



Procedura di calcolo semplificata per il dimensionamento di un trasformatore da distribuzione

Per gentile concessione di Elettromeccanica Colombo

Lucia FROSINI
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

Per gentile concessione di Elettromeccanica Colombo

Procedura di calcolo di un trasformatore

La procedura di calcolo dei trasformatori è il tipico esempio di applicazione del metodo delle approssimazioni successive.

Il progettista dispone inizialmente dei dati principali del trasformatore: tipo di isolamento (olio, aria, resina), potenza, frequenza, numero fasi, tensioni, collegamenti, tipo regolazione, ed è vincolato ad ottenere determinati risultati per quanto riguarda perdite, tensione di cortocircuito, pesi e dimensioni, senza dimenticare la richiesta fondamentale relativa alla realizzazione di un prodotto il più competitivo possibile dal punto di vista economico.

L'operazione preliminare di ogni calcolo è la **scelta del rapporto volt/spira**, che determina, come conseguenza, la sezione del nucleo.

Questa scelta però non rappresenta una decisione definitiva, ma è soggetta, man mano che si procede nel calcolo, a correzioni in funzione dei risultati ottenuti.

L. Frosini

2

Per gentile concessione di Elettromeccanica Colombo

Procedura di calcolo di un trasformatore

Una semplice formula empirica, dettata dall'esperienza e utilizzata praticamente da tutti i costruttori (con piccole varianti nel k da utilizzare), è la seguente:

$$\frac{\text{Volt}}{\text{spira}} = k \cdot \sqrt{A_n}$$

dove A_n = potenza apparente del trasformatore in kVA e k è un coefficiente numerico che varia al variare della tensione di cortocircuito richiesta o della classe di isolamento dell'avvolgimento di AT.

Partiamo dai seguenti dati:

$$\begin{aligned} A_n &= 1600 \text{ kVA} && \text{isolamento in olio} \\ V_{1n}/V_{2n} &= 15000/400 && V_1 = 15000 \text{ V} \pm 2 \times 2,5\% \\ &&& \text{Collegamento Dy}_n \\ P_0 &= 2200 \text{ W} && P_{cc} (75^\circ\text{C}) = 13000 \text{ W} && v_{cc}\% = 6\% \end{aligned}$$

L. Frosini

3

Per gentile concessione di Elettromeccanica Colombo

Procedura di calcolo di un trasformatore

Su alcuni dati di partenza sono ammesse delle tolleranze.

In particolare, sulla v_{cc} % è ammesso uno scostamento $\pm 10\%$ e quindi:

$$5,4\% < v_{cc}\% < 6,6\%$$

Le tolleranze ammesse sulle perdite sono $+15\%$ sia per quelle a vuoto sia per quelle a carico, a patto che la somma delle perdite nominali effettive ($P_0 + P_{cc}$) non superi il 10% in più rispetto alla somma delle perdite nominali garantite.

$$P_{tot} = P_0 + P_{cc} = 15200 \text{ W} \quad \rightarrow \quad P_{tot} < 1,1 \cdot 15200 \text{ W} < 16720 \text{ W}$$

$$\rightarrow P_{cc} (75^\circ\text{C}) < 1,15 \cdot 13000 \text{ W} < 14950 \text{ W}$$

$$\rightarrow P_0 < (16720 - 14950) \text{ W} < 1770 \text{ W}$$

oppure

$$\rightarrow P_0 < 1,15 \cdot 2200 \text{ W} < 2530 \text{ W}$$

$$\rightarrow P_{cc} (75^\circ\text{C}) < (16720 - 2530) \text{ W} < 14190 \text{ W}$$

L. Frosini

4

Procedura di calcolo di un trasformatore

Quindi, le P_{cc} devono essere inferiori a 14950 W oppure a 14190 W, a seconda che le perdite a vuoto rimangano inferiori rispettivamente a 1770 W o a 2530 W.

La verifica sulle tolleranze di $v_{cc}\%$, P_0 , P_{cc} viene fatta al termine del primo calcolo di dimensionamento: se le tolleranze non sono rispettate, occorre modificare uno o più parametri e ripetere i calcoli fino a quando tutte le tolleranze saranno rispettate.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Utilizzando $k = 0,41$, otteniamo:

$$\frac{\text{Volt}}{\text{spira}} = k \cdot \sqrt{A_n} = 0,41 \cdot 1600 = 16,4 \quad \text{di tentativo}$$

Per l'avvolgimento in BT a 400 V, collegato a stella, avremo: $V_{2nfase} = \frac{400}{\sqrt{3}} \cong 231 \text{ V}$

$$\text{Quindi: } N_2 = \frac{V_{2nfase}}{\text{Volt/spira}} = \frac{231}{16,4} \cong 14,08 \text{ spire BT} \quad \text{di tentativo}$$

Arrotondiamo a: $N_2 = 14 \text{ spire BT}$ **DEFINITIVO**

$$\text{E quindi: } \frac{\text{Volt}}{\text{spira}} = \frac{V_{2nfase}}{N_2} = \frac{231}{14} = 16,5 \quad \text{DEFINITIVO}$$

Procedura di calcolo di un trasformatore

Fissato il numero di spire BT (N_2), il numero di spire AT è consequenziale al rapporto tra le tensioni nominali e al collegamento.

