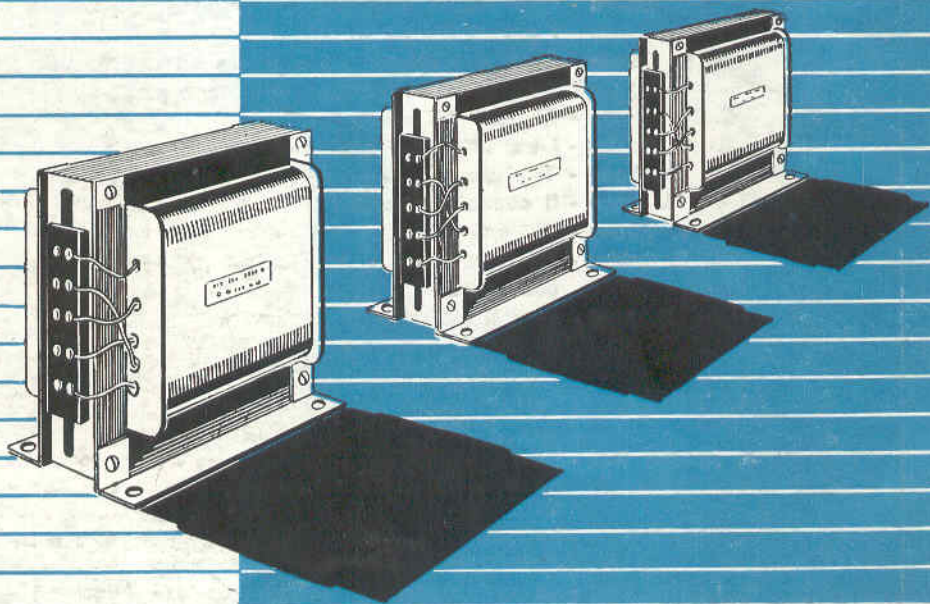


ERNESTO CARBONE

La costruzione e il calcolo dei
piccoli
trasformatori

IV EDIZIONE



EDITORIALE DELFINO - MILANO

Copyright 1966 by

©

EDITORIALE DELFINO
MILANO

CAPITOLO VIII

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

E IMPOSTAZIONE DI CALCOLO DEGLI AUTOTRASFORMATORI

Generalità

Si abbia un nucleo con un solo avvolgimento, per esempio, di 10 spire, e questo sia alimentato a 100 volt. Derivando dallo stesso avvolgimento due prese, comunque situate, tra i loro estremi risulta una tensione che è proporzionale al numero di spire incluse tra le prese, come se si avesse un avvolgimento secondario separato. Possiamo quindi scrivere, come per un trasformatore a due avvolgimenti:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

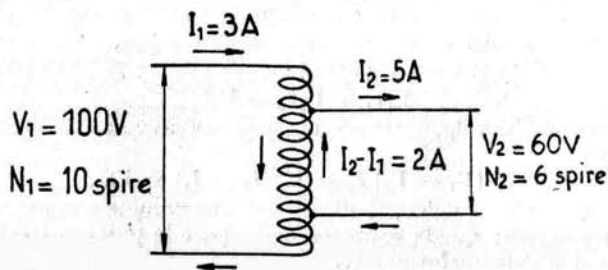


Fig. 28 - Schema di principio dell'autotrasformatore.

Nel nostro esempio (fig. 28):

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} = \frac{100 \times 6}{10} = 60 \text{ V}$$

D'altra parte sappiamo che la corrente che fluisce nel secondario è in ogni istante di segno opposto alla corrente nel primario, essendo le amperevolte del primario eguali alle amperevolte secondarie. Infatti trascurando la corrente a vuoto, si può scrivere: $N_1 I_1 = N_2 I_2$.

Ritornando alla nostra figura, appare quindi che nel tratto di avvolgimento che funge da secondario la corrente che vi passa è la differenza tra la corrente secondaria e la corrente primaria (nel nostro caso $5A - 3A = 2A$).

Un circuito siffatto rappresenta il circuito di un autotrasformatore (fig. 28).

Pertanto l'autotrasformatore è un trasformatore particolare avente un unico avvolgimento, che può considerarsi come risultante dalla sovrapposizione del circuito primario al circuito secondario.

Considerazioni sull'autotrasformatore.

Si possono considerare nell'autotrasformatore due parti dell'avvolgimento: la I (fig. 29) che appartiene solamente al circuito a maggior tensione e la II che è in comune sia al circuito di alta tensione che al circuito di bassa tensione.

