

## 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 netta 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:  $L_T := 650 \quad \text{mm}$

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;  $r := \frac{Q - Z_{\text{racc}}}{Q}$   $r = 0.833$

Fattore di distribuzione:

$$k_{d1} := \frac{1}{2 \cdot q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q}\right)} \quad k_{d1} = 0.956$$

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):  $B'_{\theta.m} := 0.56$  T

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

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

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

Ricalcolo il flusso per polo:

$$\Phi := \frac{E_n}{0.97 \cdot 4.44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{a1}} \quad \Phi = 0.242 \quad \text{wb} \quad \frac{\Phi - \Phi'}{\Phi'} \cdot 100 = 5.493 \quad \% \quad \text{di incremento di flusso}$$

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

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 mezza sovrapposte di nastro micato)  $b_{is\_cm} := 0.6.5$   $b_{is\_cm} = 3$  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:  $h_g := \frac{\Phi}{2 \cdot B_{g\_max} \cdot L_{fe}} \cdot 10^3$   $h_g = 162.104$

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

---

## Avvolgimento di rotore

Trifase, a doppio strato, a barre, ondulato, a passo intero

Numero di cave per polo per fase:  $q_2 := q + 1$   $q_2 = 7$

Numero di cave:  $Z_2 := 6 \cdot p \cdot q_2$   $Z_2 = 84$

Numero di barre in serie per fase:  $N_2 := \frac{2}{3} \cdot Z_2$   $N_2 = 56$

Numero di spire equivalenti in serie per fase:  $N_{s2} := \frac{1}{3} \cdot Z_2$   $N_{s2} = 28$

Angolo elettrico di cava:  $\alpha_2 := \frac{\pi}{3 \cdot q_2}$   $\alpha_2 = 0.15$  rad elettrici

Coefficiente di distribuzione:  $k_{d2} := \frac{\sin\left(\frac{q_2 \cdot \alpha_2}{2}\right)}{q_2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}$   $k_{d2} = 0.956$

Coefficiente di avvolgimento:  $k_{a2} := k_{d2}$

Rapporto spire:  $m := \frac{N_{s1} \cdot k_{d1} \cdot k_{r1}}{N_{s2} \cdot k_{d2}}$   $m = 2.485$

Tensione nominale di rotore a vuoto a rotore bloccato:  $E_2 := \frac{E_n}{m}$   $E_2 = 1.394 \times 10^3$

## Progetto della cava e della barra di rotore

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

Passo cava di rotore:  $\tau_{c2} := \frac{\pi \cdot D_{2\_ext}}{Z_2}$   $\tau_{c2} = 29.815$  mm

Induzione massima nel dente:  $B_{d2\_max} := 1.83$  T

Larghezza dente di rotore a fondo cava:  $w_{d2min} := \frac{\pi}{2} \cdot \frac{B_{\theta m} \cdot \tau_{c2} \cdot L_T}{B_{d2\_max} \cdot L_{fe}}$   $w_{d2min} = 17.648$  mm

Determinazione degli isolanti:

Bispessore di isolamento di conduttore (smalto amidico imidico)  $b_{is\_cond2} := 0.15$  mm

Bispessore di isolamento contro massa:  $b_{is\_cm2} := 1.2$  mm

Calcolo approssimativo della corrente di rotore riportata a statore:  $I_{21} := \cos\phi \cdot I_{f1}$   $I_{21} = 150.352$  A

Calcolo approssimativo della corrente di barra:  $I_{barra} := I_{21} \cdot m$   $I_{barra} = 373.571$  A

Densità di corrente:  $\sigma_2 := \sigma_1 \cdot 1.1$   $\sigma_2 = 3.816$  A / mm<sup>2</sup>

Sezione della barra teorica:  $S_{barra} := \frac{I_{barra}}{\sigma_2}$   $S_{barra} = 97.904$  mm<sup>2</sup>

Sezione teorica conduttore di barra (4 conduttori in // per barra):  $S_{cond\_2} := \frac{S_{barra}}{4}$   $S_{cond\_2} = 24.476$  mm<sup>2</sup>

Tolleranza e lasco verticale:  $\delta_{toll\_v2} := 0.4$   $\delta_{lasco\_v2} := 0.3$

Tolleranza e lasco orizzontale:  $\delta_{toll\_h2} := 0.5$   $\delta_{lasco\_h2} := 0.4$

Altezza bietta di rotore:  $h_{b2} := 3$  mm

Altezza intaglio di rotore:  $h_{t2} := 1$  mm

Larghezza cava in funzione delle dimensioni di piattina:  $f_{w_{c2}}(a, b) := 2 \cdot (a + b_{is\_cond2}) + b_{is\_cm2} + \delta_{toll\_h2} + \delta_{lasco\_h2}$