Per una $V_{1n} = 15000 \text{ V}$ a triangolo, otteniamo:

$$N_1 = \frac{V_{1fase}}{\text{Volt/spira}} = \frac{15000}{16,5} \cong 909 \text{ spire nominali AT}$$

Ma abbiamo un variatore fuori tensione che richiede una variazione massima del $2 \times 2,5\%$ della tensione V_{1n} e di conseguenza delle spire N_1 :

$$2,5\% \cdot 909 \cong 23$$

quindi il numero totale di spire di AT è pari a:

$$909 + 2 \times 2,5\% = 909 + 2 \times 23 = 955 \text{ spire totali AT}$$

Procedura di calcolo di un trasformatore

A questo punto dobbiamo decidere l'induzione da assegnare al nucleo: la base indicativa di partenza è 1,7 T per i trasformatori in olio e 1,6 T per quelli in resina.

La formula per ricavare la sezione netta è: $V_{2nfase} = \sqrt{2\pi f} N_2 B_M S_{fe}$

$$S_{fe} = \frac{V_{2nfase}}{N_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi f} B_M} = 16,5 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 50 \cdot 1,7} \cong 0,0437 \text{ m}^2 = 437 \text{ cm}^2 \quad \text{di tentativo}$$

Per ricavare il diametro circoscritto del nucleo, si utilizza la stessa formula, con un coefficiente correttivo pari a 1,1 per tenere conto che la sezione del nucleo non riempie tutta la sezione circolare ($\pi D_{fe}^2/4 = 1,1 \cdot S_{fe}$):

$$D_{fe} = \sqrt{1,1 \cdot \frac{V_{2nfase}}{N_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi f} B_M} \cdot \frac{4}{\pi}} = \sqrt{1,1 \cdot 16,5 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 50 \cdot 1,7} \cdot \frac{4}{\pi}} \cong 0,2474 \text{ m}$$

Scegliamo: $D_{fe} = 248 \text{ mm}$ **di tentativo**

Procedura di calcolo di un trasformatore

A questo punto si possono determinare i diametri degli avvolgimenti, le loro altezze e le loro sezioni, il tutto sempre in via provvisoria, tenendo come input iniziale delle **densità di corrente** un valore intorno al **2,5 A/mm² (per avvolgimenti in rame)** e una **altezza avvolgimento di 650 mm** (per questa taglia di trasformatore): sono valori dettati dall'esperienza, ma nulla vieta di provare con densità più alte o più basse.

Si possono utilizzare delle formule empiriche per determinare l'altezza della colonna del nucleo:

$$H_c = 2,6 \cdot D_{fe}$$

e l'interasse tra le colonne del nucleo:

$$Int_n = 1,95 \cdot D_{fe}$$

Queste formule empiriche sono utili, poiché nella pratica si è visto che, per una serie di trasformatori simili, questi rapporti si mantengono costanti.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Per il conduttore di BT, scegliamo una lamina della stessa altezza dell'intero avvolgimento (650 mm) e di spessore 1,5 mm, quindi sezione pari a:

$$S_{c2} = 650 \cdot 1,5 = 975 \text{ mm}^2$$

In questo modo è rispettata l'altezza dell'avvolgimento, ma anche la densità di corrente, in quanto:

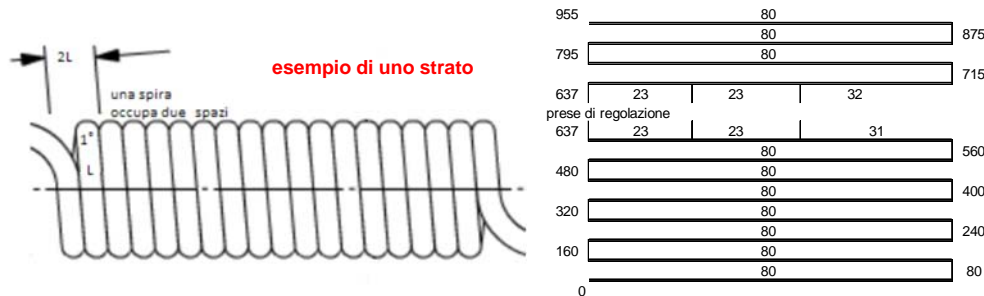
$$I_{2n} = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_{2n}} = \frac{1600000}{\sqrt{3} \cdot 400} \cong 2309 \text{ A} \quad \rightarrow \quad J_2 = \frac{2309}{975} \cong 2,37 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \rightarrow \quad \text{OK!}$$

