} := 0.85 \cdot \frac{\Phi}{h_{g2} \cdot L_{fe}} \cdot 10^6$   $B_{g1} = 1.139$  T

Campo H nel giogo di rotore:  $H_{g2} := HH(B_{g2})$   $H_{g2} = 208.103$  A/m

Lunghezza azimutale del giogo:  $L_{g2} := \frac{\pi \cdot (D_{2\_ext} - 2 \cdot h_{c2} - h_{g2})}{2 \cdot p}$   $L_{g2} = 465.962$  mm

Calcolo delle amperspire:  $AS_{g2} := H_{g2} \cdot L_{g2} \cdot 10^{-3}$   $AS_{g2} = 96.968$  A

### Calcolo della corrente magnetizzante

Valore massimo di fmm al traferro richiesta per sostenere il flusso;

$$AS_{\mu} := AS_{\theta} + AS_{d1} + AS_{d2} + \frac{1}{2} \cdot AS_{g1} + \frac{1}{2} \cdot AS_{g2} \quad AS_{\mu} = 2.597 \times 10^3 \quad A$$

Percentuale di amperspire totali che cade sul traferro;

$$\frac{AS_{\theta}}{AS_{\mu}} \cdot 100 = 90.407 \quad \%$$

Corrente magnetizzante di fase (valore efficace):

$$I_{\mu} := \frac{\pi \cdot AS_{\mu} \cdot N_{cp}}{6 \cdot \sqrt{2} \cdot N_{sb} \cdot q \cdot k_{a1}} = 57.831 \quad I_{\mu} := \frac{\pi \cdot AS_{\mu} \cdot p}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot N_s \cdot k_{a1}} = 57.831 \quad I_{\mu} = 57.831 \quad A$$

Corrente magnetizzante espressa in % della corrente nominale:

$$i_{\mu\%} := \frac{I_{\mu}}{I_{f1}} \cdot 100 \quad i_{\mu\%} = 33.079 \quad \% \quad \text{normale : 20 - 40 \%}$$

---

## Calcolo delle resistenze

### Resistenza di fase di statore

Distanze caratteristiche della testata

Sporto del tratto rettilineo dal pacco (esclusa piastra)  $\delta_3 := 0.6 \cdot \left( \frac{V_n}{\sqrt{3}} \right)^{0.541}$   $\delta_3 = 49.325$  mm

Distanza minima tra tratti obliqui della testata  $d'_{\min} := 2.4 + 4.5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{V_n}{\sqrt{3}}$   $d'_{\min} = 3.959$  mm

Confronto con la larghezza media del dente di statore:  $W_{\text{med1}} = 22.922$  mm

Definisco d pari a metà larghezza media di dente:  $d := \frac{W_{\text{med1}}}{2}$   $d = 11.461$  mm  $>$   $d'_{\min} = 3.959$

Altezza della bobina:  $\delta_1 := \frac{h_c - h_b - h_t}{2}$   $\delta_1 = 26.9$  mm

Inclinazione tratto obliquo:  $\alpha_m := \arccos\left(\frac{d}{\tau_c}\right)$   $\alpha_m \cdot \frac{180}{\pi} = 70.882$  gradi

Passo di bobina:  $\tau_b := \frac{\pi \cdot (D + h_c)}{2 \cdot p} \cdot r$   $\tau_b = 562.411$  mm

Lunghezza del tratto obliquo:  $\delta_{obl} := \frac{\tau_b}{2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{d}{\tau_c}\right)^2}}$   $\delta_{obl} = 297.621$  mm

Spessore piastra di pressione:  $\delta_{piastra} := 15$  mm

Lunghezza testata:  $L_{test} := 2 \cdot \delta_{piastra} + 2 \cdot \delta_3 + 2 \cdot \delta_{obl} + 2 \cdot \delta_1$   $L_{test} = 777.692$  mm

Lunghezza spira media:  $L_{sm} := 2 \cdot L_T + 2 \cdot L_{test}$   $L_{sm} = 2.855 \times 10^3$  mm

Resistività rame a 75°C:  $\rho_{Cu} := 0.01784 \cdot [1 + 0.00381 \cdot (75 - 20)]$   $\rho_{Cu} = 0.022$   $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m

Resistenza di fase in c.c.:  $R_{1cc} := \rho_{Cu} \cdot \frac{(L_{sm} \cdot 10^{-3}) \cdot N_s}{S_{sp} \cdot N_{cp}}$   $R_{1cc} = 0.088$   $\Omega$

