

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

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

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

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**)

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

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

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

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

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: $V_{f1} := \sqrt{\frac{COL_1}{3}} \cdot V_{n1}$ $V_{f1} = 230.94$ 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: $N1' := \frac{V_{f1}}{V'_{sp}}$ $N1' = 16.237$

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

Induzione di colonna effettiva: $B_c := \frac{V_{f1}}{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}}\right) \cdot N1 \cdot f \cdot (S_{cfe} \cdot 10^{-6})}$ $B_c = 1.776$ 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; $V_{sp} := \frac{V_{f1}}{N1}$ $V_{sp} = 14.434$ 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: $I_{f1} := I_{n1}$ $I_{f1} = 1.443 \times 10^3$ A

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

Altezza di colonna: $h := \frac{N1 \cdot I_{f1}}{A_i}$ $h = 60.774$ cm

Arrotondamento $h := 605$ 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)

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

AVVOLGIMENTO DI BT

Scelta densità di corrente di primo tentativo: $\sigma'_1 := 4.2 \quad \text{A / mm}^2$

Sezione spira di primo tentativo: $S'_{sp1} := \frac{I_{f1}}{\sigma'_1} \quad S'_{sp1} = 343.661 \quad \text{mm}^2$

Tipo di avvolgimento: a 2 strati con canale di raffreddamento centrale, addossato a cartocci

Scelta della piattina

Larghezza e altezza piattina nuda; $a_1 := 5.6 \quad b_1 := 12.5 \quad \text{mm}$

Sezione netta piattina $S_{c1} := 69.1 \quad \text{mm}^2$

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

Numero teorico di piattine in parallelo per spira: $\frac{S'_{sp1}}{S_{c1}} = 4.973$

Scelta numero piattine (conduttori) in parallelo per spira: $N_{cs1} := 5$

Sezione effettiva della spira: $S_{sp1} := N_{cs1} \cdot S_{c1} \quad S_{sp1} = 345.5 \quad \text{mm}^2$

Numero di piattine sovrapposte in senso assiale nell'avvolgimento: $n_1 := N_{cs1} \cdot \frac{N1}{2} \quad n_1 = 40$

Numero di piattine in senso radiale nell'avvolgimento: $m_1 := 2$

Densità effettiva di corrente: $\sigma_1 := \frac{I_{f1}}{S_{sp1}} \quad \sigma_1 = 4.178 \quad \text{A / mm}^2$

Altezza calcolata dell'avvolgimento: $h' := (b_1 + b_{is1}) \cdot N_{cs1} \cdot \left(\frac{N1}{2} + 1 \right) \quad h' = 589.05 \quad \text{mm}$

Errore rispetto all'altezza determinata: $h = 605 \quad \frac{h - h'}{h} \cdot 100 = 2.636 \quad \%$

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:	$\theta_1 := 2 \cdot (a_1 + b_{is1}) + 4 \cdot a_{is1} + a_{ca} \quad \theta_1 = 22.38 \text{ mm}$
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:	$D_{1e} := D_{1i} + 2 \cdot \theta_1 \quad D_{1e} = 285.693 \text{ mm}$
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;	$V_{f2} := \frac{V_{n2}}{\sqrt{3}}$	$V_{f2} = 5.774 \times 10^3 \text{ V}$	V
Tensione di spira:	$V_{sp} = 14.434 \text{ V}$		
Numero teorico di spire di AT:	$N2' := \frac{V_{f2}}{V_{sp}}$	$N2' = 400$	
Numero effettivo di spire di AT:	$N2 := 400$		
Corrente di fase lato AT:	$I_{n2} := \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot V_{n2}}$	$I_{f2} := I_{n2}$	$I_{n2} = 57.735 \text{ A}$
Densità di corrente di primo tentativo lato AT:	$\sigma'_2 := 4.2$	A/mm^2	
Sezione di spira teorica:	$S'_{sp2} := \frac{I_{f2}}{\sigma'_2}$	$S'_{sp2} = 13.746$	mm^2
Scelta avvolgimento: a dischi			
Scelta piattina:			
Dimensioni piattina nuda:	$a_2 := 2.24$	$b_2 := 6.3$	mm
Sezione netta piattina:	$S_{c2} := 13.75$	mm^2	
Bispessore isolamento piattina:	$b_{is2} := 0.55$	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 ²
Sezione effettiva di spira:	$S_{sp2} := N_{cs2} \cdot S_{c2}$	$S_{sp2} = 13.75$	mm ²
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;	$D_{2i} := D_{1e} + 2 \cdot \theta$	$D_{2i} = 309.693$	mm
Diametro esterno avvolgimento;	$D_{2e} := D_{2i} + 2 \cdot \theta_2$	$D_{2e} = 365.493$	mm

