



# TRACCIA DI PROGETTO DI TRASFORMATORE

## DATI DI SPECIFICA

$$P_n := 1000 \quad \text{kVA}$$

$$\text{Tensioni nominali (lato AT e BT)} \quad V_{n2} := 10000 \quad \text{V} \quad V_{n1} := 400 \quad \text{V}$$

$$\text{Collegamento : stella / stella} \quad \text{COL}_1 := 1 \quad \text{COL}_2 := 1$$

$$f := 50 \quad \text{Hz} \quad \text{Tensione di cc.} \quad V_{cc} := 5.5 \quad \%$$

$$\text{Raffreddamento ONAN} \quad \text{Rendimento:} \quad \eta := 98 \quad \%$$

---

## DIMENSIONAMENTO E PROGETTO

Forma costruttiva : trasformatore a colonne ad avvolgimento concentrico semplice

### PROGETTO DELLA COLONNA

$$\text{Scelta costante di flusso:} \quad K_{\text{wv}} := 1.45$$

$$\text{Flusso di colonna di primo tentativo:} \quad \Phi' := K \cdot \sqrt{\frac{P_n}{f}} \cdot 10^{-2} \quad \Phi' = 0.065 \quad \text{wb}$$

Tipo di lamierino: a grani orientati, costruzione a giunti intercalati

$$\text{Scelta induzione di colonna di primo tentativo} \quad B'_c := 1.75 \quad \text{T}$$

(NB: dipende dalla curva BH: per curva B-H in questo caso vedere la sezione **VERIFICA**)

$$\text{Coefficiente di stipamento:} \quad k_{\text{st}} := 0.93$$

$$\text{Sezione di colonna di solo ferro;} \quad S'_{\text{cfe}} := \frac{\Phi'}{B'_c} \quad S'_{\text{cfe}} = 0.037 \quad \text{m}^2$$

$$\text{Sezione di colonna di primo tentativo:} \quad S'_c := \frac{S'_{\text{cfe}}}{k_{\text{st}}} \quad S'_c = 0.04 \quad \text{m}^2$$

$$S'_c \cdot 10^6 = 3.984 \times 10^4 \quad \text{mm}^2$$

In base alla sezione di colonna di primo tentativo, scelta del coefficiente di utilizzazione della colonna

$$k_u := 0.935$$

$$\text{Scelta diametro circoscritto alla colonna:} \quad D := \sqrt{\frac{4 \cdot S'_c}{\pi \cdot k_u}} \quad D = 0.233 \quad \text{m}$$

Scelta numero gradini della colonna:  $n_{gc} := 6$

Larghezza dei gradini in per uni di D:  $k_1 := 0.967$      $k_2 := 0.875$      $k_3 := 0.768$   
 $k_4 := 0.64$      $k_5 := 0.483$      $k_6 := 0.281$

Larghezza dei pacchetti in millimetri:

$c_1 := k_1 \cdot D \cdot 10^3 = 225.246$      $c_2 := k_2 \cdot D \cdot 10^3 = 203.816$      $c_3 := k_3 \cdot D \cdot 10^3 = 178.892$   
 $c_4 := k_4 \cdot D \cdot 10^3 = 149.077$      $c_5 := k_5 \cdot D \cdot 10^3 = 112.506$      $c_6 := k_6 \cdot D \cdot 10^3 = 65.454$

Larghezza dei pacchetti arrotondata al millimetro;

$c_1 := 225$      $c_2 := 205$      $c_3 := 180$   
 $c_4 := 150$      $c_5 := 110$      $c_6 := 65$

Determinazione dell'altezza dei pacchetti in millimetri:

$$b_1 := \sqrt{(D \cdot 10^3)^2 - c_1^2} \quad b_1 = 60.271$$

$$b_2 := \frac{\sqrt{(D \cdot 10^3)^2 - c_2^2} - b_1}{2} \quad b_2 = 25.165$$

$$b_3 := \frac{\sqrt{(D \cdot 10^3)^2 - c_3^2} - (b_1 + 2 \cdot b_2)}{2} \quad b_3 = 18.621$$

$$b_4 := \frac{\sqrt{(D \cdot 10^3)^2 - c_4^2} - (b_1 + 2 \cdot b_2 + 2 \cdot b_3)}{2} \quad b_4 = 15.182$$

$$b_5 := \frac{\sqrt{(D \cdot 10^3)^2 - c_5^2} - (b_1 + 2 \cdot b_2 + 2 \cdot b_3 + 2 \cdot b_4)}{2} \quad b_5 = 13.558$$

$$b_6 := \frac{\sqrt{(D \cdot 10^3)^2 - c_6^2} - (b_1 + 2 \cdot b_2 + 2 \cdot b_3 + 2 \cdot b_4 + 2 \cdot b_5)}{2} \quad b_6 = 9.178$$

Altezza dei pacchetti arrotondata al millimetro;

$b_1 := 60$      $b_2 := 25$      $b_3 := 19$      $b_4 := 15$      $b_5 := 14$      $b_6 := 9$