### **Calcolo del coefficiente di resistenza e della resistenza in c.a.**

Altezza effettiva della piattina di statore:  $h := a$   $h = 1.6$  mm

Larghezza cava di statore:  $b_c := w_c$   $b_c = 13.6$  mm

Altezza ridotta della piattina di statore:  $\xi := h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_{ceh} \cdot b}{2 \cdot \rho_{Cu} \cdot b_c}}$   $\xi = 0.117$  mm

Numero di conduttori sovrapposti per cava:  $m' := 2 \cdot N_{sb} \cdot N_{cev}$   $m' = 24$

Coefficiente di resistenza per la parte di avvolgimento in cava:  $k_{r\_fe} := 1 + \frac{m^2 - 0.2}{9} \cdot \xi^4$   $k_{r\_fe} = 1.012$

Rapporto tra lunghezza fase in aria e lunghezza in cava:  $\lambda' := \frac{L_{sm} - 2 \cdot L_0}{2 \cdot L_0}$   $\lambda' = 1.372$

Coefficiente di resistenza considerando la parte in aria e quella in cava:  $k_r := 1 + \frac{m^2 - 0.2}{9 \cdot (\lambda' + 1)} \cdot \xi^4$   $k_r = 1.005$

Resistenza in corrente alternata:  $R_{1ca} := R_{1cc} \cdot k_r$   $R_{1ca} = 0.088 \quad \Omega$

### Resistenza di rotore

Lunghezza di barra:  $L_{barra} := L_T$   $L_{barra} = 650 \quad \text{mm}$

Altezza barra:  $h_{barra} := \frac{d_{min}}{2} + h_2 + \frac{d_{max}}{2}$   $h_{barra} = 33.078 \quad \text{mm}$

Resistività alluminio a 75°C:  $\rho_{Al} := 0.0282 \cdot [1 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot (75 - 20)] = 0.034 \quad \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$

$$R_{2cc} := \rho_{Al} \cdot \left[ \frac{L_{barra} \cdot 10^{-3}}{S_{barra}} + \frac{\pi \cdot (D_{2\_ext} - h_{anello}) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot Z_2 \cdot S_{anello} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_b}{2}\right)^2} \right] \quad R_{2cc} = 1.172 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

Rapporto di trasformazione:

$$m := \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot N_s \cdot k_{a1}}{\sqrt{Z_2}}$$

Resistenza riportata a statore:

$$R_{21} := R_{2cc} \cdot m^2 \qquad R_{21} = 0.078 \qquad \Omega$$


---

## Calcolo delle reattanze

### Reattanza principale

Reattanza principale satura:  $X_p := \frac{6 \cdot f \cdot N_s^2 \cdot k_{a1}^2 \cdot \Phi}{AS_{\mu} \cdot p} \qquad X_p = 61.793 \quad \Omega$

Calcolo con formula alternativa:  $\frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_{\mu} \cdot 0.97} = 61.753 \quad \Omega$

Reattanza principale non satura:  $X_{p\_u} := \frac{6 \cdot f \cdot N_s^2 \cdot k_{a1}^2 \cdot \Phi}{AS_{\theta} \cdot p} \qquad X_{p\_u} = 68.35 \quad \Omega$

### Reattanza di dispersione in cava dello statore

Coefficiente di riduzione della permeanza di cava nella zona conduttrice:

$$k_{Cu}(r') := (3 \cdot r' - 2) + 3 \cdot (1 - r') \cdot \frac{13}{16} \qquad r = 0.833 \qquad k_{Cu1} := k_{Cu}(r) \qquad k_{Cu1} = 0.906$$

Coefficiente di riduzione della permeanza di cava nella zona in aria:

$$k_{\text{aria}}(r') := (3 \cdot r' - 2) + 3 \cdot (1 - r') \cdot \frac{3}{4} \quad r = 0.833 \quad k_{\text{aria}1} := k_{\text{aria}}(r) \quad k_{\text{aria}1} = 0.875$$

Altezza delle bobine a meno del bispessore di isolamento contro massa (h1):

$$h_1 := h_c - h_t - h_b - 2 \cdot b_{\text{is\_cm}} \quad h_1 = 47.8 \quad \text{mm}$$

Distanza tra le parti conduttive delle bobine:  $h_5 := b_{\text{is\_cm}} \quad h_5 = 3 \quad \text{mm}$

Altezza di cava in aria sopra le parti conduttive delle bobine  $h_2 := \frac{b_{\text{is\_cm}}}{2} + h_b + h_t \quad h_2 = 5 \quad \text{mm}$

Permeanza di cava:  $\lambda_c := \frac{h_1}{3 \cdot w_c} \cdot k_{\text{Cu}1} + \frac{h_2}{w_c} \cdot k_{a1} + \frac{h_5}{4 \cdot w_c} \quad \lambda_c = 1.456$