INTERASSE TRA COLONNE E ALTEZZA DI COLONNA

Interasse :	$X := D_{2e} + z$	$X = 383.493$	mm
Altezza :	$H := h + 2 \cdot x$	$h = 605$	mm
Larghezza di colonna :	$a_{col} := c1$	$a_{col} = 225$	mm

Verifica rapporti dimensionali :

$\frac{H}{a_{col}} = 3.133$	$\frac{X}{a_{col}} = 1.704$	$\frac{H}{X} = 1.838$	$\frac{L}{a_{col}} = 0.996$
2.5 - 4.5	1.6 - 2.6	1.2 - 1.8 (*)	ca 1

(*) il fatto di avere X piccolo rispetto a H significa che c'è ampio margine per aumentare la larghezza degli avvolgimenti per ridurre la sovratemperatura.

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;

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

$$\text{Raggio avvolgimento di AT:} \quad R_{2e} := \frac{D_{2e}}{2} \quad R_{2e} = 182.746 \quad \text{mm}$$

$$\text{Raggio di curvatura superficie laterale cassone:} \quad R_{cass} := R_{2e} + y \quad R_{cass} = 262.746 \quad \text{mm}$$

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

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

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

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

Perimetro interno del cassone, esclusa alettatura:

$$P_i := 4 \cdot X + 2 \cdot \pi \cdot R_{cass} \quad P_i = 3.185 \times 10^3 \quad \text{mm} \quad P_i \cdot 10^{-3} = 3.185 \quad \text{m}$$

Sviluppo perimetrale del mantello, inclusa alettatura:

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

$$\text{Numero teorico di alette:} \quad N' := \frac{L - P_i}{2 \cdot h_a} \quad N' = 92.108$$

$$\text{Numero di alette:} \quad N := 92$$

$$\text{Passo di alettatura:} \quad \tau_a := \frac{P_i}{N} \quad \tau_a = 34.618 \quad \text{mm}$$

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

$$\text{Larghezza aletta:} \quad a := \frac{\tau_a}{1 + k} \quad a = 9.11 \quad \text{mm}$$

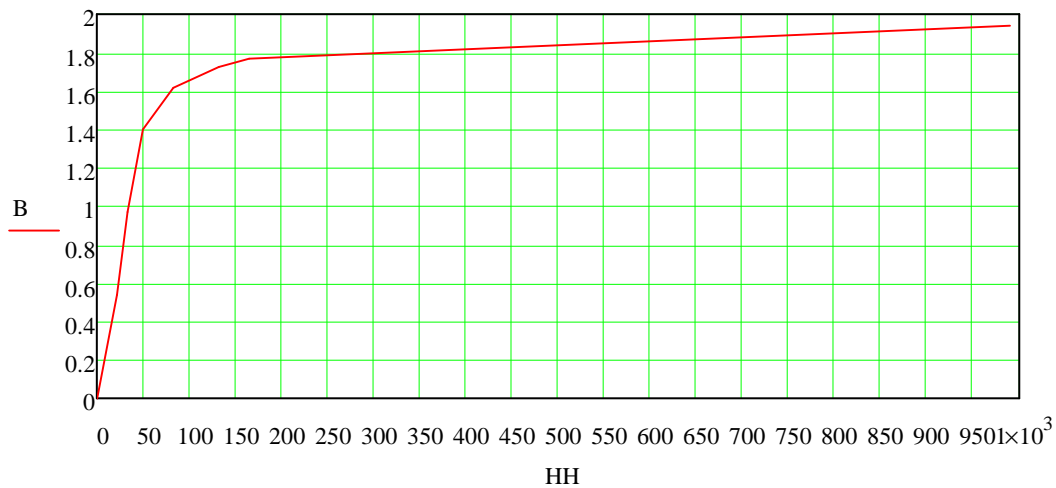
$$\text{Distanza tra alette:} \quad b := a \cdot k \quad b = 25.508$$