La parte I la denomineremo avvolgimento *serie* e la parte II avvolgimento *comune*.

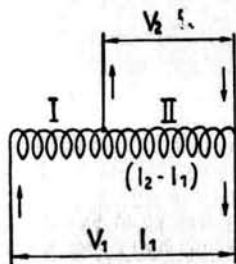


Fig. 29 - Suddivisione dell'avvolgimento in un autotrasformatore.

Essendo la corrente del primario I_1 in opposizione alla corrente secondaria I_2 , l'avvolgimento comune (II) viene percorso dalla differenza delle due correnti $I_2 - I_1$ e perciò è possibile fare una economia nella sezione del conduttore.

Trascurando perdite, cadute e corrente a vuoto possiamo per l'autotrasformatore monofase scrivere:

— potenza prelevata dalla linea = potenza resa = potenza passante, ossia:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 = VA \quad (1)$$

— potenza nell'avvolg. serie = potenza nell'avvolg. comune = potenza interna, ossia:

$$(V_1 - V_2) I_1 = V_2 (I_2 - I_1) = VA_i \quad (2)$$

La potenza espressa nella (1) dicesi potenza nominale o potenza passante dell'autotrasformatore; quella espressa nella (2) è la potenza trasformata o potenza interna dell'autotrasformatore.

Il rapporto tra la potenza interna e la potenza passante:

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1} = K_r$$

è il rapporto di riduzione dell'autotrasformatore. V_1 è la maggiore delle due tensioni. Quindi è anche:

$$VA \times K_r = VA_i$$

ossia la potenza interna di un autotrasformatore si ottiene moltiplicando la potenza passante per il rapporto di riduzione K_r dell'autotrasformatore.

Ad esempio un autotrasformatore da 300 VA con rapporto 120/160 V avrà la potenza interna:

$$VA_i = 300 \frac{160 - 120}{160} = 300 \times 0,25 = 75 \text{ VA}$$

Ossia l'autotrasformatore da 300 VA, rapporto 120/160 V equivale ad un trasformatore della potenza nominale di 75 VA con rapporto 120/40 V.

Da quanto sopra, risulta che il calcolo dell'autotrasformatore si può effettuare considerando di avere un trasformatore in cui il primario abbia una tensione $V_1 - V_2$ con corrente I_1 ; e il secondario una tensione V_2 con corrente $I_2 - I_1$.

I valori percentuali della caduta di tensione, delle perdite e della corrente a vuoto vengono calcolati riferendoli dapprima alla potenza del trasformatore equivalente, cioè alla potenza interna dell'autotrasformatore. I corrispondenti valori riferiti alla potenza passante dell'autotrasformatore sono quindi ottenuti moltiplicando i valori sopra trovati per il rapporto di riduzione

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1} = K_r$$

Di solito l'autotrasformatore si definisce in base alla sua potenza passante e non in base alla sua potenza interna. Questa sarebbe complessa da definire quando l'autotrasformatore avesse più prese. La potenza passante interessa chi si serve dell'autotrasformatore mentre la potenza interna dà al progettista un'indicazione per il suo dimensionamento.

Per il calcolo delle sezioni dei conduttori nei diversi tratti tra le prese è opportuno preparare una tabella delle correnti considerando i diversi funzionamenti uno alla volta. I valori massimi per ogni tratto servono a determinare la sezione più opportuna del conduttore.

Uso, vantaggi e svantaggi dell'autotrasformatore.

L'autotrasformatore può essere tanto elevatore che abbassatore. Esso è tanto più conveniente quanto minore è il rapporto di riduzione, cioè quanto più la tensione primaria è vicina alla secondaria. In genere si ricorre all'autotrasformatore quando il rapporto tra le tensioni non è superiore a tre, avendosi in tal caso ancora una sensibile economia di materiale.

Avendo minori dimensioni, anche il costo è minore; inoltre si hanno perdite minori, caduta secondaria inferiore e minore corrente a vuoto in confronto al trasformatore di egual potenza.

L'autotrasformatore presenta però anche svantaggi che principalmente riguardano la sicurezza nei confronti dell'isolamento. Infatti, essendo gli avvolgimenti metallicamente connessi tra loro, ogni circuito è soggetto ai disturbi generati nell'altro. In particolare una terra accidentale sul lato alta tensione può portare il circuito di bassa tensione ad assumere il potenziale dell'alta tensione.

Perciò quando si richiede una certa sicurezza di isolamento (per esempio alimentazione di strumenti di laboratorio), è preferibile usare il trasformatore anziché l'autotrasformatore.