Induttanza di dispersione in cava:  $L_c := 2 \cdot \mu_0 \cdot L_0 \cdot (10^{-3}) \cdot \frac{N_s^2}{p \cdot q} \cdot \lambda_c \quad L_c = 9.519 \times 10^{-4} \quad \text{H}$

Reattanza di dispersione in cava:  $X_c := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_c \quad X_c = 0.299 \quad \text{H}$

### **Reattanza di dispersione in cava del rotore**

Apertura di cava equivalente:  $c_2 := 2.5 \quad \text{mm}$

Permeanza di cava:  $\lambda_{c2} := 0.66 + \frac{h_2}{3 \cdot d_{\text{max}}} + \frac{h_{t2}}{c_2} \quad \lambda_{c2} = 1.233$



Induttanza di dispersione riportata a statore;  $L_{c21} := 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{Z_2^2}{p \cdot q} \cdot L_0 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_{c2}$   $L_{c21} = 9.946 \times 10^{-4}$

Reattanza di dispersione in cava:  $X_{c21} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{c21}$   $X_{c21} = 0.312 \quad \Omega$

### Reattanza di dispersione in testata per una fase di statore

Sporto rettilineo della testata:  $\delta_3 = 49.325$

Ingombro assiale della parte obliqua:  $\delta_2 := \frac{\tau_b}{2 \cdot \tan(\alpha_m)}$   $\delta_2 = 97.477 \quad \text{mm}$

Permeanza di testata:  $\lambda_t := 1.2 \cdot k_{a1}^2 \cdot \left( \frac{\delta_3}{L_T} + \frac{\delta_2}{2 \cdot L_T} \right)$   $\lambda_t = 0.154$

Induttanza di dispersione in testata:  $L_t := 8 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_s^2}{p} \cdot L_T \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_t$   $L_t = 2.616 \times 10^{-3} \quad \text{H}$

Reattanza di dispersione in testata:  $X_t := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_t$   $X_t = 0.822 \quad \Omega$

### Reattanza di dispersione in testata di rotore

Coefficiente empirico per calcolo dell'induttanza:  $\nu := 0.18$

Induttanza riportata a statore:  $L_{t21} := \mu_0 \cdot \frac{Z_2}{9 \cdot p^2} \left[ \nu \cdot \frac{\pi(D_{2\_ext} - h_{anello}) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot p} \right]$   $L_{t21} = 2.886 \times 10^{-7}$

Reattanza riportata a statore:  $X_{t21} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{t21}$   $X_{t21} = 9.067 \times 10^{-5}$

**Reattanza di dispersione al trafero per una fase di statore**

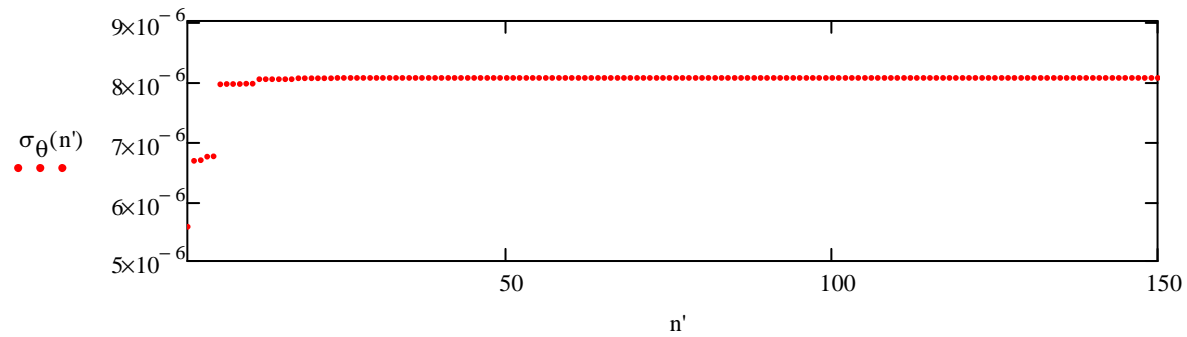
Fattore di distribuzione relativo all'armonica h:  $k_{dh}(h) := \frac{\sin\left(\frac{\alpha \cdot h \cdot q}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot h}{2}\right)}$

Fattore di raccorciamento relativo all'armonica h:  $k_{rh}(h) := \sin\left(\frac{r \cdot \pi \cdot h}{2}\right)$

Fattore di avvolgimento relativo all'armonica h:  $k_{ah}(h) := k_{dh}(h) \cdot k_{rh}(h)$