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;

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

Calcolo del campo H nel traferro (equivalente):

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

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

$$L_g := X + \frac{H_g}{2} \quad L_g = 415.475 \quad \text{mm}$$

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;

$$AS_{\text{tot}} := H_c \cdot L_c \cdot 10^{-3} + H_g \cdot L_g \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4}{3} + 2 \cdot H_a \cdot L_a \cdot 10^{-3} \quad AS_{\text{tot}} = 496.325 \quad \text{A}$$

Corrente magnetizzante di fase:

$$I_m := \frac{AS_{\text{tot}}}{\sqrt{2} \cdot N1} \quad I_m = 21.935 \quad I_{m\%} := \frac{I_m}{I_{f1}} \cdot 100 \quad I_{m\%} = 1.52$$

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:

$$G_{g1} := 4 \cdot X \cdot S_g \cdot \gamma_{\text{lam}} \quad G_{g1} = 530.897$$

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:

$$G_g := G_{g1} + G_{g2} \quad G_g = 699.147$$

Massa del nucleo magnetico

$$G_{fe} := G_c + G_g \quad G_{fe} = 1.336 \times 10^3$$

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

$$B_c = 1.776 \quad \text{T} \quad \text{----->} \quad p_{s_c} := 1.54 \quad \text{W / kg}$$

$$B_g = 1.544 \quad \text{T} \quad \text{----->} \quad p_{s_g} := 1.1 \quad \text{W / kg}$$

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

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

Perdite nel ferro (isteresi + correnti parassite)

$$P_{fe} := [p_{s_c} \cdot G_c + p_{s_g} \cdot (G_{g1} + k_m \cdot G_{g2})] \cdot k_L \quad P_{fe} = 2.026 \times 10^3 \quad \text{kW}$$

PERDITE NEL RAME

Calcolo dei diametri medi degli avvolgimenti;

$$D_{1m} := \frac{D_{1i} + D_{1e}}{2} \quad D_{1m} = 263.313 \quad \text{mm}$$

$$D_{2m} := \frac{D_{2i} + D_{2e}}{2} \quad D_{2m} = 337.593 \quad \text{mm}$$

Resistenza avvolgimenti in cc:

$$r_{1cc} := 0.021 \cdot \frac{(\pi \cdot D_{1m} \cdot 10^{-3}) \cdot N1}{S_{sp1}} \quad r_{1cc} = 8.045 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

$$r_{2cc} := 0.021 \cdot \frac{(\pi \cdot D_{2m} \cdot 10^{-3}) \cdot N2}{S_{sp2}} \quad r_{2cc} = 0.648 \quad \Omega$$

$$\text{Altezza ridotta piattina BT:} \quad \xi_1 := 0.98 \cdot a_1 \cdot 10^{-1} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot b_1}{h_1}} \quad \xi_1 = 0.499$$

$$\text{Coefficiente di resistenza BT:} \quad kr_1 := 1 + \frac{m_1^2 - 0.2}{9} \cdot \xi_1^4 \quad kr_1 = 1.026$$

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

$r_{1ca} := r_{1cc} \cdot kr_1$ $r_{1ca} = 8.255 \times 10^{-4} \quad \Omega$

$r_{2ca} := r_{2cc} \cdot kr_2$ $r_{2ca} = 0.651 \quad \Omega$

Resistenza totale riportata sul lato BT:

$R_{tot} := r_{1ca} + r_{2ca} \cdot \left(\frac{N1}{N2}\right)^2$ $R_{tot} = 1.867 \times 10^{-3} \quad \Omega$