Esempio di autotrasformatore con più rapporti di tensione.

Faremo l'esempio di un autotrasformatore con alimentazione a 160 V, 50 Hz e due prese secondarie per 120 e 220 V, ambedue per erogare, non simultaneamente, una potenza di 400 VA.

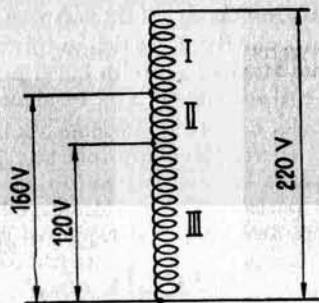


Fig. 30 - Avvolgimento di un autotrasformatore a più rapporti.

Le due prese dividono l'avvolgimento in tre parti I, II, III (fig. 30), ognuna delle quali percorsa da correnti massime diverse. I valori delle correnti massime di ogni tratto I, II, III moltiplicati per le rispettive tensioni parziali ci danno tre potenze (VA)_I, (VA)_{II} e (VA)_{III} la cui semisomma diremo potenza equivalente interna dell'autotrasformatore. In base a questa potenza viene dimensionato l'autotrasformatore.

Consideriamo separatamente i due funzionamenti possibili, trascurando, per semplicità, perdite, corrente a vuoto e cadute.

1°) Funzionamento: Rapporto 160/220 V, 400 VA

$$400 \frac{220 - 160}{220} = \frac{60}{220} 400 = 109 \text{ VA.}$$

corrente di linea:

$$I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A}$$

corrente di linea:

$$I_2 = \frac{400}{220} = 1,82 \text{ A}$$

corrente nell'avvolgimento tratto I (avvolg. serie)

$$1,82 \text{ A, } 60 \text{ V}$$

corrente nell'avvolg. tratti II, III (avvolg. comune):

$$2,5 - 1,82 = 0,68 \text{ A, } 160 \text{ V.}$$

Deve anche verificarsi:

$$1,82 \text{ A} \times 60 \text{ V} = 0,68 \text{ A} \times 160 \text{ V} = 109 \text{ VA.}$$

2°) Funzionamento: Rapporto 160/120 V, 400 VA

$$\frac{160 - 120}{160} 400 = \frac{40}{160} 400 = 100 \text{ VA.}$$

corrente di linea:

$$I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A}$$

corrente di linea:

$$I_2 = \frac{400}{120} = 3,33 \text{ A}$$

corrente nell'avvolg. tratto II (avvolg. serie)

$$2,5 \text{ A, } 40 \text{ V}$$

corrente nell'avvolg. tratto III (avvolg. comune):

$$3,33 - 2,5 = 0,83 \text{ A, } 120 \text{ V.}$$

$$2,5 \text{ A} \times 40 \text{ V} = 0,83 \times 120 \text{ V} = 100 \text{ VA.}$$

Possiamo riportare in una tabella i valori trovati sopra.

	tratto I	tratto II	tratto III
a 220 V secondari	1,82 A	0,68 A	0,68 A
a 120 V secondari	—	2,5 A	0,83 A
Correnti massime	1,82 A	2,5 A	0,83 A
Tensione per grad.	60 V	40 V	120 V
Pot. mass. per grad.	109 VA	100 VA	100 VA

La potenza equivalente sarà:

$$\frac{109 + 100 + 100}{2} = 154 \text{ VA}$$

In base a questa potenza sceglieremo le dimensioni del formato del nucleo e poi il calcolo procede nel modo solito.

Usando un nucleo a mantello abbiamo:

$$A \times B \text{ (cm}^2\text{)} = 80 \sqrt{154/1,2 \times 50} = 128 \text{ cm}$$

Useremo nucleo $A \times B = 120 \text{ cm}^2$.

— Dimensioni principali del nucleo:

$$\begin{aligned} A &= 100 \text{ mm} \\ B &= 120 \text{ mm} \\ C &= 40 \text{ mm} \\ D &= 20 \text{ mm} \\ E &= 60 \text{ mm} \end{aligned}$$

— Rocchetto:

$$\begin{aligned} D' &= 16,5 \text{ mm} & D' \times E' &= 8,75 \text{ cm}^2 \\ E' &= 53 \text{ mm} \end{aligned}$$