Coefficiente di riduzione della reattanza principale:  $\sigma_{\theta}(n) := \sum_{h=1}^n \left[ \frac{1}{6 \cdot h - 1} \cdot \frac{k_{ah}(6 \cdot h - 1)}{k_{a1} \cdot (6 \cdot h - 1)} \right]^2 + \left[ \frac{1}{(6 \cdot h + 1)} \cdot \frac{k_{ah}(6 \cdot h + 1)}{k_{a1} \cdot (6 \cdot h + 1)} \right]^2$

$n' := 1, 2.. 150$



$$\sigma_{\theta\text{lim}} := \sigma_{\theta}(150) \quad \sigma_{\theta\text{lim}} = 8.058 \times 10^{-6}$$

Reattanza di dispersione al traferro:

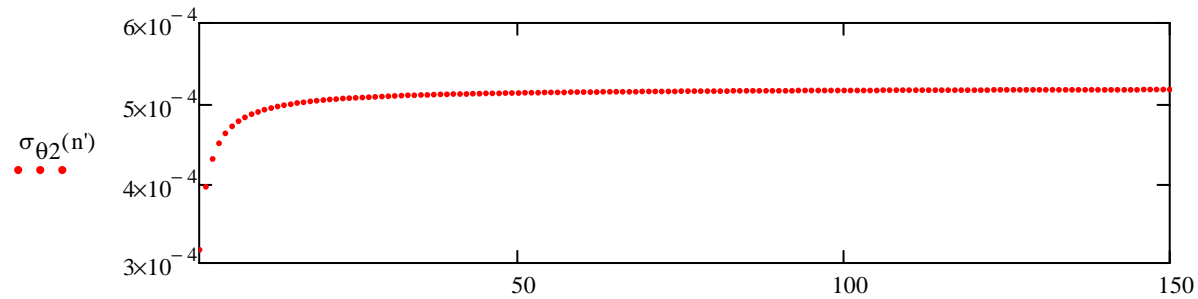
$$X_{\theta} := X_{p\_u} \cdot \sigma_{\theta\text{lim}} \quad X_{\theta} = 5.508 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Reattanza di dispersione al traferro per rotore a gabbia**

Coefficiente di riduzione della reattanza principale:

$$\sigma_{\theta 2}(n) := \sum_{h=1}^n \left[ \left[ \frac{1}{(Z_2 \cdot h - p)} \right]^2 + \left[ \frac{1}{(Z_2 \cdot h + 1)} \right]^2 \right]$$

$n' := 1, 2.. 150$



$$\sigma_{\theta\text{lim}2} := \sigma_{\theta 2}(150) \quad \sigma_{\theta\text{lim}2} = 5.171 \times 10^{-4} \quad n'$$

$$X_{\theta 2} := 1.58 \cdot \frac{f}{4 \cdot \pi^2} \cdot 10^{-5} \cdot \frac{Z_2 \cdot (\tau_p \cdot 10^{-3}) \cdot (L_T \cdot 10^{-3}) \cdot p}{k_C \cdot k_V \cdot (\theta \cdot 10^{-3})} \cdot \sigma_{\theta 2}(n) \quad X_{\theta 2} = 2.14 \times 10^{-4}$$

$$X_{\theta 21} := X_{\theta 2} \cdot m^2 \quad X_{\theta 21} = 0.142$$

## Calcolo del punto di lavoro nominale

Parametri di circuito equivalente:

Resistenza di statore:  $R_1 := R_{1ca} \quad R_1 = 0.088 \quad \Omega$

Reattanza di dispersione totale di statore:  $X_1 := X_c + X_t + X_{\theta} \quad X_1 = 1.121 \quad \Omega$

Resistenza di rotore riportata a statore:  $R_2 := R_{21} \quad R_2 = 0.078 \quad \Omega$

Resistenza di dispersione totale di rotore riportata a statore:  $X_{21} := X_{c21} + X_{t21} + X_{\theta 21}$   $X_{21} = 0.455 \quad \Omega$

Impedenza longitudinale di statore:  $Z'_1 := R_1 + i \cdot X_1$   $Z'_1 = 0.088 + 1.121i$

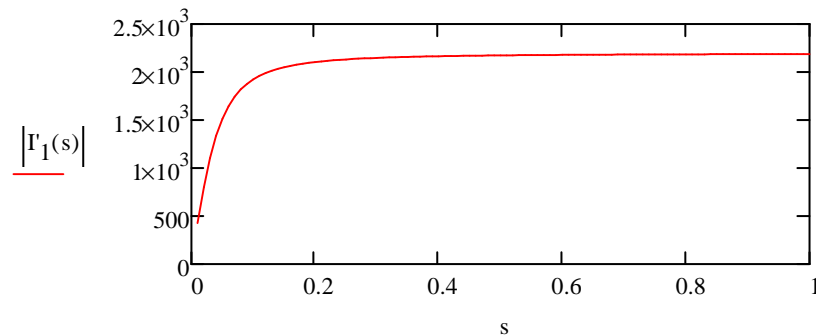
Impedenza longitudinale di rotore:  $Z'_2(s) := \frac{R_{21}}{s} + i \cdot X_{21}$