La stessa logica vale per l'avvolgimento di AT, anche se più complicata, perché, a partire dal numero di spire totali, si devono provare sezioni diverse fino a quando si riesce ad ottenerne una che soddisfi altezza, densità di corrente e numero di strati pieni di spire.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Per es. le 955 spire possono essere suddivise in **12 strati di 80 spire circa ciascuno** (12x80 = 960).

Ogni strato corrisponde a un "giro" dell'avvolgimento intorno alla colonna:



Poiché le spire totali sono 955, in realtà si realizzano 10 strati da 80 spire + 1 strato da 77 spire + 1 strato da 78 spire (si usano gli strati con meno spire per uscire con le prese di regolazione).

Procedura di calcolo di un trasformatore

Al fine di ottenere un avvolgimento AT di altezza pari a circa 650 mm, ossia pari a quella dell'avvolgimento BT, si sceglie un conduttore AT (piattina) avente altezza 7,6 mm e spessore 2 mm e quindi sezione pari a:

$$S_{c1} = 7,6 \cdot 2 = 15,2 \text{ mm}^2$$

con un isolamento complessivo in altezza di 0,4 mm; quindi l'altezza di ogni spirale (L) è 8 mm.

Le spire elettriche su ogni strato "pieno" sono 80, ma gli spazi meccanici sono 81 (perché la prima spirale occupa due spazi), quindi l'altezza teorica dell'avvolgimento risulta pari a: $81 \cdot 8 = 648 \text{ mm}$.

Questa è l'altezza teorica: si ipotizza un calo dopo trattamento in forno e pressatura, quindi si fissa un'altezza effettiva di 645 mm, compatibile con l'altezza dell'avvolgimento BT, che è 650 mm.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Verifichiamo se è rispettata approssimativamente la densità di corrente lato AT:

$$I_{1n} = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = \frac{1600000}{\sqrt{3} \cdot 15000} \cong 61,58 \text{ A} \quad \text{corrente di linea}$$

$$I_{1n\text{fase}} = \frac{I_{1n}}{\sqrt{3}} \cong \frac{61,58}{\sqrt{3}} \cong 35,56 \text{ A} \quad \rightarrow \quad J_1 = \frac{I_{1n\text{fase}}}{S_{c1}} = \frac{35,56}{15,2} \cong 2,34 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \text{OK!}$$

Calcoliamo ora i vari diametri degli avvolgimenti, partendo dal diametro del nucleo D_{fe} e calcolando il diametro medio D_{mBT} dell'avvolgimento di BT, lo spessore totale dell'avvolgimento a_2 , il suo peso e le relative perdite.

Proseguiremo con analoghi calcoli per l'avvolgimento lato AT.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Fissiamo una distanza tra nucleo e avvolgimento lato BT, necessaria per l'isolamento e il raffreddamento:

$$d = 12 \text{ mm}$$

Di conseguenza, il diametro interno dell'avvolgimento BT è:

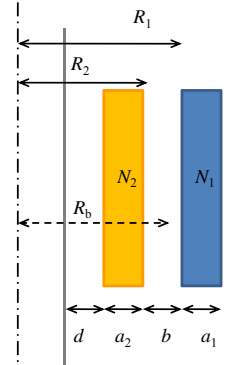
$$D_{\text{int}BT} = D_{fe} + 2d = 248 + 2 \cdot 12 = 272 \text{ mm}$$

Lo spessore di ogni spira BT è dato da 1,5 mm di rame + 0,2 mm di isolante. È inoltre necessario un canale di raffreddamento di 8 mm tra la 7° e l'8° spira, perciò lo spessore totale dell'avvolgimento BT risulta:

$$a_2 = N_2 \cdot (1,5 + 0,2) + 8 = 14 \cdot 1,7 + 8 = 23,8 + 8 = 31,8 \text{ mm}$$

E il suo diametro esterno:

$$D_{\text{ext}BT} = D_{\text{int}BT} + 2a_2 = 272 + 2 \cdot 31,8 = 335,6 \text{ mm}$$



Procedura di calcolo di un trasformatore

Il diametro medio dell'avvolgimento di BT risulta:

$$D_{mBT} = \frac{D_{\text{ext}BT} + D_{\text{int}BT}}{2} = \frac{335,6 + 272}{2} = 303,8 \text{ mm}$$