Altezza cava in funzione delle dimensioni di piattina:  $f_{h_{c2}}(a, b) := 2 \cdot [2 \cdot (b + b_{is\_cond2}) + b_{is\_cm2}] + h_{b2} + h_{t2} + \delta_{toll\_v2} + \delta_{lasco\_v2}$

Larghezza dente minima in funzione delle dimensioni di piattina:  $f_{w_{d2}}(a, b) := \frac{D_{2\_ext} \cdot f_{w_{c2}}(a, b) - D_{2\_ext} \cdot \tau_{c2} + 2 \cdot f_{h_{c2}}(a, b) \cdot \tau_{c2}}{D_{2\_ext}}$

Con la scelta della seguente piattina seguente:  $a_2 := 2.8 \text{ mm}$   $b_2 := 9 \text{ mm}$   $S_{ce2} := 24.6 \text{ mm}^2$

mi avvicino alla sezione teorica  $S_{cond\_2} = 24.476 \text{ mm}^2$  ed ho

Larghezza di dente minima:  $w_{d2} := f_{w_{d2}}(a_2, b_2) = 18.546 > w_{d2min} = 17.648 \text{ mm}$

Altezza di cava:  $h_{c2} := f_{h_{c2}}(a_2, b_2) = 43.7 \text{ mm}$

Larghezza di cava:  $w_{c2} := f_{w_{c2}}(a_2, b_2) = 8 \text{ mm}$

Larghezza apertura di cava al traferro:  $c_2 := 4$

---

## Giogo e diametro interno di rotore

Induzione massima nel giogo:  $B_{g2\_max} := 1.6 \text{ T}$

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

Diametro interno massimo di rotore:  $D_{2int\_min} := D_{2\_ext} - 2 \cdot h_{c2} - 2 \cdot h_{g2}$   $D_{2int\_min} = 438.276 \text{ mm}$

## CALCOLO E VERIFICA

### Calcolo della corrente magnetizzante

#### Calcolo delle amperspire al traferro

Coefficiente di Carter per lo statore:

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

Coefficiente di Carter per il rotore;

$$k_{C2} := \frac{\frac{\tau_{c2}}{c_2}}{\frac{\tau_{c2}}{c_2} - \frac{\frac{w_{c2}}{\theta}}{5 + \frac{w_{c2}}{\theta}}} \quad k_{C2} = 1.057$$

Coefficiente di Carter complessivo:

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

$$k_C = 1.332$$

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;

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$AS_{\theta} := \frac{B_{\theta 1}}{\mu_0} \cdot k_C \cdot k_V \cdot \theta \cdot 10^{-3} \quad AS_{\theta} = 2.481 \times 10^3 \quad A$$

### 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:

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

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

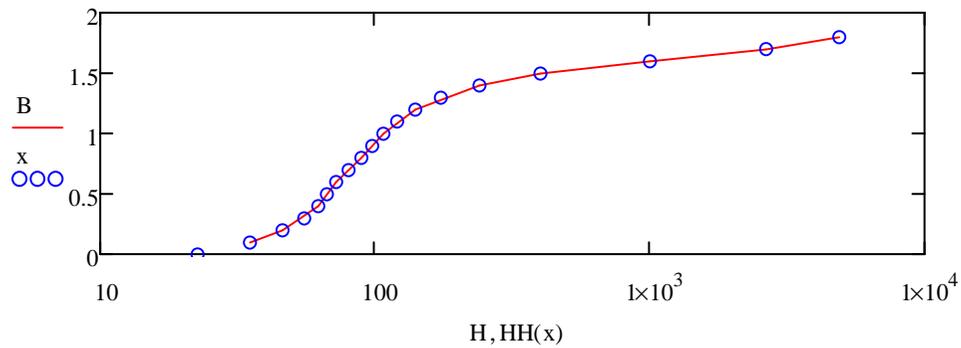
$$B_{\min 1} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_c \cdot L_T}{W_{\max 1} \cdot L_{fe}} \quad B_{\min 1} = 1.583 \quad \text{T}$$

Implementazione della caratteristica B-H per interpolazione:

B :=	$\begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 0.6 \\ 0.8 \\ 1 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.6 \\ 1.7 \\ 1.8 \end{pmatrix}$	T	H :=	$\begin{pmatrix} 35 \\ 46 \\ 62 \\ 72 \\ 89 \\ 107 \\ 140 \\ 240 \\ 400 \\ 1000 \\ 2650 \\ 4900 \end{pmatrix}$	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 (a fondo cava):  $w_{d2} = 18.546 \quad \text{mm}$