— Filo rame smaltato normale. Spessore dell'avvolg. 15 mm ($D' = 16,5 \text{ mm}$):

$$\begin{aligned} \text{I) } & A \ 1,82, \ d_1 = 1,0, \ d'_1 = 1,08, \\ & n_1 = 8,8, \ A/\text{cm}^2 = 98, \ 0,785 \text{ mm}^2 \\ \text{II) } & A \ 2,50, \ d_2 = 1,25, \ d'_2 = 1,34, \\ & n_2 = 7,1, \ A/\text{cm}^2 = 99, \ 1,226 \text{ mm}^2 \\ \text{III) } & A \ 0,83, \ d_3 = 0,70, \ d'_3 = 0,76, \\ & n_3 = 12,5, \ A/\text{cm}^2 = 97, \ 0,385 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{— V/spira} &= \frac{109}{98 \times 8,75} + \frac{100}{99 \times 8,75} + \\ &+ \frac{100}{97 \times 8,75} = 0,36 \text{ (spire/V} = 2,78) \end{aligned}$$

— Spessore del pacco:

$$\begin{aligned} H &= 37 \text{ mm}, \quad h_s = 1,09, \\ S_{fe} &= 13,5 \text{ cm}^2 \text{ (sez. utile col)} \end{aligned}$$

— Numero delle spire:

$$\begin{aligned} \text{I) } & 2,78 \times 60 = 167 \\ \text{II) } & 2,78 \times 40 = 111 \\ \text{III) } & 2,78 \times 120 = 334 \end{aligned}$$

— Numero delle spire per strato: ($E' = 53 \text{ mm}$):

$$\begin{aligned} \text{I) } & 53 \times 8,8 = 47 \text{ spire per strato} \\ \text{II) } & 53 \times 7,1 = 38 \text{ spire per strato} \\ \text{III) } & 53 \times 12,5 = 67 \text{ spire per strato} \\ & 1,08 \times 48 = 52 \text{ mm (53)} \\ & 1,34 \times 39 = 52 \text{ mm (53)} \\ & 0,76 \times 68 = 52 \text{ mm (53)} \end{aligned}$$

— Numero degli strati:

$$\begin{aligned} \text{I) } & 167 : 47 = 3,55 = 4 \text{ strati} \\ \text{II) } & 111 : 38 = 2,92 = 3 \text{ strati} \\ \text{III) } & 334 : 67 = 4,97 = 5 \text{ strati} \end{aligned}$$

— Spessore degli avvolgimenti:

$$\begin{aligned} \text{I) } & 1,08 \times 4 = 4,32 \text{ mm} \\ & \text{interst. } 0,1 \times 3 = 0,30 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad 4,62 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad \text{uso } 4,70 \text{ mm} \\ \text{II) } & 1,34 \times 3 = 4,02 \\ & 0,1 \times 2 = 0,20 \\ & \quad \quad \quad 4,22 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad \text{uso } 4,30 \text{ mm} \\ \text{III) } & 0,76 \times 5 = 3,80 \\ & 0,1 \times 4 = 0,40 \\ & \quad \quad \quad 4,20 \text{ mm} \\ & \quad \quad \quad \text{uso } 4,30 \text{ mm} \end{aligned}$$

— Disposizione radiale degli avvolgimenti e spire medie:

$$\begin{aligned} & 1,5 (= 2 \text{ gi}) + 3 (= 2 \text{ c}) + \\ & \quad \quad \quad + 4,7 (= \text{avvolg. I}) = 9,20 \text{ mm} \\ & 9,20 + 4,7 (\text{avvolg. I}) + 1 (= 2 \text{ i}') + \\ & \quad \quad \quad + 4,3 (= \text{avvolg. II}) = 19,20 \text{ mm} \\ & 19,20 + 4,3 (\text{avvolg. II}) + 1 (= 2 \text{ i}') + \\ & \quad \quad \quad + 4,3 (= \text{avvolg. III}) = 28,80 \text{ mm} \end{aligned}$$

Perimetro nucleo:

$$\begin{aligned} C + H &= 40 + 37 = 77 \times 2 = 154 \text{ mm} \\ \text{spira media } l_{\text{I}} &= 154 + 4 \times 9,2 = 191 \text{ mm} \\ \text{spira media } l_{\text{II}} &= 154 + 4 \times 19,2 = 231 \text{ mm} \\ \text{spira media } l_{\text{III}} &= 154 + 4 \times 28,8 = 269 \text{ mm} \end{aligned}$$