E la lunghezza complessiva delle 14 spire di BT per ciascuna delle 3 fasi:

$$L_{BT} = \pi D_{mBT} \cdot N_2 = \pi \cdot 0,3038 \cdot 14 = 13,36 \text{ m}$$

Il peso di rame per ciascun avvolgimento BT di fase è pari a:

$$\text{Peso}_{\text{fase}BT} = \underbrace{\pi D_{mBT} \cdot N_2}_{L_{BT}} \cdot \underbrace{\gamma_{Cu}}_{\text{[kg/dm}^3]} \cdot \underbrace{S_{c2}}_{\text{[mm}^2]} = 13,36 \cdot 8,9 \cdot \underbrace{650 \cdot 1,5}_{\frac{1000}{1000^2}} \cong 115,95 \text{ kg}$$

Procedura di calcolo di un trasformatore

Le perdite di potenza per effetto Joule si possono calcolare in generale come:

$$P_{\text{Joule}} = RI^2 = \rho \frac{l}{S} (J \cdot S)^2 = \rho \cdot J^2 \cdot (l \cdot S) = \rho \cdot J^2 \cdot \frac{\text{Peso}}{\gamma} \text{ [W]}$$

E le **perdite di potenza per effetto Joule nelle 3 fasi dell'avvolgimento di BT**:

$$P_{J2} = 3 \cdot \rho_{Cu75^\circ C} \cdot J_2^2 \cdot \frac{\text{Peso}_{\text{fase}BT}}{\gamma_{Cu}} = 3 \cdot 0,0214 \cdot 2,37^2 \cdot \frac{115,95}{8,9} \cdot \frac{1000^2}{1000} \cong 4692 \text{ W}$$

$$\left[\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right] \cdot \left[\frac{\text{A}^2}{\text{mm}^4} \right] \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg/dm}^3} \right]$$

Passiamo ora all'avvolgimento AT, utilizzando lo stesso procedimento.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Fissiamo una **distanza tra avvolgimenti BT e AT**, necessaria per l'isolamento e il raffreddamento:

$$b = 12 \text{ mm} \quad \text{di tentativo}$$

Di conseguenza, il diametro interno dell'avvolgimento AT è:

$$D_{\text{intAT}} = D_{\text{extBT}} + 2b = 335,6 + 2 \cdot 12 = 359,6 \text{ mm}$$

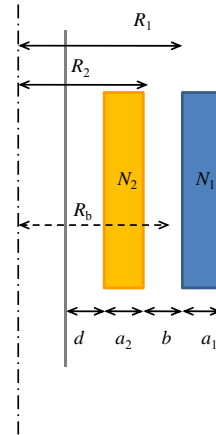
L'avvolgimento AT è costituito da 12 strati: lo spessore di ogni strato è dato da 2 mm di rame + 0,4 mm di isolante.

Tra ogni strato c'è un isolamento di 0,5 mm.

Sono inoltre necessari due canali di raffreddamento di 6 mm ciascuno, uno tra il 4° e il 5° strato e uno tra l'8° e il 9° strato.

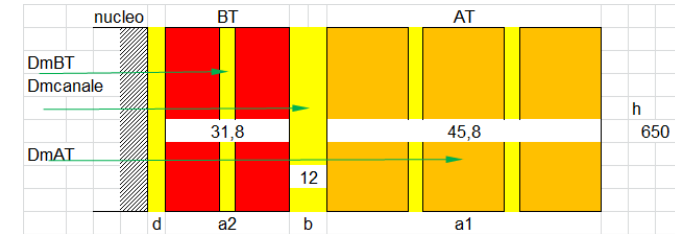
Perciò lo spessore totale dell'avvolgimento AT risulta:

$$a_1 = 12 \cdot (2 + 0,4) + 10 \cdot 0,5 + 2 \cdot 6 = 45,8 \text{ mm}$$



Procedura di calcolo di un trasformatore

Visualizziamo le sezioni degli avvolgimenti con i canali di raffreddamento/isolamento:



$$D_{\text{mcanale}} = D_{\text{mBT}} + a_2 + b = 303,8 + 31,8 + 12 = 347,6 \text{ mm}$$

Il diametro esterno dell'avvolgimento di AT risulta:

$$D_{\text{extAT}} = D_{\text{intAT}} + 2a_1 = 359,6 + 2 \cdot 45,8 = 451,2 \text{ mm}$$

Il diametro medio dell'avvolgimento di AT risulta:

$$D_{\text{mAT}} = \frac{D_{\text{extAT}} + D_{\text{intAT}}}{2} = \frac{359,6 + 451,2}{2} = 405,4 \text{ mm}$$