Altezza della cava a meno di bietta e intaglio:  $h'_c := h_{c2} - h_{b2} - h_{t2} \quad h'_c = 39.7 \quad \text{mm}$

Larghezza del dente di rotore alle diverse altezze:

$$W_{\min 2} := w_{d2} \quad W_{\min 2} = 18.546 \quad \text{mm}$$

$$W_{\text{med2}} := W_{\text{min2}} \cdot \frac{\frac{D_{2\_ext}}{2} - \frac{h_{c2}}{2} + \frac{h'_c}{2}}{\frac{D_{2\_ext}}{2} - h_{c2}} \quad W_{\text{med2}} = 20.726 \quad \text{mm}$$

$$W_{\text{max2}} := W_{\text{min2}} \cdot \frac{\frac{D_{2\_ext}}{2} - \frac{h_{c2}}{2} + h'_c}{\frac{D_{2\_ext}}{2} - h_{c2}} \quad W_{\text{max2}} = 21.763 \quad \text{mm}$$

Induzione nel dente alle diverse altezze:

$$B_{\text{max2}} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_{c2} \cdot L_T}{W_{\text{min2}} \cdot L_{fe}} \quad B_{\text{max2}} = 1.741 \quad \text{T}$$

$$B_{\text{med2}} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_{c2} \cdot L_T}{W_{\text{med2}} \cdot L_{fe}} \quad B_{\text{med2}} = 1.558 \quad \text{T}$$

$$B_{\text{min2}} := B_{\theta 1} \cdot \frac{\tau_{c2} \cdot L_T}{W_{\text{max2}} \cdot L_{fe}} \quad B_{\text{min2}} = 1.484 \quad \text{T}$$

Calcolo del campo magnetico H alle varie altezze:

$$H_{\max 2} := \text{HH}(B_{\max 2}) \quad H_{\max 1} = 3.309 \times 10^3 \quad \text{A / m}$$

$$H_{\text{med} 2} := \text{HH}(B_{\text{med} 2}) \quad H_{\text{med} 1} = 1.765 \times 10^3 \quad \text{A / m}$$

$$H_{\min 2} := \text{HH}(B_{\min 2}) \quad H_{\min 1} = 833.75 \quad \text{A / m}$$

Calcolo delle amperspire:

$$AS_{d2} := (H_{\max 2} + H_{\text{med} 2} + H_{\min 2}) \cdot \frac{h_{c2} \cdot 10^{-3}}{3} \quad AS_{d2} = 66.362 \quad \text{A}$$

### Calcolo delle amperspire nel giogo di statore

$$\text{Induzione nel giogo di statore;} \quad B_{g1} := 0.85 \cdot \frac{\frac{\Phi}{2}}{h_g \cdot L_{fe}} \cdot 10^6 \quad B_{g1} = 1.139 \quad \text{T}$$

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

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

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:  $B_{g2} := 0.85 \cdot \frac{\Phi}{2} \cdot 10^6$   $B_{g1} = 1.139$  T

Campo H nel giogo di rotore:  $H_{g2} := HH(B_{g1})$   $H_{g2} = 126.791$  A/m

Lunghezza azimutale del giogo:  $L_{g2} := \frac{\pi \cdot (D_{2\_ext} - 2 \cdot h_{c2} - h_{g2})}{2 \cdot p}$   $L_{g2} = 450.848$  mm

Calcolo delle amperspire:  $AS_{g2} := H_{g2} \cdot L_{g2} \cdot 10^{-3}$   $AS_{g2} = 57.164$  A

### Calcolo della corrente magnetizzante

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

$$AS_{\mu} := AS_{\theta} + AS_{d1} + AS_{d2} + \frac{1}{2} \cdot AS_{g1} + \frac{1}{2} \cdot AS_{g2} \quad AS_{\mu} = 2.742 \times 10^3 \quad A$$

Percentuale di amperspire totali che cade sul traferro;

$$\frac{AS_{\theta}}{AS_{\mu}} \cdot 100 = 90.464 \quad \%$$

Corrente magnetizzante di fase (valore efficace):

$$I_{\mu} := \frac{\pi \cdot AS_{\mu} \cdot N_{cp}}{6 \cdot \sqrt{2} \cdot N_{sb} \cdot q \cdot k_{a1}} \quad I_{\mu} = 61.072 \quad \text{A}$$

Corrente magnetizzante espressa in % della corrente nominale:

$$i_{\mu\%} := \frac{I_{\mu}}{I_{f1}} \cdot 100 \quad i_{\mu\%} = 34.933 \quad \% \quad \text{normale : 20 - 40 \%}$$