Impedenza trasversale:  $Z'_p := i \cdot X_p$   $Z'_p = 61.793i$

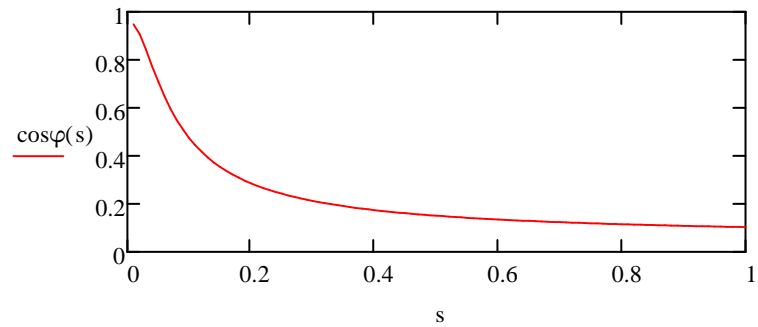
Impedenza equivalente vista dallo statore:  $Z'_{eq}(s) := Z'_1 + \frac{Z'_2(s) \cdot Z'_p}{Z'_2(s) + Z'_p}$

Corrente di statore in funzione dello scorrimento:  $I_1(s) := \frac{V_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z'_{eq}(s)}$

$s := 0, 0.01.. 1$

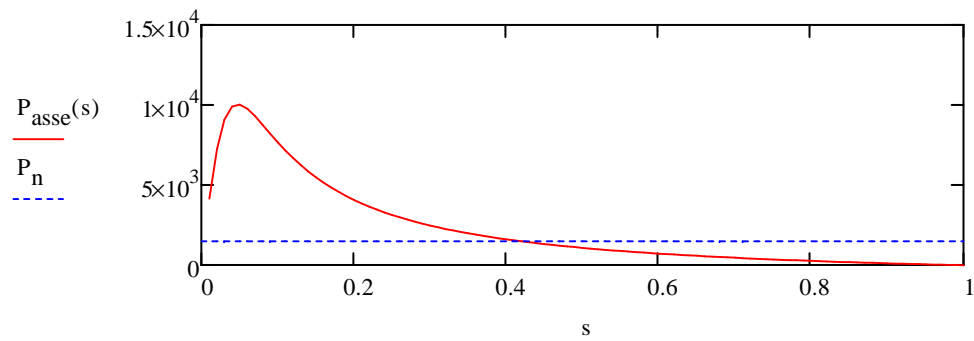


Fattore di potenza in funzione dello scorrimento:  $\cos\varphi(s) := \cos(\arg(Z'_{eq}(s)))$

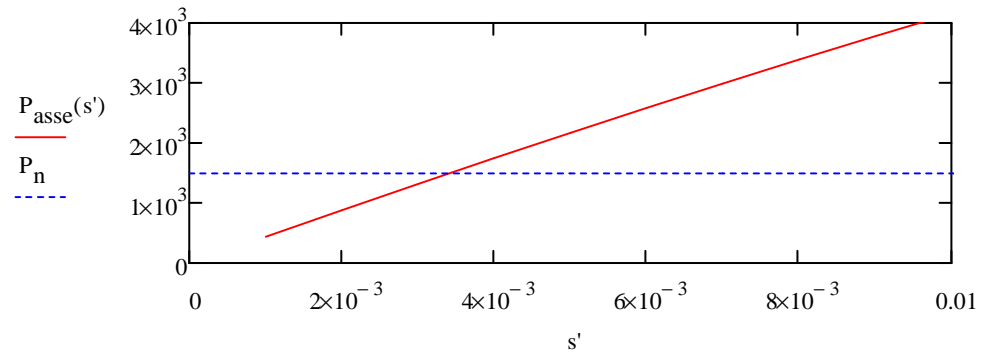


Corrente di rotore riportata a statore: 
$$I'_{21}(s) := I'_1(s) \cdot \frac{Z'_p}{Z'_p + Z'_2(s)}$$

Potenza all'asse in funzione dello scorrimento: 
$$P_{\text{asse}}(s) := 3 \cdot R_{21} \cdot \frac{1-s}{s} \cdot \left( |I'_{21}(s)| \right)^2 \cdot 10^{-3} \quad \text{kW}$$