Procedura di calcolo di un trasformatore

La lunghezza complessiva delle 955 spire di AT per ciascuna delle 3 fasi è:

$$L_{\text{AT}} = \pi D_{\text{mAT}} \cdot N_{1\text{tot}} = \pi \cdot 0,4054 \cdot 955 = 1216,29 \text{ m}$$

Il peso di rame per ciascun avvolgimento AT di fase è pari a:

$$P_{\text{eso faseAT}} = \pi D_{\text{mAT}} \cdot N_{1\text{tot}} \cdot \gamma_{\text{Cu}} \cdot S_{\text{c1}} = 1216,29 \cdot 8,9 \cdot 7,6 \cdot 2 \cdot \frac{1000}{1000^2} \cong 164,54 \text{ kg}$$

[m] · [kg/dm³] · [mm²]

E le **perdite di potenza per effetto Joule nelle 3 fasi dell'avvolgimento di AT**:

$$P_{J1} = 0,95 \cdot 3 \cdot \rho_{\text{Cu}75^\circ\text{C}} \cdot J_1^2 \cdot \frac{P_{\text{eso faseAT}}}{\gamma_{\text{Cu}}} = 0,95 \cdot 3 \cdot 0,0214 \cdot 2,34^2 \cdot \frac{164,54}{8,9} \cdot \frac{1000^2}{1000} \cong 6170 \text{ W}$$

[Ω · mm²/m] · [A²/mm⁴] · [kg/dm³]

Procedura di calcolo di un trasformatore

In quest'ultimo passaggio si è tenuto conto del fatto che le perdite per effetto Joule sono riferite solo alle spire nominali, ossia a 909 spire sulle 955 totali, quindi circa il 95% delle spire totali.

Le perdite complessive negli avvolgimenti P_{cc} risultano:

$$P_{cc} = P_{J1} + P_{J2} + P_{\text{add}} \cong 6170 + 4692 + 20\%(P_{J1} + P_{J2}) \cong 13035 \text{ W} \quad \text{OK!}$$

Ora occorre calcolare la X_{cc} per determinare la $v_{cc}\%$. La formula base è:

$$X_{cc} = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0 N_1^2}{h} \pi D_m \left(\frac{a_2}{3} + b + \frac{a_1}{3} \right)$$

che è possibile affinare, facendo riferimento ai tre diametri medi delle tre sezioni (BT, canale, AT):

$$X_{cc} = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0 N_1^2}{h} \pi \left(D_{\text{mBT}} \frac{a_2}{3} + D_{\text{mcanale}} b + D_{\text{mAT}} \frac{a_1}{3} \right)$$

Procedura di calcolo di un trasformatore

Nel calcolo della X_{cc} è necessario inserire un fattore correttivo – detto coefficiente di Rogowski e pari a $1/0,95$ – per tenere conto del rapporto tra le dimensioni “spessore radiale totale” e “altezza” dell'avvolgimento:

$$X_{cc} = \frac{1}{0,95} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 909^2}{0,65} \pi \cdot 0,013581 \cong 22,538 \Omega$$

La $v_{cc}\%$ si calcola come:

$$v_{cc} \% = \frac{V_{1cc}}{V_{1nfase}} = \frac{X_{cc} I_{1nfase}}{V_{1nfase}} = \frac{22,538 \cdot 35,56}{15000} \cong \frac{801,36}{15000} \cong 5,34\%$$

Siamo fuori tolleranza, quindi occorre modificare qualche parametro e ripetere i calcoli.

Proviamo ad aumentare lo spessore del canale $b = 16$ mm, con conseguente aumento del diametro interno AT, del peso dell'avvolgimento AT e delle sue perdite.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Di conseguenza, il diametro interno dell'avvolgimento AT è:

$$D_{intAT} = D_{extBT} + 2b = 335,6 + 2 \cdot 16 = 367,6 \text{ mm}$$

E il diametro medio del canale:

$$D_{mcanale} = D_{mBT} + a_2 + b = 303,8 + 31,8 + 16 = 351,6 \text{ mm}$$

Mantenendo le specifiche già viste per l'avvolgimento AT, lo spessore totale dell'avvolgimento AT rimane:

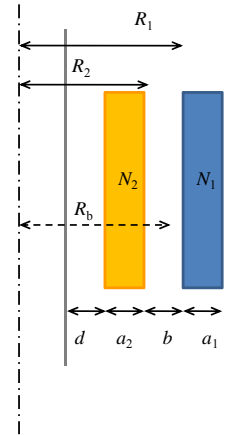
$$a_1 = 12 \cdot (2 + 0,4) + 10 \cdot 0,5 + 2 \cdot 6 = 45,8 \text{ mm}$$