---

## Calcolo delle resistenze

### Resistenza di fase di statore

Distanze caratteristiche della testata

Sporto del tratto rettilineo dal pacco (esclusa piastra)

$$\delta_3 := 0.6 \cdot \left( \frac{V_n}{\sqrt{3}} \right)^{0.541} \quad \delta_3 = 49.325 \quad \text{mm}$$

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

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

Lunghezza testata:  $L_{\text{test}} := 2 \cdot \delta_{\text{piastra}} + 2 \cdot \delta_3 + 2 \cdot \delta_{\text{obl}} + 2 \cdot \delta_1$   $L_{\text{test}} = 777.692$  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:  $R_{1ca} := R_{1cc} \cdot k_r$   $R_{1ca} = 0.088$   $\Omega$

## Resistenza di fase di rotore

Distanze caratteristiche della testata	$E_2 = 1.394 \times 10^3$		
Sporto del tratto rettilineo dal pacco (esclusa piastra)	$\delta_{3r} := 0.6 \cdot (E_2)^{0.541}$	$\delta_{3r} = 30.146$	mm
Distanza minima tra tratti obliqui della testata	$d_{\min 2} := 2.4 + 4.5 \cdot 10^{-4} \cdot E_2$	$d_{\min 2} = 3.027$	mm
Confronto con la larghezza media del dente di statore:	$W_{\text{med}2} = 20.726$	mm	
Definisco d pari a metà larghezza media di dente:	$d_2 := \frac{W_{\text{med}2}}{2}$	$d_2 = 10.363$ mm	> $d_{\min 2} = 3.027$
Altezza della barra:	$\delta_{1r} := \frac{h_{c2} - h_{b2} - h_{t2}}{2}$	$\delta_{1r} = 19.85$	mm
Inclinazione tratto obliquo:	$\alpha_{m2} := \arccos\left(\frac{d_2}{\tau_{c2}}\right)$	$\alpha_{m2} \cdot \frac{180}{\pi} = 69.661$	gradi
Passo di "bobina":	$\tau_{b2} := \frac{\pi \cdot (D_{2\_ext} - h_{c2})}{2 \cdot p}$	$\tau_{b2} = 591.798$	mm
Lunghezza del tratto obliquo:	$\delta_{obl2} := \frac{\tau_{b2}}{2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{\tau_{c2}}\right)^2}}$	$\delta_{obl2} = 315.573$	mm
Spessore piastra di pressione:	$\delta_{piastra2} := 15$	mm	

Lunghezza testata:  $L_{\text{test2}} := 2 \cdot \delta_{\text{piastra2}} + 2 \cdot \delta_{3r} + 2 \cdot \delta_{\text{obl2}} + 2 \cdot \delta_{1r}$   $L_{\text{test2}} = 761.139$  mm

Lunghezza spira media:  $L_{\text{sm2}} := 2 \cdot L_T + 2 \cdot L_{\text{test2}}$   $L_{\text{sm2}} = 2.822 \times 10^3$  mm

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

Resistenza di fase:  $R_2 := \rho_{\text{Cu}} \cdot \frac{(L_{\text{sm2}} \cdot 10^{-3}) \cdot N_{s2}}{S_{\text{barra}}}$   $R_2 = 0.017$   $\Omega$

Resistenza di fase riportata a statore:  $R_{21} := R_2 \cdot m^2$   $R_{21} = 0.108$   $\Omega$

---

## Calcolo delle reattanze

### Reattanza principale

Reattanza principale satura:  $X_p := \frac{6 \cdot f \cdot N_s^2 \cdot k_{a1}^2 \cdot \Phi}{AS_{\mu} \cdot p}$   $X_p = 58.514$   $\Omega$

Calcolo con formula alternativa:  $\frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_{\mu} \cdot 0.97} = 58.476$   $\Omega$

Reattanza principale non satura:

$$X_{p\_u} := \frac{6 \cdot f \cdot N_s^2 \cdot k_{a1}^2 \cdot \Phi}{AS_{\theta \cdot p}} \quad X_{p\_u} = 64.682 \quad \Omega$$

### Reattanza di dispersione in cava dello statore

Coefficiente di riduzione della permeanza di cava nella zona conduttrice:

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

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

$$k_{aria}(r') := (3 \cdot r' - 2) + 3 \cdot (1 - r') \cdot \frac{3}{4} \quad r = 0.833 \quad k_{aria1} := k_{aria}(r) \quad k_{aria1} = 0.875$$

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

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

Distanza tra le parti conduttive delle bobine:

$$h_5 := b_{is\_cm} \quad h_5 = 3 \quad \text{mm}$$

Altezza di cava in aria sopra le parti conduttive delle bobine

$$h_2 := \frac{b_{is\_cm}}{2} + h_b + h_t \quad h_2 = 5 \quad \text{mm}$$

Permeanza di cava:

$$\lambda_c := \frac{h_1}{3 \cdot w_c} \cdot k_{Cu1} + \frac{h_2}{w_c} \cdot k_{a1} + \frac{h_5}{4 \cdot w_c} \quad \lambda_c = 1.456$$