Peso del rame:

$$\begin{aligned} \text{I) } & 8,9 \times 0,785 \times 167 \times 191 \times 10^{-6} = 0,223 \text{ kg} \\ \text{II) } & 8,9 \times 1,226 \times 111 \times 231 \times 10^{-6} = 0,280 \text{ kg} \\ \text{III) } & 8,9 \times 0,385 \times 334 \times 269 \times 10^{-6} = 0,308 \text{ kg} \\ & \text{peso totale rame} = 0,811 \text{ kg} \end{aligned}$$

Peso del lamierino magnetico (lamierino spess. 0,35: isolato carta):

$$7,7 \times 96 \times \frac{3,7}{1,09} \times 10^{-3} = 2,51 \text{ kg}$$

Perdite a vuoto: (lam. tipo 1,3 W/kg a 50 Hz per $B = 1 \text{ Wb/m}^2$):

$$1,2 \times 1,96 \times 2,51 = 5,9 \text{ W}$$

Caratteristiche elettriche dipendenti dal rame:

1°) Funzionamento: rapporto 160/220 V, 400 VA (109 VA_i).

Perdite del rame:

$$\begin{aligned} \text{I) } & A/\text{mm}^2 = 1,82/0,785 = 2,32 \\ & 2,32^2 \times 2,37 \times 0,223 = 2,85 \text{ watt} \\ \text{II) } & A/\text{mm}^2 = 0,68/1,226 = 0,555 \\ & 0,555^2 \times 2,37 \times 0,28 = 0,21 \text{ watt} \\ \text{III) } & A/\text{mm}^2 = 0,68/0,385 = 1,77 \\ & 1,77^2 \times 2,37 \times 0,308 = 2,3 \text{ watt} \end{aligned}$$

Rendimento (riferito alla potenza passante):

$$\eta = \frac{400 \times 100}{400 + 5,9 + 5,36} = 97 \%$$

Caduta di tensione al secondario:

Il metodo più semplice e rapido consiste nel determinare la caduta percentuale riferita alla potenza passante, cioè:

$$\frac{\text{perdite nel rame} \times 100}{\text{VA passanti}} = v\%$$

Nel nostro esempio:

$$100 \frac{3,06 + 2,3}{400} = 100 \frac{5,36}{400} = 1,35 \% \text{ (caduta percent. del second.)}$$

In altra maniera, essendo l'autotrasformatore in questo I funzionamento elevatore, si ha egualmente;

$$\frac{W \text{ nel serie}}{A \text{ serie}} + \frac{W \text{ nel comune}}{A \text{ comune}} \times \frac{\text{spire serie}}{\text{spire comune}} = \text{caduta in volt}$$

$$\frac{3,06}{1,82} + \frac{2,3}{0,68} \frac{167}{445} = 1,68 + 1,27 = 2,95 \text{ V}$$

ossia:

$$\frac{2,95 \times 100}{220} = 1,35 \%$$

2°) Funzionamento; rapporto 160/120 (abbassatore): 400 VA (100 VA);
Perdite nel rame:

$$\text{II) (serie) } A/\text{mm}^2 = 2,5/1,226 = 2,04$$

$$2,04^2 \times 2,37 \times 0,28 = 2,77 \text{ W}$$

$$\text{III) (comune) } A/\text{mm}^2 = 0,83/0,385 = 2,15$$

$$2,15^2 \times 2,37 \times 0,308 = 3,37 \text{ W}$$

Rendimento (riferito alla potenza passante di 400 VA):

$$\eta = \frac{400 \times 100}{400 + 6,14 + 5,9} = 97 \%$$

Caduta di tensione al secondario:

$$\frac{\text{perdite nel rame} \times 100}{\text{VA passanti}} = v\% \text{ (caduta percentuale di tensione)}$$

$$\frac{6,14 \times 100}{400} = 1,53 \% \text{ (caduta in \%)}$$

$$1,53 \times 120/100 = 1,84 \text{ V (caduta in volt al secondario).}$$

In altra maniera, essendo l'autotrasformatore abbassatore, abbiamo:

$$\frac{W \text{ serie}}{A \text{ serie}} \times \frac{\text{spire comune}}{\text{spire totali}} + \frac{W \text{ comune}}{A \text{ comune}} \times \frac{\text{spire serie}}{\text{spire totali}} = \text{caduta in V}$$

$$\frac{2,77}{2,5} \times \frac{334}{445} + \frac{3,37}{0,83} \times \frac{111}{445} = 0,84 + 1,00 = 1,84 \text{ V}$$

Determinate le cadute di tensione al secondario si ritoccano le spire per riportare al valore calcolato le tensioni a vuoto al secondario.