E il diametro esterno dell'avvolgimento di AT risulta:

$$D_{extAT} = D_{intAT} + 2a_1 = 367,6 + 2 \cdot 45,8 = 459,2 \text{ mm}$$

Il diametro medio dell'avvolgimento di AT risulta:

$$D_{mAT} = \frac{D_{extAT} + D_{intAT}}{2} = \frac{367,6 + 459,2}{2} = 413,4 \text{ mm}$$



Procedura di calcolo di un trasformatore

La lunghezza complessiva delle 955 spire di AT per ciascuna delle 3 fasi diventa:

$$L_{AT} = \pi D_{mAT} \cdot N_{1tot} = \pi \cdot 0,4134 \cdot 955 = 1240,29 \text{ m}$$

Il peso di rame per ciascun avvolgimento AT di fase è pari a:

$$Peso_{faseAT} = \pi D_{mAT} \cdot N_{1tot} \cdot \gamma_{Cu} \cdot S_{c1} = 1240,29 \cdot 8,9 \cdot 7,6 \cdot 2 \cdot \frac{1000}{1000^2} \cong 167,79 \text{ kg}$$

[m] · [kg/dm³] · [mm²]

E le **perdite di potenza per effetto Joule nelle 3 fasi dell'avvolgimento di AT:**

$$P_{J1} = 0,95 \cdot 3 \cdot \rho_{Cu75^\circ C} \cdot J_1^2 \cdot \frac{Peso_{faseAT}}{\gamma_{Cu}} = 0,95 \cdot 3 \cdot 0,0214 \cdot 2,34^2 \cdot \frac{167,79}{8,9} \cdot \frac{1000^2}{1000} \cong 6291 \text{ W}$$

[Ω · mm²/m] · [A²/mm⁴] · [kg/dm³]

Procedura di calcolo di un trasformatore

Le perdite complessive negli avvolgimenti P_{cc} risultano:

$$P_{cc} = P_{J1} + P_{J2} + P_{add} \cong 6291 + 4692 + 20\%(P_{J1} + P_{J2}) \cong 13181 \text{ W} \quad \text{OK}$$

Calcoliamo ora la X_{cc} per determinare la $v_{cc}\%$:

$$X_{cc} = \frac{1}{0,95} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 909^2}{0,65} \pi \cdot 0,015157 \cong 25,15 \Omega$$

$$v_{cc} \% = \frac{V_{1cc}}{V_{1nfase}} = \frac{X_{cc} I_{1nfase}}{V_{1nfase}} = \frac{25,15 \cdot 35,56}{15000} \cong \frac{894,38}{15000} \cong 5,96\% \quad \text{OK}$$

Ora manca il dimensionamento del nucleo e il calcolo delle perdite a vuoto.

Una volta calcolato il peso del nucleo, le perdite a vuoto si calcolano utilizzando una costante k , funzione del tipo di lamierino e dell'induzione.

Procedura di calcolo di un trasformatore

Facendo i conti, con i parametri scelti, le perdite a vuoto risultano superiori a quelle che devono essere garantite: occorre quindi ripartire da capo, utilizzando un'induzione leggermente più bassa, ottenuta aumentando il diametro del nucleo a 250 mm.

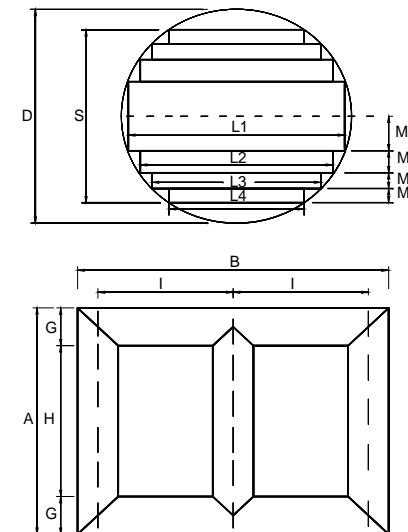
In questo modo, ripetendo i calcoli, le perdite nel ferro rientrano nelle tolleranze di garanzia, quelle nel rame aumentano leggermente, a causa dell'aumento dei diametri, ma rimangono all'interno delle tolleranze garantite.

Anche la $v_{cc}\%$ aumenta leggermente, ma rimane entro le tolleranze garantite.

I risultati del dimensionamento corretto sono riportati nelle slide seguenti.