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:  $X_c := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_c$   $X_c = 0.299$  H

**Reattanza di dispersione in cava del rotore**

Coefficiente di riduzione della permeanza di cava nella zona conduttrice:

$k_{Cu1} := k_{Cu}(1)$   $k_{Cu1} = 1$

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

$k_{aria1} := k_{aria}(1)$   $k_{aria1} = 1$

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

$h_{1r} := h_{c2} - h_{t2} - h_{b2} - 2 \cdot b_{is\_cm2}$   $h_{1r} = 37.3$  mm

Distanza tra le parti conduttive delle bobine:  $h_{5r} := b_{is\_cm2}$   $h_{5r} = 1.2$  mm

Altezza h2:  $h_{2r} := \frac{b_{is\_cm2}}{2}$   $h_{2r} = 0.6$  mm

Altezza h3:  $h_{3r} := h_{b2}$   $h_{3r} = 3$  mm

Altezza h4:  $h_{4r} := h_{t2}$   $h_{4r} = 1$  mm

Larghezza apertura di cava:  $c_2 = 4$  mm

Permeanza di cava:  $\lambda_{c2} := \frac{h_{1r}}{3 \cdot w_{c2}} + \frac{h_{2r}}{w_{c2}} + \frac{h_{3r}}{w_{c2} - c_2} \cdot \ln\left(\frac{w_{c2}}{c_2}\right) + \frac{h_{4r}}{c_2} + \frac{h_{5r}}{4 \cdot w_{c2}}$   $\lambda_{c2} = 2.437$

Induttanza di dispersione in cava:  $L_{c2} := 2 \cdot \mu_0 \cdot L_0 \cdot (10^{-3}) \cdot \frac{N_s^2}{p \cdot q_2} \cdot \lambda_c$   $L_{c2} = 1.234 \times 10^{-4}$  H

Reattanza di dispersione in cava:  $X_{c2} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{c2}$   $X_{c2} = 0.039$   $\Omega$

Reattanza di dispersione in cava riportata a statore:  $X_{c21} := X_{c2} \cdot m^2$   $X_{c21} = 0.239$   $\Omega$

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

Sperto rettilineo della testata:  $\delta_3 = 49.325$

Ingombro assiale della parte obliqua:  $\delta_2 := \frac{\tau_b}{2 \cdot \tan(\alpha_m)}$   $\delta_2 = 97.477$  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:  $L_t := 8 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_s^2}{p} \cdot L_T \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_t$   $L_t = 2.616 \times 10^{-3}$  H

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

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

Sperto rettilineo della testata:  $\delta_{3r} = 30.146$

Ingombro assiale della parte obliqua:  $\delta_{2r} := \frac{\tau_{b2}}{2 \cdot \tan(\alpha_{m2})}$   $\delta_{2r} = 109.683$  mm

Permeanza di testata:  $\lambda_{t2} := 1.2 \cdot k_{a2}^2 \cdot \left( \frac{\delta_{3r}}{L_T} + \frac{\delta_{2r}}{2 \cdot L_T} \right)$   $\lambda_{t2} = 0.143$

Induttanza di dispersione in testata:  $L_{t2} := 8 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{s2}^2}{p} \cdot L_T \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_{t2}$   $L_{t2} = 3.672 \times 10^{-4}$  H

Reattanza di dispersione in testata:  $X_{t2} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{t2}$   $X_{t2} = 0.115$   $\Omega$

Reattanza di dispersione in testata riportata allo statore:  $X_{t21} := X_{t2} \cdot m^2$   $X_{t21} = 0.712$   $\Omega$

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

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

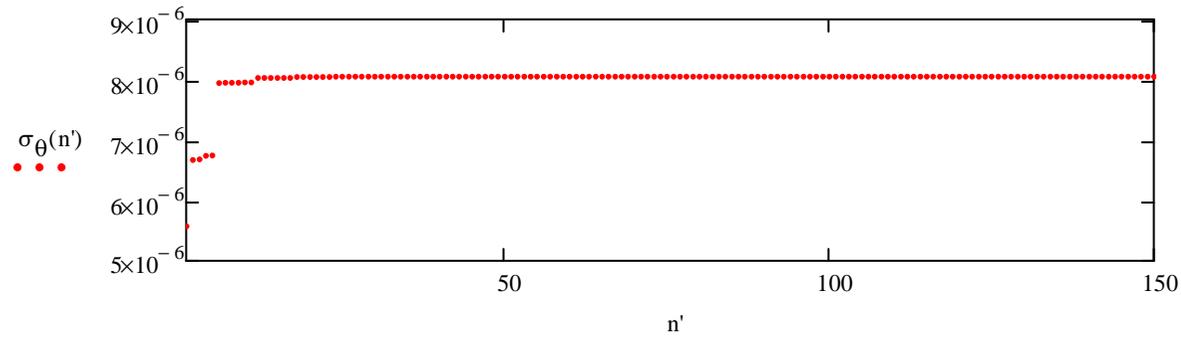
Fattore di raccorciamento relativo all'armonica h:  $k_{rh}(h) := \sin\left(\frac{r \cdot \pi \cdot h}{2}\right)$