Profondità della colonna:

$$L := b1 + 2 \cdot (b2 + b3 + b4 + b5 + b6) \quad L = 224 \quad \text{mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Sezione dei pacchetti in mm}^2: \quad & Sp1 := c1 \cdot b1 & Sp2 := 2c2 \cdot b2 & Sp3 := 2c3 \cdot b3 \\ & Sp4 := 2c4 \cdot b4 & Sp5 := 2c5 \cdot b5 & Sp6 := 2 \cdot c6 \cdot b6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sezione dei pacchetti in cm}^2: \quad & Sp1 \cdot 10^{-2} = 135 & Sp2 \cdot 10^{-2} = 102.5 & Sp3 \cdot 10^{-2} = 68.4 \\ & Sp4 \cdot 10^{-2} = 45 & Sp5 \cdot 10^{-2} = 30.8 & Sp6 \cdot 10^{-2} = 11.7 \end{aligned}$$

Sezione lorda della colonna;

$$S_c := Sp1 + Sp2 + Sp3 + Sp4 + Sp5 + Sp6 \quad S_c = 3.934 \times 10^4 \quad \text{cm}^2$$

Sezione della colonna di solo ferro:

$$S_{cfe} := S_c \cdot k_{st} = 3.659 \times 10^4 \quad S_{cfe} = 3.659 \times 10^4 \quad \text{cm}^2$$

---

## PROGETTO DEL GIOGO

Coefficiente di sovradimensionamento della sezione del giogo rispetto alla sezione di colonna:

$$k_g := 1.15$$

Determinazione delle larghezze dei pacchetti in mm:

$$\begin{aligned} g1 &:= c1 \cdot k_g & g1 &= 258.75 & g4 &:= c4 \cdot k_g & g4 &= 172.5 \\ g2 &:= c2 \cdot k_g & g2 &= 235.75 & g5 &:= c5 \cdot k_g & g5 &= 126.5 \\ g3 &:= c3 \cdot k_g & g3 &= 207 & g6 &:= c6 \cdot 1.15 & g6 &= 74.75 \end{aligned}$$

Larghezze dei pacchetti del giogo arrotondate al mm:

$$g1 := 260 \quad g2 := 235 \quad g3 = 207 \quad g4 = 172.5 \quad g5 = 126.5 \quad g6 = 74.75$$

Altezza del giogo:

$$H_g := g1$$

$$\text{Sezione del giogo lorda:} \quad S_g := S_c \cdot k_g \quad S_g = 4.524 \times 10^4 \quad \text{mm}^2$$

$$\text{Sezione del giogo di solo ferro:} \quad S_{gfe} := S_{cfe} \cdot 1.15 \quad S_{gfe} = 4.207 \times 10^4 \quad \text{mm}^2$$

---

## FLUSSI E INDUZIONI DI COLONNA E GIOGO

Tensione di fase nominale:  $V_{fl} := \sqrt{\frac{COL_1}{3}} \cdot V_{n1}$   $V_{fl} = 230.94$  V

Tensione di spira di primo tentativo:  $V'_{sp} := \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot B'_c \cdot (S_{cfe} \cdot 10^{-6}) \cdot f$   $V'_{sp} = 14.223$  V

Numero spire BT di primo tentativo:  $N1' := \frac{V_{fl}}{V'_{sp}}$   $N1' = 16.237$

Definizione del numero spire BT:  $N1 := 16$

Induzione di colonna effettiva:  $B_c := \frac{V_{fl}}{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}}\right) \cdot N1 \cdot f \cdot (S_{cfe} \cdot 10^{-6})}$   $B_c = 1.776$  T

Flusso di colonna effettiva:  $\Phi_c := B_c \cdot S_{cfe} \cdot 10^{-6}$   $\Phi_c = 0.065$  wb

Induzione effettiva nel giogo:  $B_g := B_c \cdot \frac{S_{cfe}}{S_{gfe}}$   $B_g = 1.544$  T

Tensione di spira effettiva;  $V_{sp} := \frac{V_{fl}}{N1}$   $V_{sp} = 14.434$  V

---

## ALTEZZA DI AVVOLGIMENTO

Corrente di nominale lato BT:  $I_{n1} := \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot V_{n1}}$   $I_{n1} = 1.443 \times 10^3$  A

Corrente di fase nominale lato BT:  $I_{fl} := I_{n1}$   $I_{fl} = 1.443 \times 10^3$  A

Scelta del carico elettrico (densità lineare di corrente)  $A_1 := 380$  A / cm

Altezza di avvolgimento:  $h := \frac{N1 \cdot I_{fl}}{A_1}$   $h = 60.774$  cm

Arrotondamento  $\underline{h} := 605$  mm

---

## DISTANZE DI ISOLAMENTO

Calcolo dei valori minimi:

$$\begin{aligned}x &:= 25 + 1.26 \cdot 10 & x &= 37.6 & \text{mm} \\y &:= 40 + 1.7 \cdot 10 & y &= 57 & \text{mm} \\z &:= 0.85 \cdot 10 & z &= 8.5 & \text{mm}\end{aligned}$$