$s' := 0, 0.001.. 1$



Calcolo dello scorrimento nominale:  $s_n := 3.41 \cdot 10^{-3}$   $P_{\text{asse}}(s_n) = 1.5 \times 10^3$

Velocità di rotazione in funzione dello scorrimento:

$$\omega_m(s) := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 - s)}{p} \quad \text{rad / s meccanici}$$

$$\cos\varphi(s_n) = 0.914$$

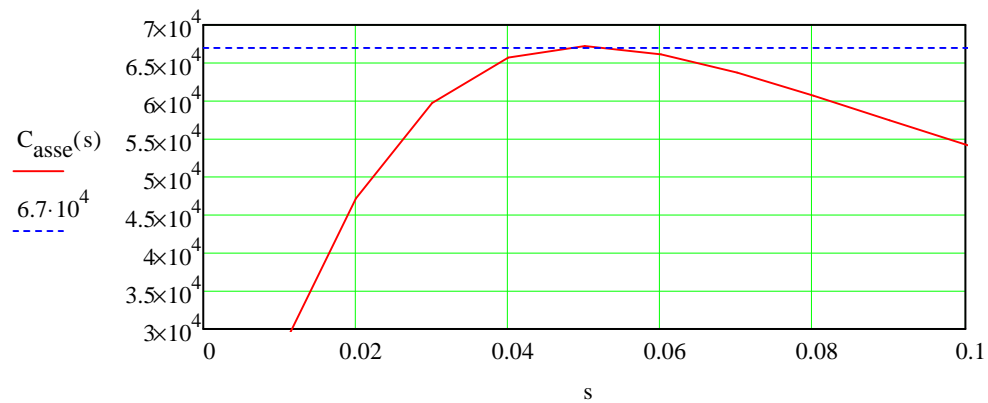
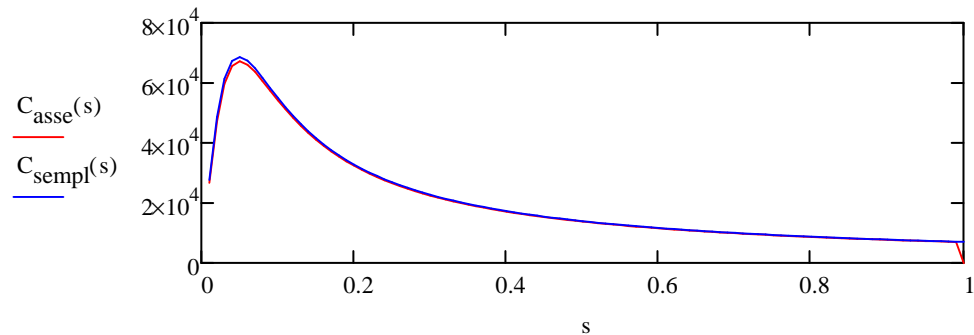
Da specifica:  $\cos\phi = 0.86$

Coppia all'asse in funzione dello scorrimento:

$$C_{asse}(s) := \frac{P_{asse}(s) \cdot 10^3}{\omega_m(s)}$$

Formula semplificata:

$$C_{semp}(s) := \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s} \cdot \frac{V_n^2 \cdot R_{21}}{\left( X_1 + X_{21} \right)^2 + \left( R_1 + \frac{R_{21}}{s} \right)^2}$$





Formula semplificata per lo scorrimento di coppia massima:

$$s_{\max} := \frac{R_{21}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{21})^2}} \quad s_{\max} = 0.049$$

Coppia massima da formula semplificata:

$$T_{\max} := \frac{0.5 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{V_n^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{21})^2}} \quad T_{\max} = 6.875 \times 10^4 \quad \text{N m}$$

Coppia massima da circuito equivalente:

$$C_{\text{MAX}} := 6.7 \cdot 10^4 \quad \text{N m}$$

Coppia nominale:

$$C_n := \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_m(s_n)} \quad C_n = 9.582 \times 10^3 \quad \text{N m}$$

Rapporto coppia:

$$\frac{C_{\text{MAX}}}{C_n} = 6.992$$

Fattore di potenza nominale:

$$\cos \varphi_n := \cos \varphi(s_n) \quad \cos \varphi_n = 0.914$$

---

## Calcolo delle perdite del rendimento

### Perdite Joule nello statore

$$P_{Cu1} := 3 \cdot R_1 \cdot \left( |I_1(s_n)| \right)^2 \cdot 10^{-3} \quad P_{Cu1} = 6.721 \quad \text{kW}$$

$$P_{Cu2} := 3 \cdot R_{21} \cdot \left( |I_{21}(s_n)| \right)^2 \cdot 10^{-3} \quad P_{Cu2} = 5.132 \quad \text{kW}$$