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

Coefficiente di riduzione della reattanza principale:

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

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



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

Reattanza di dispersione al traferro:

$$X_{\theta} := X_{p\_u} \cdot \sigma_{\theta\text{lim}} \quad X_{\theta} = 5.212 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

**Reattanza di dispersione al traferro per una fase di rotore**

Fattore di distribuzione relativo all'armomica h:

$$k_{dh2}(h) := \frac{\sin\left(\frac{\alpha_2 \cdot h \cdot q_2}{2}\right)}{q_2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_2 \cdot h}{2}\right)}$$

Fattore di raccorciamento relativo all'armomica h:

$$k_{rh2}(h) := \sin\left(\frac{\pi \cdot h}{2}\right)$$

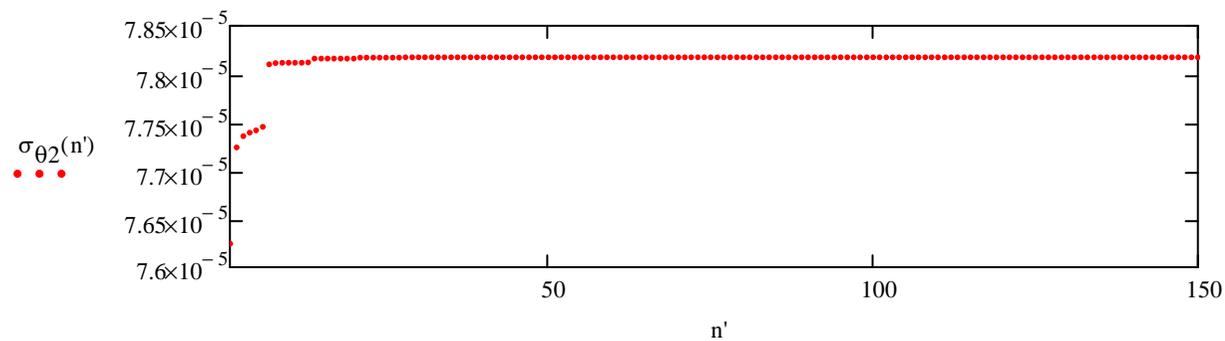
Fattore di avvolgimento relativo all'armomica h:

$$k_{ah2}(h) := k_{dh2}(h) \cdot k_{rh2}(h)$$

Coefficiente di riduzione della reattanza principale:

$$\sigma_{\theta 2}(n) := \sum_{h=1}^n \left[ \left[ \frac{1}{6 \cdot h - 1} \cdot \frac{k_{ah2}(6 \cdot h - 1)}{k_{a2} \cdot (6 \cdot h - 1)} \right]^2 + \left[ \frac{1}{6 \cdot h + 1} \cdot \frac{k_{ah2}(6 \cdot h + 1)}{k_{a2} \cdot (6 \cdot h + 1)} \right]^2 \right]$$

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



$\sigma_{\theta \text{lim}2} := \sigma_{\theta 2}(150) \quad \sigma_{\theta \text{lim}2} = 7.818 \times 10^{-5}$

Reattanza di dispersione al trafero riportata allo statore:

$$X_{\theta 21} := X_{p\_u} \cdot \sigma_{\theta \text{lim}2} \quad X_{\theta 21} = 5.057 \times 10^{-3} \Omega$$


---

## 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:  $R_2 := R_{21} \quad R_2 = 0.108 \quad \Omega$

Resistenza di dispersione totale di rotore riportata a statore:  $X_{21} := X_{c21} + X_{t21} + X_{\theta 21} \quad X_{21} = 0.957 \quad \Omega$