Determinazione dei valori effettivi (comprensivi di coefficienti di sicurezza)

$$\underline{x} := 50 \quad \underline{z} := 18 \quad \underline{y} := 80 \quad \text{mm}$$

## AVVOLGIMENTO DI BT

Scelta densità di corrente di primo tentativo:  $\sigma'_1 := 3.28 \quad \text{A / mm}^2$

Sezione spira di primo tentativo:  $S'_{sp1} := \frac{I_{f1}}{\sigma'_1} \quad S'_{sp1} = 440.054 \quad \text{mm}^2$

Tipo di avvolgimento: a 4 strati con canale di raffreddamento tra 1 e secondo strato verso colonna, addossato a cartocci

Scelta della piattina

Larghezza e altezza piattina nuda;  $a_1 := 4 \quad b_1 := 11.2 \quad \text{mm}$

Sezione netta piattina  $S_{c1} := 43.9 \quad \text{mm}^2$

Bispessore isolamento piattina:  $b_{is1} := 0.59 \quad \text{mm}$

Numero teorico di piattine in parallelo per spira:  $\frac{S'_{sp1}}{S_{c1}} = 10.024$

Scelta numero piattine (conduttori) in parallelo per spira:  $N_{cs1} := 10$

Sezione effettiva della spira:  $S_{sp1} := N_{cs1} \cdot S_{c1} \quad S_{sp1} = 439 \quad \text{mm}^2$

Numero di piattine sovrapposte in senso assiale nell'avvolgimento:  $n_1 := N_{cs1} \cdot \frac{N1}{4} \quad n_1 = 40$

Numero di piattine in senso radiale nell'avvolgimento:  $m_1 := 4$

Densità effettiva di corrente:  $\sigma_1 := \frac{I_{f1}}{S_{sp1}} \quad \sigma_1 = 3.288 \quad \text{A / mm}^2$

Altezza calcolata dell'avvolgimento:  $h' := (b_1 + b_{is1}) \cdot N_{cs1} \cdot \left( \frac{N1}{4} + 1 \right) \quad h' = 589.5 \quad \text{mm}$

Errore rispetto all'altezza determinata:  $h = 605 \quad \frac{h - h'}{h} \cdot 100 = 2.562 \quad \%$

Errore compensabile in fase di costruzione/realizzazione costruttiva -->  $h_1 := h$

Larghezza canale assiale (sia per BT sia per AT):  $a_{ca} := 8 \text{ mm}$

Spessore isolamento di strato (tra piattine e canale, piattine e cartocci):  $a_{is1} := 0.5 \text{ mm}$

Dimensione assiale dell'avvolgimento:  $\theta_1 := 4 \cdot (a_1 + b_{is1}) + 6 \cdot a_{is1} + a_{ca} \quad \theta_1 = 29.36 \text{ mm}$

Spessore cartoccio (sia tra colonna e BT, sia tra AT e BT):  $a_{cart} := 4 \text{ mm}$

Diametro interno avvolgimento:  $D_{1i} := D \cdot 10^3 + 2 \cdot a_{cart} \quad D_{1i} = 240.933 \text{ mm}$

Diametro esterno avvolgimento:  $D_{1e} := D_{1i} + 2 \cdot \theta_1 \quad D_{1e} = 299.653 \text{ mm}$

Distanza tra avvolgimento di BT e AT;  $\theta := a_{cart} + a_{ca} \quad \theta = 12 \text{ mm}$

## AVVOLGIMENTO DI AT

Tensione nominale di fase lato AT;  $V_{f2} := \frac{V_{n2}}{\sqrt{3}} \quad V_{f2} = 5.774 \times 10^3 \text{ V}$

Tensione di spira:  $V_{sp} = 14.434 \text{ V}$

Numero teorico di spire di AT:  $N2' := \frac{V_{f2}}{V_{sp}} \quad N2' = 400$

Numero effettivo di spire di AT:  $N2 := 400$

Corrente di fase lato AT:  $I_{n2} := \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot V_{n2}} \quad I_{f2} := I_{n2} \quad I_{n2} = 57.735 \text{ A}$

Densità di corrente di primo tentativo lato AT:  $\sigma'_2 := 4.2 \text{ A/mm}^2$

Sezione di spira teorica:  $S'_{sp2} := \frac{I_{f2}}{\sigma'_2} \quad S'_{sp2} = 13.746 \text{ mm}^2$

Scelta avvolgimento: a dischi

Scelta piattina:

Dimensioni piattina nuda:  $a_2 := 2.24 \quad b_2 := 6.3 \text{ mm}$

Sezione netta piattina:  $S_{c2} := 13.75 \text{ mm}^2$

Bispessore isolamento piattina:  $b_{is2} := 0.55 \text{ mm}$

Numero piattine (conduttori per spira):	$N_{cs2} := 1$		
Numero di piattine affiancate in senso radiale:	$m_2 := 10$		
Numero di piattine sovrapposte in senso assiale:	$n_2 := 40$		
Densità di corrente effettiva:	$\sigma_2 := \frac{I_{f2}}{S_{c2}}$	$\sigma_2 = 4.199$	A / mm <sup>2</sup>
Sezione effettiva di spira:	$S_{sp2} := N_{cs2} \cdot S_{c2}$	$S_{sp2} = 13.75$	mm <sup>2</sup>
Altezza canale radiale di raffreddamento AT:	$b_{cr2} := 7.9$		
Altezza calcolata avvolgimento;	$h_2 := (b_2 + b_{is2} + b_{cr2}) \cdot \left( \frac{N_2}{m_2} + 1 \right)$	$h_2 = 604.75$	mm
Spessore in senso radiale dell'avvolgimento;	$\theta_2 := m_2 \cdot (a_2 + b_{is2})$	$\theta_2 = 27.9$	
Diametro interno avvolgimento;	$D_{2i} := D_{1e} + 2 \cdot \theta$	$D_{2i} = 323.653$	mm
Diametro esterno avvolgimento;	$D_{2e} := D_{2i} + 2 \cdot \theta_2$	$D_{2e} = 379.453$	mm

## INTERASSE TRA COLONNE E ALTEZZA DI COLONNA

Interasse :	$X := D_{2e} + z$	$X = 397.453$	mm
Altezza :	$\overset{H}{\underset{H}{H}} := h + 2 \cdot x$	$h = 605$	mm
Larghezza di colonna :	$a_{col} := c1$	$a_{col} = 225$	mm

Verifica rapporti dimensionali :

$\frac{H}{a_{col}} = 3.133$	$\frac{X}{a_{col}} = 1.766$	$\frac{H}{X} = 1.774$	$\frac{L}{a_{col}} = 0.996$
2.5 - 4.5	1.6 - 2.6	1.2 - 1.8	ca 1

## DIMENSIONAMENTO CASSONE

Battente d'olio tra giogo superiore e coperchio:

$$h_{b\_sup} := 300 \quad \text{mm}$$



Battente d'olio tra giogo inferiore e fondo:

$$h_{b\_inf} := 50 \quad \text{mm}$$

Altezza cassone;

$$H_{cass} := H + 2 \cdot H_g + h_{b\_sup} + h_{b\_inf} \quad H_{cass} = 1.575 \times 10^3 \quad \text{mm}$$

Raggio avvolgimento di AT:  $R_{2e} := \frac{D_{2e}}{2} \quad R_{2e} = 189.726 \quad \text{mm}$

Raggio di curvatura superficie laterale cassone:  $R_{cass} := R_{2e} + y \quad R_{cass} = 269.726 \quad \text{mm}$

Calcolo delle perdite totali in base a rendimento di specifica e fattore di potenza = 1:  $\eta := 0.98$

Perdite totali teoriche:  $P_t := P_n \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} \quad P_t = 20.408 \quad \text{kW}$

Superficie totale di scambio termico (inclusa alettatura)  $S := 38 \cdot (P_t \cdot 1000) \quad S = 7.755 \times 10^5 \quad \text{cm}^2$   
 $S \cdot 10^{-4} = 77.551 \quad \text{m}^2$

Scelta altezza dell'aletta:  $h_a := 250 \quad \text{mm}$

Perimetro interno del cassone, esclusa alettatura:

$$P_i := 4 \cdot X + 2 \cdot \pi \cdot R_{cass} \quad P_i = 3.285 \times 10^3 \quad \text{mm} \quad P_i \cdot 10^{-3} = 3.285 \quad \text{m}$$

Sviluppo perimetrale del mantello, inclusa alettatura:

$$L := \frac{(S \cdot 10^2)}{H_{cass}} \quad L = 4.924 \times 10^4 \quad \text{mm} \quad L \cdot 10^{-3} = 49.239 \quad \text{m}$$

Numero teorico di alette:  $N' := \frac{L - P_i}{2 \cdot h_a} \quad N' = 91.908$

Numero di alette:  $N := 92$

Passo di alettatura:  $\tau_a := \frac{P_i}{N} \quad \tau_a = 35.702 \quad \text{mm}$

Scelta rapporto b/a (b= distanza tra due alette successive, a=larghezza aletta)  $k := 2.8$