### Perdite nel ferro di statore

Densità del ferro:  $\gamma_{fe} := 7.6$  kg / dm<sup>3</sup>

Peso dei denti:  $G_{d1} := \left[ \pi \cdot \frac{(D + 2 \cdot h_c)^2}{4} - \pi \cdot \frac{D^2}{4} - Z \cdot w_c \cdot h_c \right] \cdot 10^{-4} \cdot (L_{fe} \cdot 10^{-2}) \cdot \gamma_{fe}$   $G_{d1} = 417.185$  kg

Peso del giogo:  $G_{g1} := \left[ \pi \cdot \frac{D_{1\_max}^2}{4} - \pi \cdot \frac{(D + 2 \cdot h_c)^2}{4} \right] \cdot 10^{-4} \cdot (L_{fe} \cdot 10^{-2}) \cdot \gamma_{fe}$   $G_{g1} = 2.318 \times 10^3$  kg

Cifra di perdita:  $C_p := 1.7$  W / kg

Coefficiente di lavorazione:  $k_L := 1.25$

Perdite nel ferro;  $P_{fe} := C_p \cdot (B_{max1}^2 \cdot G_{d1} + B_{g1}^2 \cdot G_{g1}) \cdot k_L \cdot 10^{-3}$   $P_{fe} = 9.046$  kW

### Perdite meccaniche

Perdite per attrito:  $P_{attr} := 17 \cdot n \cdot (D \cdot 10^{-3})^2 \cdot (L_T \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-3}$   $P_{attr} = 10.661$  kW

Sovratemperatura media parti attive rispetto all'aria:  $\Delta T_a := 17$  °C

Coefficiente scambio termico globale;  $c_a := 1210$  W / (°C m<sup>3</sup>)

Portata d'aria richiesta:  $Q := \frac{(P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{fe} + P_{attr}) \cdot 10^3}{c_a \cdot \Delta T_a}$   $Q = 1.534$  m<sup>3</sup> / s

Diametro del ventilatore:  $D_v := D + 2 \cdot h_c$   $D_v = 916.6$  mm

Prevalenza richiesta:  $H := 8 \cdot \frac{Q^2}{(D_v \cdot 10^{-3})^4}$   $H = 26.679$  m

Densità aria:  $\gamma_a := 1.23$  kg / m<sup>3</sup>

Accelerazione di gravità:  $g := 9.81$  m / s<sup>2</sup>

Rendimento ventilatore:  $\eta_v := 0.6$

Potenza ventilatore:  $P_{vent} := \frac{Q \cdot \gamma_a \cdot g \cdot H}{\eta_v} \cdot 10^{-3}$   $P_{vent} = 0.823$  kW

Perdite meccaniche:  $P_{mec} := P_{attr} + P_{vent}$   $P_{mec} = 11.484$  kW

### **Perdite addizionali**

$P_{add} := \frac{5}{1000} \cdot P_n$   $P_{add} = 7.5$  kW

### **Perdite totali e rendimento**

Perdite totali:  $P_{tot} := P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{fe} + P_{mec} + P_{add}$   $P_{tot} = 39.883$  kW

Rendimento :  $rend := 1 - \frac{P_{tot}}{P_n}$   $rend = 0.973$  Valore di specifica:  $\eta = 0.96$

---

## Stima delle prestazioni all'avviamento

Altezza equivalente della barra (supposta di forma rettangolare)

$$h_{eq} := h_{c2} - h_{t2}$$

$$h_{eq} = 33.078 \quad \text{mm}$$

Altezza ridotta della barra in funzione dello scorrimento:

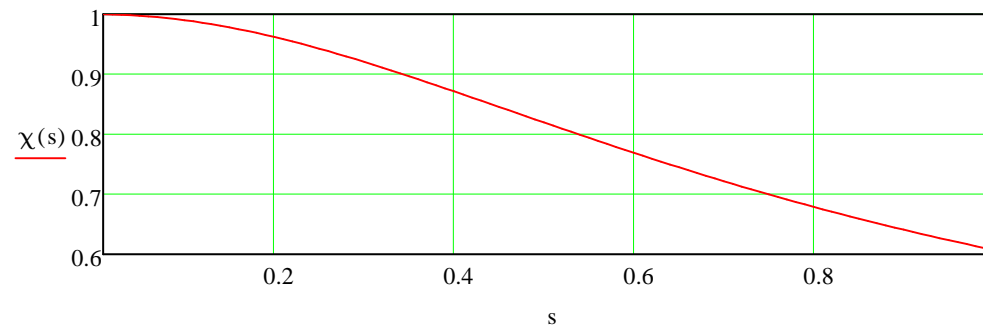
$$\xi(s) := h_{eq} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot s}{2 \cdot \rho_{Al}}}$$