Circuito magnetico

- Tipo M6 – impaccato Step-lap
- **Numero gradini: 8**
- Sezione lorda: 457,4 cm²
- Sezione netta: 443,68 cm²
- **Massa totale: 1522 kg**
- **Diametro circoscritto: 250 mm**
- **Induzione : 1,675 T**
- **Perdite nel ferro : 2235 W**
- Gradini : 1° 240x70 [LxM]
- 2° 220x48/2
- 3° 200x32/2
- 4° 180x23/2
- 5° 160x19/2
- 6° 140x15/2
- 7° 120x12/2
- 8° 90x14/2
- Interasse colonne [I] 480 mm
- **Lunghezza nucleo [B] 1200 mm**
- **Altezza finestra [H] 650 mm**
- **Altezza totale nucleo [A] 1130 mm**



Avvolgimento di bassa tensione

- Diametro interno $D_{int BT} = 274$ mm
- Sezione avvolgimento: $S_{c1} = 650 \cdot 1,5$ mm² (lamina **rame**)
- Spire: 14
- Tipo di avvolgimento: lamina interavvolta
- Canale raffreddamento: 8 mm tra la 7° e 8° spira
- Diametro esterno: 337 mm
- Altezza bobina: 675 mm (650 mm Cu + collarini isolanti 12,5 mm sulle testate)
- Isolante tra spire: interstrato carta (spessore 0,2 mm)
- Barre di uscita: 100x8 Cu

Avvolgimento di alta tensione

- Diametro interno avvolgimento $D_{int BT} = 369,6$ mm
- Sezione avvolgimento: $7,6 \cdot 2$ mm², isolata 0,4 mm (piattina **rame**)
- Spire: $909 \pm 2 \times 23$
- Tipo avvolgimento: a strati continui, 12 strati, isolamento tra strati 0,5 mm, due canali da 6 mm, tra 4° e 5° e tra 8° e 9° strato
- Diametro esterno avvolgimento: 462 mm
- Altezza bobina: 680 mm (645 mm Cu + isolanti 17,5 mm sulle testate)

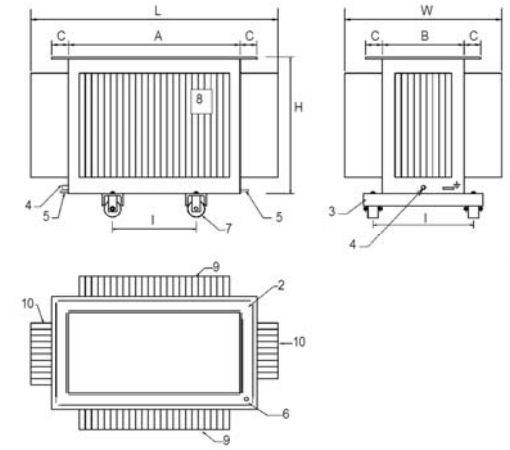
Perdite negli avvolgimenti

- Avvolgimento BT :
- Massa avvolgimento (tre fasi): 350 kg
- Densità di corrente J_2 : 2309 A / 975 mm² = **2,37 A/mm²**
- Perdite RI² = 2,37² · 350 · 2,4 = **4700 W**
- Avvolgimento AT :
- Massa avvolgimento (tre fasi) (posizione nominale): 480 kg
- Densità di corrente J_1 : 35,56 A / 15,2 mm² = **2,34 A/mm²**
- Perdite RI² = 2,34² · 480 · 2,4 = **6300 W**
- Perdite complessive:
- \sum Perdite RI²: 4700+6300 = 11000W
- Perdite addizionali: 20% RI² = 2200 W
- **Perdite totali negli avvolgimenti**: 11000+2200 = **13200 W**

Cassone olio

Dimensionamento cassa e raffreddamento

| | | |
|-----|-------------------------------|--------------------------|
| A = | 1490 | LUNGHEZZA VANO CASSA |
| B = | 560 | LARGHEZZA VANO CASSA |
| H = | 1290 | ALTEZZA VANO CASSA |
| I = | 820 | INTERASSE RUOTE |
| Ø | 17 | 1 FORO PER ATTACCO RUOTE |
| L = | 1910 | INGOMBRO TOTALE LUNGH. |
| W = | 980 | INGOMBRO TOTALE LARGH. |
| C = | 50 | FLANGIA |
| 1 | CASSA ALETTATA | |
| 2 | BORDINO 4 MM | |
| 3 | CARRELLO RUOTE | |
| 4 | TRONCHETTO 1" | |
| 5 | PRESA DI TERRA INOX | |
| 6 | FORATURA PERIMETRO Ø 12 | |
| 7 | RUOTE Ø | |
| 8 | PORTATARGA | |
| 9 | ALETTE lato LUNGO 210x1000x36 | |
| 10 | ALETTE lato CORTO 210x1000x13 | |