Larghezza aletta:  $a := \frac{\tau_a}{1 + k} \quad a = 9.395 \quad \text{mm}$

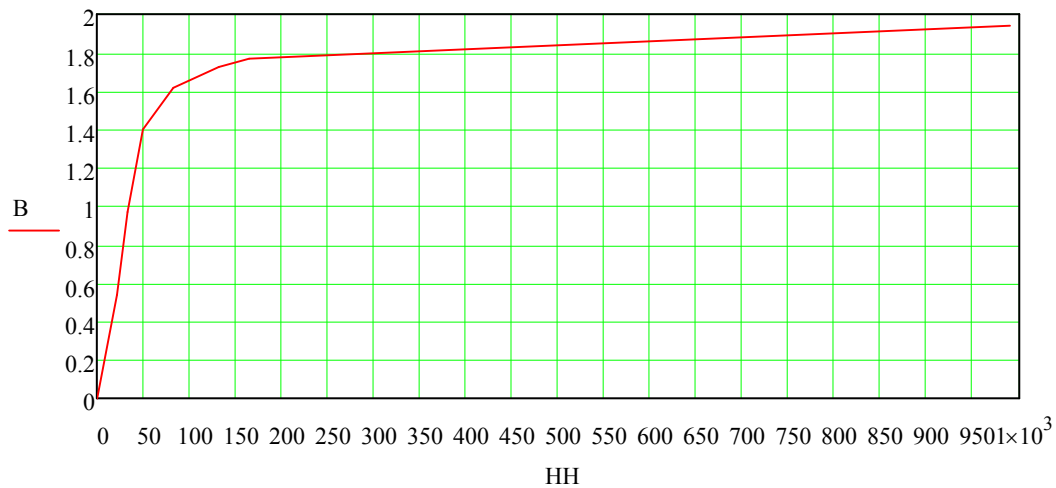
Distanza tra alette:  $b := a \cdot k \quad b = 26.306$

# VERIFICA

## CALCOLO DELLA CORRENTE MAGNETIZZANTE

La curva B-H del lamierino selezionato è la seguente:

HH :=	$\begin{pmatrix} 0 \\ 21.45 \\ 33 \\ 49.5 \\ 82.5 \\ 132 \\ 165 \\ 990 \end{pmatrix}$	B :=	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.539394 \\ 0.970909 \\ 1.402424 \\ 1.618182 \\ 1.726061 \\ 1.769212 \\ 1.941818 \end{pmatrix}$
-------	---	------	---



Calcolo dell'interpolante cubica della curva H-B:

$$vs := \text{cspline}(B, HH) \quad y(x) := \text{interp}(vs, B, HH, x)$$

Calcolo del campo H nella colonna e nel giogo;

$B_c = 1.776$	T	----->	$H_c := y(B_c)$	$H_c = 172.641$	A / m
$B_g = 1.544$	T	----->	$H_g := y(B_g)$	$H_g = 63.965$	A / m

Calcolo del campo H nel traferro (equivalente):

$$H_a := \frac{B_c}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \quad H_a = 1.413 \times 10^6 \quad \text{A / m}$$

Lunghezza tratto circuito magnetico nel giogo di competenza delle colonne laterali:

$$L_g := X + \frac{H_g}{2} \quad L_g = 429.435 \quad \text{mm}$$

Lunghezza tratto circuito magnetico relativo ad una colonna:

$$L_c := H \quad L_c = 705 \quad \text{mm}$$

Lunghezza tratto circuito magnetico relativo al traferro equivalente:

$$L_a := 0.12 \quad \text{mm}$$

Amperspire medie tototali per fase;

$$AS_{\text{tot}} := H_c \cdot L_c \cdot 10^{-3} + H_g \cdot L_g \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4}{3} + 2 \cdot H_a \cdot L_a \cdot 10^{-3} \quad AS_{\text{tot}} = 497.516 \quad \text{A}$$

Corrente magnetizzante di fase:

$$I_m := \frac{AS_{\text{tot}}}{\sqrt{2} \cdot N1} \quad I_m = 21.987 \quad I_{m\%} := \frac{I_m}{I_{f1}} \cdot 100 \quad I_{m\%} = 1.523$$

---

## **PERDITE NEL FERRO**

Densità del nucleo laminato;

$$\gamma_{\text{lam}} := 7.65 \cdot 10^{-6} \quad \text{kg / mm}^3$$

Massa delle colonne;

$$G_c := 3 \cdot S_c \cdot H \cdot \gamma_{\text{lam}} \quad G_c = 636.511$$

Massa dei gioghi in zona non comprendente giunti:

$$G_{g1} := 4 \cdot X \cdot S_g \cdot \gamma_{\text{lam}} \quad G_{g1} = 550.223$$

Massa dei gioghi in zona giunti:

$$G_{g2\_A} := b1 \cdot \frac{c1}{2} \cdot g1 + 2 \cdot b2 \cdot \frac{c2}{2} \cdot g2 + 2 \cdot b2 \cdot \frac{c2}{2} \cdot g2 + 2 \cdot b3 \cdot \frac{c3}{2} \cdot g3$$

$$G_{g2\_B} := 2 \cdot b4 \cdot \frac{c4}{2} \cdot g4 + 2 \cdot b5 \cdot \frac{c5}{2} \cdot g5 + 2 \cdot b6 \cdot \frac{c6}{2} \cdot g6$$

$$G_{g2} := 4 \cdot (G_{g2\_A} + G_{g2\_B}) \cdot \gamma_{\text{lam}} \quad G_{g2} = 168.25 \quad \text{kg}$$