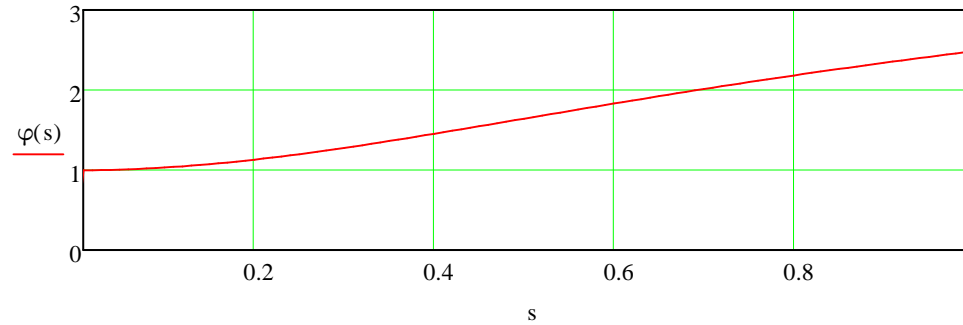
Funzione di riduzione della reattanza

$$\chi(s) := \frac{3}{2} \cdot \xi(s) - 1 \cdot \frac{\sinh(2 \xi(s)) - \sin(2 \cdot \xi(s))}{\cosh(2 \xi(s)) - \cos(2 \cdot \xi(s))}$$

Funzione di incremento della resistenza

$$\varphi(s) := \xi(s) \cdot \frac{\sinh(2 \xi(s)) + \sin(2 \cdot \xi(s))}{\cosh(2 \xi(s)) - \cos(2 \cdot \xi(s))}$$





Parte di resistenza rotorica dovuta alle barre e agli anelli:

$$R_{21\_b} := \rho_{Al} \cdot \left( \frac{L_{barra} \cdot 10^{-3}}{S_{barra}} \right) \cdot m^2$$

$$R_{21\_a} := \rho_{Al} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot (D_{2\_ext} - h_{anello}) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot Z_2 \cdot S_{anello} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_b}{2}\right)^2} \right] \cdot m^2$$

$$R_{21} = 0.078$$

$$R_{21\_b} + R_{21\_a} = 0.078$$

Stima della reattanza di rotore a scorrimento s=1:

$$X_{21\_sp} := X_{21} \cdot \chi(1)$$

$$X_{21\_sp} = 0.276$$

$\Omega$

$$X'_{21}(s) := X_{21} \cdot \chi(s)$$

Stima della resistenza di rotore a scorrimento s=1:

$$R_{21\_sp} := R_{21\_b} \cdot \varphi(1) + R_{21\_a}$$

$$R_{21\_sp} = 0.159$$

$\Omega$

$$R'_{21}(s) := R_{21} \cdot \varphi(s)$$

$$\frac{R_{21\_sp}}{R_{21}} = 2.039$$

$$\frac{X_{21\_sp}}{X_{21}} = 0.607$$

Stima della coppia di spunto secondo parametri di rotore a valutati a scorrimento nominale:

$$C_{sp} := \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{V_n^2 \cdot R_{21}}{(X_1 + X_{21})^2 + (R_1 + R_{21})^2} \quad C_{sp} = 7.096 \times 10^3 \quad \frac{C_{sp}}{C_n} = 0.741$$

Stima della coppia di spunto secondo parametri di rotore corretti considerando l'addensamento di corrente:

$$C'_{sp} := \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{V_n^2 \cdot R_{21\_sp}}{(X_1 + X_{21\_sp})^2 + (R_1 + R_{21\_sp})^2} \quad C'_{sp} = 1.805 \times 10^4 \quad \frac{C'_{sp}}{C_n} = 1.884$$

Stima della corrente di spunto senza considerare l'addensamento di corrente nel rotore:

$$I_{sp} := \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_n}{\sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_1 + X_{21})^2}} \quad I_{sp} = 2.186 \times 10^3 \quad |I'_{1}(1)| = 2.191 \times 10^3$$

Stima della corrente di spunto considerando l'addensamento di corrente nel rotore:

$$I'_{sp} := \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_n}{\sqrt{(R_1 + R_{21\_sp})^2 + (X_1 + X_{21\_sp})^2}} \quad I'_{sp} = 2.441 \times 10^3$$

Curva di coppia considerando le variazioni dei parametri di gabbia con lo scorrimento:

$$C'_{semp1}(s) := \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s} \cdot \frac{V_n^2 \cdot R'_{21}(s)}{(X_1 + X'_{21}(s))^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{21}(s)}{s}\right)^2}$$