Perdite Joule a carico nominale

$P_{Jn} := 3 \cdot R_{tot} \cdot I_{f1}^2$ $P_{Jn} = 1.167 \times 10^4 \quad W$

Perdite Joule a vuoto

$P_{J0} := 3 \cdot r_{1ca} \cdot I_m^2$ $P_{J0} = 1.192 \quad W$

Corrente attiva nel funzionamento a vuoto;

$I_a := \frac{P_{J0} + P_{fe}}{\sqrt{3} \cdot V_{n1}}$ $I_a = 2.926 \quad A$

Corrente a vuoto:

$I_0 := \sqrt{I_m^2 + I_a^2}$ $I_0 = 22.129 \quad A$

RENDIMENTO

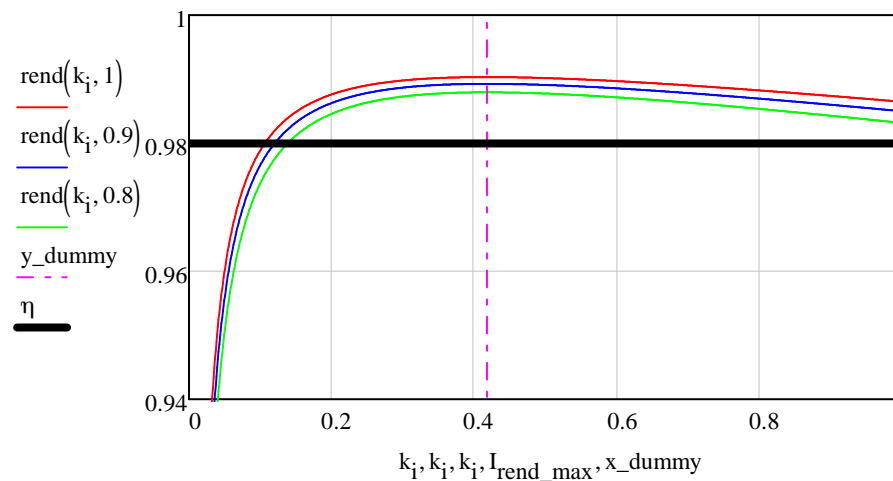
Rapporto perdite: $\frac{P_{Jn}}{P_{fe}} = 5.759$

Corrente di rendimento massimo; $I_{rend_max} := \sqrt{\frac{P_{fe}}{P_{Jn}}}$ $I_{rend_max} = 0.417 \quad p.u.$

Plottaggio del rendimento in funzione del fattore di carico "ki" ($k_i = I / I_n$) 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: $\text{rend}(1, 1) = 0.986$ $\text{rend}(1, 0.8) = 0.983$

Rendimenti a metà carico: $\text{rend}(0.5, 1) = 0.99$ $\text{rend}(0.5, 0.8) = 0.988$

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:

$$X_{\text{tot}} := L_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad X_{\text{tot}} = 3.974 \times 10^{-3} \quad \Omega$$

Impedenza base:

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

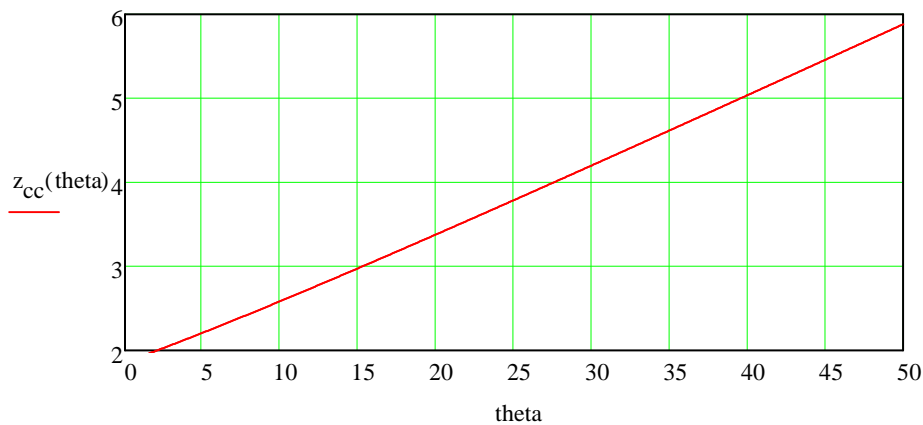
Impedenza di corto circuito;