Massa dei gioghi:

$$G_g := G_{g1} + G_{g2} \quad G_g = 718.473$$

Massa del nucleo magnetico

$$G_{fe} := G_c + G_g \quad G_{fe} = 1.355 \times 10^3$$

Perdite specifiche in giogo e colonna (da curva perdite a 50 Hz)

$$B_c = 1.776 \quad T \quad \longrightarrow \quad p_{s\_c} := 1.54 \quad W / kg$$

$$B_g = 1.544 \quad T \quad \longrightarrow \quad p_{s\_g} := 1.1 \quad W / kg$$

$$\text{Coefficiente di lavorazione:} \quad k_L := 1.1$$

$$\text{Coefficiente di maggiorazione delle perdite nella zona giunti:} \quad k_m := 1.5$$

Perdite nel ferro (isteresi + correnti parassite)

$$P_{fe} := [p_{s\_c} \cdot G_c + p_{s\_g} \cdot (G_{g1} + k_m \cdot G_{g2})] \cdot k_L \quad P_{fe} = 2.049 \times 10^3 \quad kW$$

## PERDITE NEL RAME

Calcolo dei diametri medi degli avvolgimenti;

$$D_{1m} := \frac{D_{1i} + D_{1e}}{2} \quad D_{1m} = 270.293 \quad mm$$

$$D_{2m} := \frac{D_{2i} + D_{2e}}{2} \quad D_{2m} = 351.553 \quad mm$$

Resistenza avvolgimenti in cc:

$$r_{1cc} := 0.021 \cdot \frac{(\pi \cdot D_{1m} \cdot 10^{-3}) \cdot N1}{S_{sp1}} \quad r_{1cc} = 6.499 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

$$r_{2cc} := 0.021 \cdot \frac{(\pi \cdot D_{2m} \cdot 10^{-3}) \cdot N2}{S_{sp2}} \quad r_{2cc} = 0.675 \quad \Omega$$

$$\text{Altezza ridotta piattina BT:} \quad \xi_1 := 0.98 \cdot a_1 \cdot 10^{-1} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot b_1}{h_1}} \quad \xi_1 = 0.337$$

$$\text{Coefficiente di resistenza BT:} \quad kr_1 := 1 + \frac{m_1^2 - 0.2}{9} \cdot \xi_1^4 \quad kr_1 = 1.023$$

Altezza ridotta piattina AT:  $\xi_2 := 0.98 \cdot a_2 \cdot 10^{-1} \cdot \sqrt{\frac{n_2 \cdot b_2}{h_2}}$   $\xi_2 = 0.142$

Coefficiente di resistenza AT:  $kr_2 := 1 + \frac{m_2^2 - 0.2}{9} \cdot \xi_2^4$   $kr_2 = 1.004$

Resistenze avvolgimenti in c.a. a 50 Hz

$r_{1ca} := r_{1cc} \cdot kr_1$   $r_{1ca} = 6.647 \times 10^{-4} \quad \Omega$

$r_{2ca} := r_{2cc} \cdot kr_2$   $r_{2ca} = 0.678 \quad \Omega$

Resistenza totale riportata sul lato BT:

$R_{tot} := r_{1ca} + r_{2ca} \cdot \left(\frac{N1}{N2}\right)^2$   $R_{tot} = 1.749 \times 10^{-3} \quad \Omega$

Perdite Joule a carico nominale

$P_{Jn} := 3 \cdot R_{tot} \cdot I_{f1}^2$   $P_{Jn} = 1.093 \times 10^4 \quad W$

Perdite Joule a vuoto

$P_{J0} := 3 \cdot R_{tot} \cdot I_m^2$   $P_{J0} = 2.537 \quad W$

Corrente attiva nel funzionamento a vuoto;

$I_a := \frac{P_{J0} + P_{fe}}{\sqrt{3} \cdot V_{n1}}$   $I_a = 2.962 \quad A$

Corrente a vuoto:

$I_0 := \sqrt{I_m^2 + I_a^2}$   $I_0 = 22.186 \quad A$

## **RENDIMENTO**

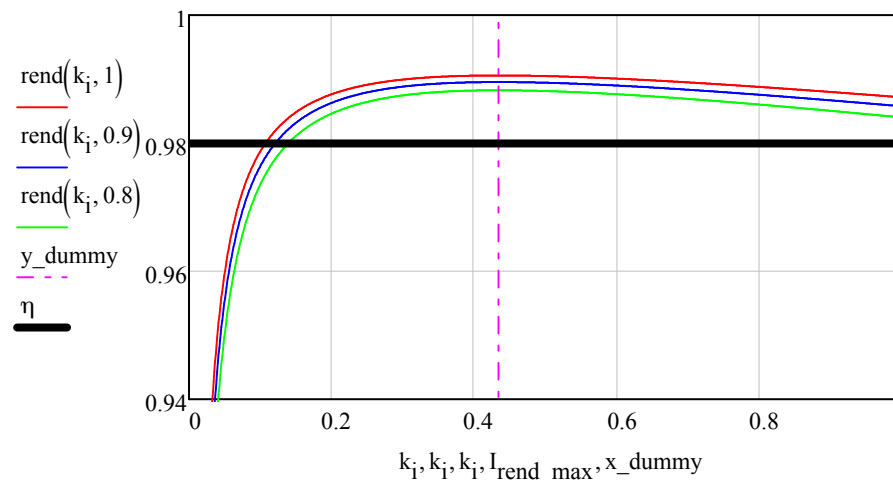
Rapporto perdite:  $\frac{P_{Jn}}{P_{fe}} = 5.334$