Trasformatore completato



massa totale: 4200 kg – massa olio: 840 kg

Dimensionamento di un trasformatore in resina con le stesse caratteristiche iniziali



$$A_n = 1600 \text{ kVA}$$

$$V_{1n}/V_{2n} = 15000/400$$

$$V_1 = 15000 \text{ V} \pm 2 \times 2,5\%$$

Collegamento Dy_n

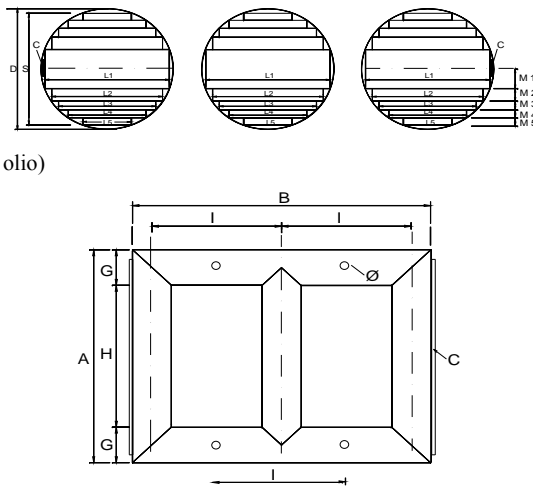
$$P_0 = 2200 \text{ W}$$

$$P_{cc} (120^\circ\text{C}) = 13000 \text{ W}$$

$$v_{cc} \% = 6\%$$

Circuito magnetico

- Tipo M4 – impaccato Step-lap
- **Numero gradini: 9**
- Sezione lorda: 481,7 cm²
- Sezione netta: 467,2 cm² (> del trasf. in olio)
- **Massa totale: 2307 kg** (> del trasf. in olio)
- **Diametro circoscritto: 256 mm** (> del trasf. in olio)
- **Induzione : 1,59 T** (< del trasf. in olio)
- **Perdite nel ferro : 2225 W**
- Gradini : 1° 250x55 [LxM]
- 2° 230x57/2
- 3° 210x34/2
- 4° 190x25/2
- 5° 170x20/2
- 6° 150x16/2
- 7° 130x13/2
- 8° 110x11/2
- 9° 90x8/2
- Interasse colonne [I] 585 mm
- **Lunghezza nucleo [B] 1420 mm** (> del trasf. in olio)
- **Altezza finestra [H] 1205 mm** (> del trasf. in olio)
- **Altezza totale nucleo [A] 1705 mm** (> del trasf. in olio)



Avvolgimento di bassa tensione

- Diametro interno: 275 mm
- Sezione avvolgimento: 1100x2 mm² (lamina **alluminio**)
- Spire: 14
- Tipo di avvolgimento: lamina interavvolta
- Canale raffreddamento: 16 mm tra la 7° e 8° spira
- Diametro esterno: 369 mm
- **Altezza bobina: 1125 (1100 Al + collarini isolanti 12,5 mm sulle testate)**
- Isolante tra spire: interstrato mylar nomex (spessore 0,2 mm)
- Barre di uscita: 100x12 Al

Avvolgimento di alta tensione

- Diametro interno stampo: 450 mm
- Diametro interno avvolgimento: 458 mm
- Sezione avvolgimento: $60 \cdot 0,5 \text{ mm}^2 = 30 \text{ mm}^2$ (lamina **alluminio**)
- Spire: $909 \pm 2 \times 23$ (totali: 955 spire)
- Tipo avvolgimento: disco continuo, spire suddivise in 15 sezioni, intervallate da spazi di 9 mm
- Diametro esterno avvolgimento: 531 mm
- Diametro esterno stampo: 545 mm
- Altezza bobina (solo Al): $16 \cdot 60 \text{ mm} + 15 \cdot 9 \text{ mm} = 1095 \text{ mm}$
- **Altezza bobina: 1125 mm (1095 mm Al + resina isolanti 15 mm sulle testate)**
- Isolante tra spire: interstrato mylar (spessore 0,072 mm)

Perdite negli avvolgimenti

- Avv.to BT :
- Massa avvolgimento (tre fasi): 255 kg
- Densità di corrente J_2 : $2309 \text{ A} / 2200 \text{ mm}^2 = 1,05 \text{ A/mm}^2$
- Perdite $RI^2 = 1,05^2 \cdot 255 \cdot 14,77 = 4152 \text{ W}$
- Avv.to AT :
- Massa avvolgimento (pos. nom.): 343 kg
- Densità di corrente J_1 : $35,56 \text{ A} / 30 \text{ mm}^2 = 1,19 \text{ A/mm}^2$
- Perdite $RI^2 = 1,19^2 \cdot 343 \cdot 14,77 = 7174 \text{ W}$
- Perdite complessive:
- \sum Perdite RI^2 : $4152 + 7174 = 11326 \text{ W}$
- Perdite addizionali : 15% $RI^2 = 1700 \text{ W}$
- **Perdite totali negli avvolgimenti: $11326 + 1700 = 13026 \text{ W}$**

Avvolgimento di bassa tensione



Avvolgimento AT prima dell'inglobamento in resina