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

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

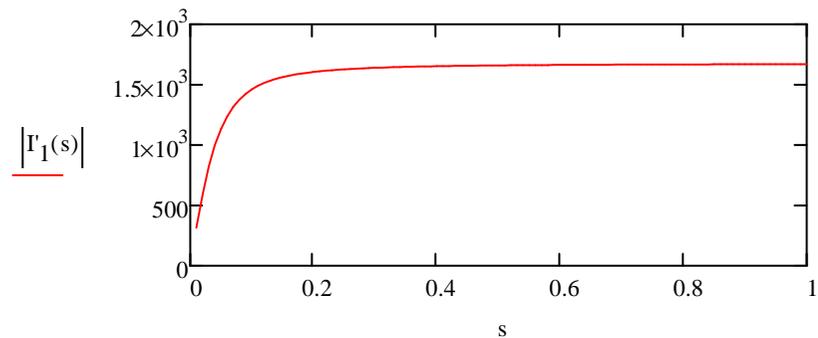
Impedenza trasversale:  $Z'_p := i \cdot X_p \quad Z'_p = 58.514i$

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:

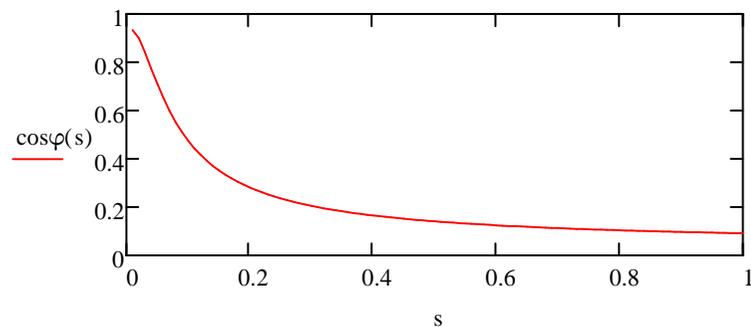
$$I_1(s) := \frac{V_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z'_{eq}(s)}$$

$s := 0, 0.01..1$



Fattore di potenza in funzione dello scorrimento:

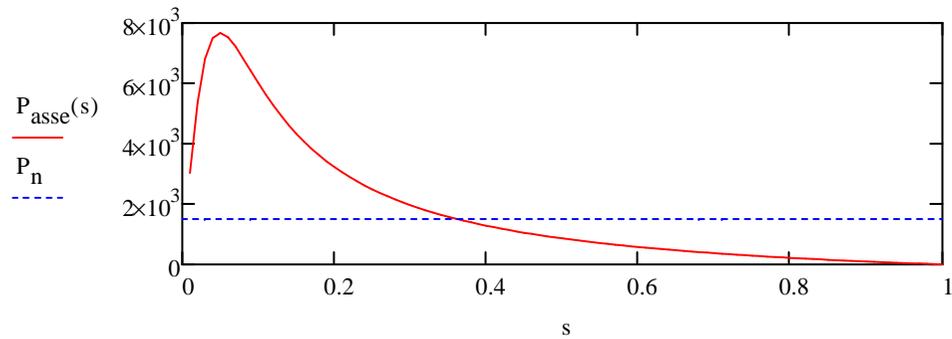
$$\cos\varphi(s) := \cos(\arg(Z'_{eq}(s)))$$



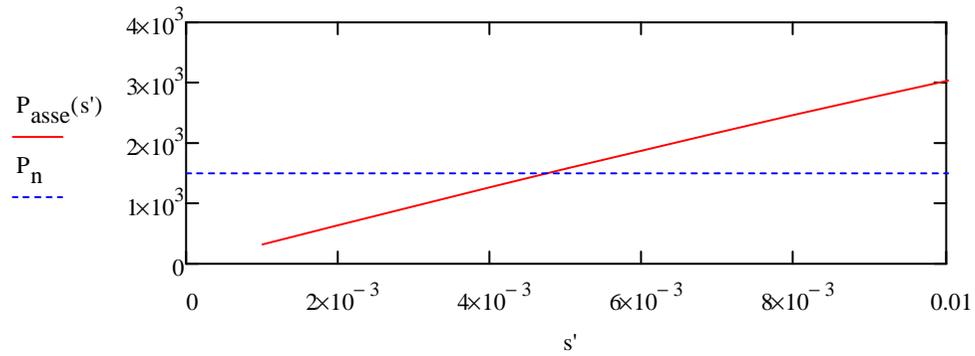
Corrente di rotore riportata a statore:

$$I'_{21}(s) := I_1(s) \cdot \frac{Z'_p}{Z'_p + Z'_2(s)}$$

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



$s' := 0,0001..1$



Calcolo dello scorrimento nominale:  $s_n := 4.75 \cdot 10^{-3}$   $P_{\text{asse}}(s_n) = 1.5 \times 10^3$

Velocità di rotazione in funzione dello scorrimento:

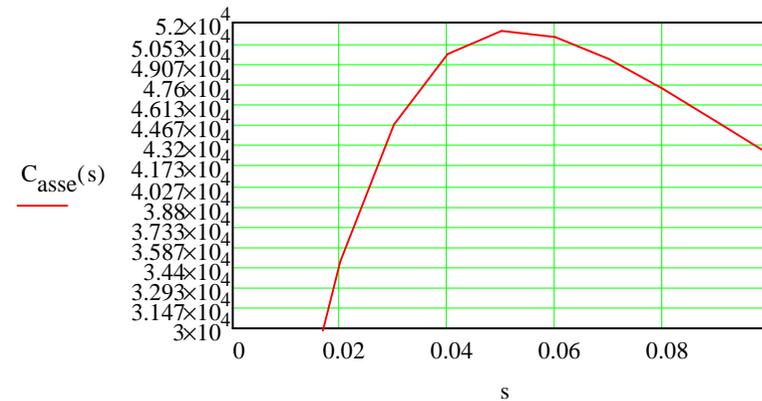
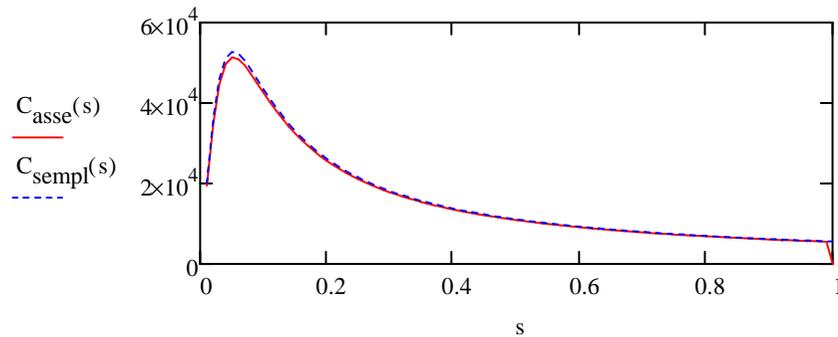
$\omega_m(s) := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1-s)}{p}$  rad / s meccanici  $\cos\varphi(s_n) = 0.899$

Coppia all'asse in funzione dello scorrimento:

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

Formula semplificata:

$$C_{\text{semp1}}(s) := \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s} \cdot \frac{V_n^2 \cdot R_{21}}{(X_1 + X_{21})^2 + \left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2}$$



Formula semplificata per lo scorrimento di coppia massima:

$$s_{\text{max}} := \frac{R_{21}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{21})^2}} \quad s_{\text{max}} = 0.052$$

Coppia massima da formula semplificata:

$$T_{\text{max}} := \frac{0.5 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{V_n^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{21})^2}} \quad T_{\text{max}} = 5.285 \times 10^4 \quad \text{N m}$$

Coppia massima:  $C_{\text{MAX}} := 5.2 \cdot 10^4 \quad \text{N m}$

Coppia nominale:  $C_n := \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_m(s_n)}$   $C_n = 9.595 \times 10^3$  N m

Rapporto coppia:  $\frac{C_{MAX}}{C_n} = 5.42$

Fattore di potenza nominale:

$\cos\varphi_n := \cos\varphi(s_n)$   $\cos\varphi_n = 0.899$

Da specifica:  $\cos\phi = 0.86$

---

## Calcolo delle perdite del rendimento

### Perdite Joule nello statore

$P_{Cu1} := 3 \cdot R_1 \cdot (|I_1(s_n)|)^2 \cdot 10^{-3}$   $P_{Cu1} = 6.967$  kW

$P_{Cu2} := 3 \cdot R_{21} \cdot (|I_{21}(s_n)|)^2 \cdot 10^{-3}$   $P_{Cu2} = 7.16$  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 m3)

Portata d'aria richiesta:  $Q := \frac{(P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{fe} + P_{attr}) \cdot 10^3}{c_a \cdot \Delta T_a}$   $Q = 1.645$  m3 / s

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

Prevalenza richiesta:  $H := 8 \cdot \frac{Q^2}{(D_v \cdot 10^{-3})^4}$   $H = 30.661$  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:  $P_{vent} := \frac{Q \cdot \gamma_a \cdot g \cdot H}{\eta_v} \cdot 10^{-3}$   $P_{vent} = 1.014$  kW

Perdite meccaniche:  $P_{mec} := P_{attr} + P_{vent}$   $P_{mec} = 11.675$

### **Perdite addizionali**

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

### Perdite totali e rendimento

Perdite totali:  $P_{\text{tot}} := P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\text{fe}} + P_{\text{mec}} + P_{\text{add}}$   $P_{\text{tot}} = 42.348$  kW

Rendimento :  $\text{rend} := 1 - \frac{P_{\text{tot}}}{P_n}$   $\text{rend} = 0.972$  Valore di specifica:  $\eta = 0.96$