Corrente di rendimento massimo;  $I_{rend\_max} := \sqrt{\frac{P_{fe}}{P_{Jn}}}$   $I_{rend\_max} = 0.433 \quad p.u.$

Plottaggio del rendimento in funzione del fattore di carico "ki" (ki = I / In) del fattore di potenza FP:

$$\text{rend}(k_i, \text{FP}) := \frac{P_n \cdot 10^3 \cdot k_i \cdot \text{FP}}{P_n \cdot 10^3 \cdot k_i \cdot \text{FP} + P_{fe} + P_{Jn} \cdot k_i^2}$$

$$x\_dummy := 0..1 \quad y\_dummy := 0..1$$



Rendimenti a pieno carico:                       $\text{rend}(1, 1) = 0.987$                        $\text{rend}(1, 0.8) = 0.984$

Rendimenti a metà carico:                       $\text{rend}(0.5, 1) = 0.991$                        $\text{rend}(0.5, 0.8) = 0.988$

Il limite di specifica  $h = 98\% +$  ampiamente rispettato. Si conferma che ci sono margini per un sovradimensionamento degli avvolgimenti rispetto alle dimensioni scelte.

## REATTANZA DI DISPERSIONE E TENSIONE DI C.C.

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

Induttanza di dispersione totale riferita al lato BT:

$$L_d := \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot D_{1m} \cdot N^2}{h} \cdot \left( \frac{\theta_1}{3} + \theta + \frac{\theta_2}{3} \right) \cdot 10^{-3} \quad L = 4.924 \times 10^{-4} \quad \text{H}$$

Reattanza di dispersione:

$$X_{\text{tot}} := L_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad X_{\text{tot}} = 4.41 \times 10^{-3} \quad \Omega$$

Impedenza base:

$$Z_b := \frac{V_{n1}}{\sqrt{3} \cdot I_{n1}} \quad Z_b = 0.16 \quad \Omega$$

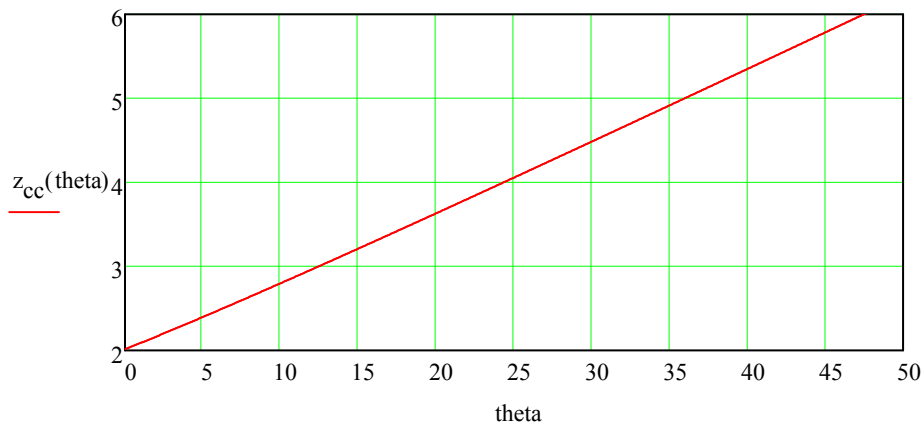
Impedenza di corto circuito;

$$Z_{cc} := \sqrt{R_{tot}^2 + X_{tot}^2} \quad Z_{cc} = 4.744 \times 10^{-3} \quad \Omega$$

$$V_{cc\%} := \frac{Z_{cc}}{Z_b} \cdot 100 \quad V_{cc\%} = 2.965 \quad \%$$

Per avere il 5.5% di specifica conviene agire sullo spazio tra avvolgimenti (theta):

$$z_{cc}(\theta) := \frac{\sqrt{R_{tot}^2 + \left[ \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot D_{1m} \cdot N1^2}{h} \cdot \left( \frac{\theta_1}{3} + \theta + \frac{\theta_2}{3} \right) \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \right]^2}}{Z_b} \cdot 100$$



Per avere il 5.5% di V<sub>cc</sub> sarebbe necessario portare la distanza tra avvolgimento di AT e BT a circa 42 mm.