$$Z_{cc} := \sqrt{R_{tot}^2 + X_{tot}^2} \quad Z_{cc} = 4.391 \times 10^{-3} \quad \Omega$$

$$V_{cc\%} := \frac{Z_{cc}}{Z_b} \cdot 100 \quad V_{cc\%} = 2.744 \quad \%$$

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 Vcc sarebbe necessario portare la distanza tra avvolgimento di AT e BT a circa 45 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 ΔT 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:

$$S_{\text{disp1}} := 2 \cdot (\pi \cdot D_{1m} \cdot h \cdot 10^{-6}) \cdot k_{\text{ric_ass}} \quad S_{\text{disp1}} = 0.851 \quad \text{m}^2$$

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

$$S_{\text{disp2}} := 2 \cdot (b_2 \cdot n_2 \cdot \pi \cdot D_{2m} \cdot 10^{-6}) \cdot k_{\text{ric_ass}} + 2 \cdot n_2 \cdot (\pi \cdot D_{2m} \cdot \theta_2 \cdot 10^{-6}) \cdot k_{\text{ric_rad}} \\ S_{\text{disp2}} = 2.23 \quad \text{m}^2$$

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

$$q_1 := \frac{r_{1ca} \cdot I_{f1}^2}{S_{\text{disp1}}} \quad q_1 \cdot 10^{-4} = 0.202 \quad \text{W / cm}^2$$

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:

$$\Delta T_1 := \frac{q_1}{\alpha_{\text{olio}}} \quad \Delta T_1 = 25.268 \quad ^\circ\text{C}$$

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

Stima ΔT 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;

$$A := S \cdot \frac{\tau_a}{2 \cdot h_a + \tau_a} \quad A = 5.022 \times 10^4 \quad \text{cm}^2$$

Flusso termico totale attraverso il cassone:

$$q := \frac{P_{Jn} + P_{fe}}{S \cdot 10^{-4}} \quad q = 176.576 \quad \text{W / m}^2$$

Rapporto di irraggiamento:

$$i := \frac{A}{S} \quad i = 0.065$$

Sovratemperatura massima dell'olio rispetto all'aria:

$$\Delta T_{\text{max_olio_aria}} := \frac{0.23 \cdot q}{i + 0.8 + 0.001 \cdot q} \quad \Delta T_{\text{max_olio_aria}} = 39.001 \quad ^\circ\text{C}$$

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

Stima ΔT media dell'olio rispetto all'aria

Stima della sovratemperatura media del cassone rispetto all'aria:

$$\Delta T_{\text{med_cass_aria}} := \frac{0.13 \cdot q}{i + 0.8} \quad \Delta T_{\text{med_cass_aria}} = 26.545 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta T_{\text{med_olio_aria}} := \frac{\Delta T_{\text{max_olio_aria}} + \Delta T_{\text{med_cass_aria}}}{2}$$

$$\Delta T_{\text{med_olio_aria}} = 32.773 \quad ^\circ\text{C}$$

Stima ΔT media del rame rispetto all'aria

Sovratemperatura media dell'avvolgimento sull'aria:

$$\Delta T_{\text{avv_aria_1}} := \Delta T_{\text{med_olio_aria}} + \Delta T_1 = 58.041 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{avv_aria_2}} := \Delta T_{\text{med_olio_aria}} + \Delta T_2 = 44.934 \quad ^\circ\text{C}$$

Considerando che la classe termica è A, la massima sovratemperatura ammessa nell'avvolgimento rispetto all'aria è 105-40=65°C. Le sovrature calcolate sono medie e non massime. Quindi il margine trovato, per quanto riguarda la BT soprattutto, è da ritenersi insoddisfacente. Conviene riprogettare l'avvolgimento di BT riducendo la densità di corrente.

-----> "PROGETTO B"