In alternativa, qualora la verifica termica portasse a ritenere il progetto dell'avvolgimento critico dal punto di vista delle sovratemperature previste, è conveniente aumentare la sezione delle spire ed espandere gli avvolgimenti in senso radiale. In questo modo si aumenta automaticamente anche la reattanza di dispersione e quindi la tensione di c.c.

## VERIFICA TERMICA

### Stima $\Delta T$ medio del rame rispetto all'olio

Coefficiente di ricoprimento per canali assiali e radiali:

$$k_{ric\_ass} := 0.85 \quad k_{ric\_rad} := 0.75$$

Superficie di dispersione termica equivalente per l'avvolgimento di BT:

$$S_{\text{disp1}} := 2 \cdot (\pi \cdot D_{1m} \cdot h \cdot 10^{-6}) \cdot k_{\text{ric\_ass}} \quad S_{\text{disp1}} = 0.873 \quad \text{m}^2$$

Superficie di dispersione termica equivalente per l'avvolgimento di AT:

$$S_{\text{disp2}} := 2 \cdot (b_2 \cdot n_2 \cdot \pi \cdot D_{2m} \cdot 10^{-6}) \cdot k_{\text{ric\_ass}} + 2 \cdot n_2 \cdot (\pi \cdot D_{2m} \cdot \theta_2 \cdot 10^{-6}) \cdot k_{\text{ric\_rad}} \\ S_{\text{disp2}} = 2.322 \quad \text{m}^2$$

Flusso termico attraverso la superficie disperdente nell'avvolgimento di BT:

$$q_1 := \frac{r_{1ca} \cdot I_{f1}^2}{S_{\text{disp1}}} \quad q_1 \cdot 10^{-4} = 0.159 \quad \text{W / cm}^2$$

Flusso termico attraverso la superficie disperdente nell'avvolgimento di AT:

$$q_2 := \frac{r_{2ca} \cdot I_{f2}^2}{S_{\text{disp2}}} \quad q_2 \cdot 10^{-4} = 0.097 \quad \text{W / cm}^2$$

Coefficiente di scambio termico convettivo dell'olio per convezione naturale:

$$\alpha_{\text{olio}} := 80 \quad \text{W / (}^\circ\text{C m}^2)$$

Sovratemperatura media stimata del rame di BT rispetto all'olio:

$$\Delta T_1 := \frac{q_1}{\alpha_{\text{olio}}} \quad \Delta T_1 = 19.82 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 := \frac{q_2}{\alpha_{\text{olio}}} \quad \Delta T_2 = 12.162 \quad ^\circ\text{C}$$

---

## **Stima $\Delta T$ massima dell'olio rispetto all'aria**

Superficie disperdente totale del cassone:

$$S = 7.755 \times 10^5 \quad \text{cm}^2 \quad S \cdot 10^{-4} = 77.551 \quad \text{m}^2$$

Superficie disperdente del cassone che contribuisce all'irraggiamento;

$$A := S \cdot \frac{\tau_a}{2 \cdot h_a + \tau_a} \quad A = 5.168 \times 10^4 \quad \text{cm}^2$$

Flusso termico totale attraverso il cassone:

$$q := \frac{P_{Jn} + P_{fe}}{S \cdot 10^{-4}} \quad q = 167.386 \quad \text{W / m}^2$$



Rapporto di irraggiamento:

$$i := \frac{A}{S} \quad i = 0.067$$

Sovratemperatura massima dell'olio rispetto all'aria:

$$\Delta T_{\text{max\_olio\_aria}} := \frac{0.23 \cdot q}{i + 0.8 + 0.001 \cdot q} \quad \Delta T_{\text{max\_olio\_aria}} = 37.232 \quad ^\circ\text{C}$$

E' verificato che tale sovratemperatura è minore di 50 °C.

## **Stima $\Delta T$ media dell'olio rispetto all'aria**

Stima della sovratemperatura media del cassone rispetto all'aria:

$$\Delta T_{\text{med\_cass\_aria}} := \frac{0.13 \cdot q}{i + 0.8} \quad \Delta T_{\text{med\_cass\_aria}} = 25.109 \quad ^\circ\text{C}$$

Stima della sovratemperatura media dell'olio rispetto all'aria:

$$\Delta T_{\text{med\_olio\_aria}} := \frac{\Delta T_{\text{max\_olio\_aria}} + \Delta T_{\text{med\_cass\_aria}}}{2}$$

$$\Delta T_{\text{med\_olio\_aria}} = 31.17 \quad ^\circ\text{C}$$

## **Stima $\Delta T$ media del rame rispetto all'aria**

Sovratemperatura media dell'avvolgimento sull'aria:

$$\Delta T_{\text{avv\_aria\_1}} := \Delta T_{\text{med\_olio\_aria}} + \Delta T_1 = 50.99 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{avv\_aria\_2}} := \Delta T_{\text{med\_olio\_aria}} + \Delta T_2 = 43.332 \quad ^\circ\text{C}$$