

<i>IL TRASFORMATORE</i>	2
<i>Modello ideale</i>	2
<i>Equazioni fondamentali del Trasformatore Ideale</i>	2
<i>Equazione sulle tensioni</i>	2
<i>Equazione sulle correnti</i>	3
<i>Funzionamento a vuoto</i>	3
<i>Funzionamento in corto circuito</i>	3
<i>Funzionamento con secondario chiuso su carico generico</i>	3
<i>Bilancio Energetico in un Trasformatore Ideale</i>	4
<i>Modalità di funzionamento di in un Trasformatore</i>	5
<i>Modello reale</i>	5
<i>Elementi circuitali del modello reale</i>	6
<i>Circuiti equivalenti</i>	7
<i>Grandezze nominali o di Targa di un Trasformatore</i>	7
<i>Estensione dei concetti all'Autotrasformatore</i>	8
<i>Estensione al trasformatore a tre o più avvolgimenti</i>	8
<i>Funzionamento a V_1 variabile e a frequenza variabile</i>	9
<i>Esempio :</i>	9
<i>Variazione delle perdite nel ferro con la f e la V_1</i>	10
<i>Trasformatori di misura TV e TA</i>	10
<i>Applicazioni particolari</i>	10
<i>Determinazione sperimentale di R_{fe} e X_m</i>	11
<i>Bibliografia</i>	11

Il Trasformatore

prof. Cleto Azzani
 IPSIA Moretto Brescia

Febbraio 1995

Il Trasformatore

Il Trasformatore è una macchina elettrica statica che nella sua forma più semplice è costituita dalle seguenti parti:

- *Nucleo di materiale ferromagnetico (lamierini di FeSi, ferrite, mu-metal, permalloy etc)*
- *Avvolgimento primario composto di N_1 spire.*
- *Avvolgimento secondario composto da N_2 spire.*

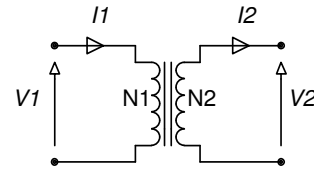


fig. 1 Simbolo elettrico del trasformatore

Gli avvolgimenti sono isolati fra di loro e sono isolati dal nucleo. Il principio di funzionamento su cui si basa il trasformatore è la ben nota legge di Lenz (o di Faraday Neumann) che afferma : " *un circuito elettrico sottoposto ad una variazione di flusso $\Delta\Phi$ concatenato che avviene nell'intervallo di tempo Δt è sede di una f.e.m. indotta data dall'espressione:*

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad 2.1$$

È ovvio quindi che per avere f.e.m. indotta nel circuito secondario del trasformatore deve necessariamente esserci un flusso magnetico variabile nel tempo; non è possibile che si induca f.e.m. se il flusso è costante.

In un trasformatore a due avvolgimenti il circuito primario è di solito alimentato da una sorgente alternata sinusoidale. Ciò provoca la nascita di un flusso di induzione magnetica alternato sinusoidale (variabile nel tempo). Nel circuito secondario accoppiato magneticamente con quello primario, si genera così una f.e.m. indotta (variabile nel tempo con legge sinusoidale).

Modello ideale

Un trasformatore ideale soddisfa quattro ipotesi fondamentali che di seguito riportiamo:

- 1) *Resistenze degli avvolgimenti primario e secondario nulle;*
- 2) *Perfetto accoppiamento fra circuito primario e secondario (tutte le linee di flusso prodotte dal primario si concatenano con il secondario: non esiste flusso disperso);*
- 3) *Perdite nel nucleo nulle;*
- 4) *Riluttanza del circuito magnetico nulla (ossia permeabilità infinita)*

Equazioni fondamentali del Trasformatore Ideale

Equazione sulle tensioni

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad 2.2$$

n viene denominato rapporto spire

La formula 2.1 può essere facilmente dimostrata scrivendo la legge di Lenz in regime alternato sinusoidale sul circuito primario e su quello secondario nell'ipotesi che vi sia accoppiamento perfetto fra i due circuiti ossia:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi \quad 2.3$$

$$V_1 = j \cdot \omega \cdot N_1 \Phi \quad 2.4$$

$$V_2 = j \cdot \omega \cdot N_2 \Phi$$

dividendo membro a membro la 2.3 e la 2.4 si perviene alla 2.1.

Equazione sulle correnti

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = n \tag{2.5}$$

La legge di Hopkinson, scritta per il nucleo del trasformatore, porta al seguente risultato :

$$\mathfrak{S} = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \mathfrak{R} \cdot \Phi \tag{2.6}$$

ove $N_1 I_1$ rappresenta la f.m.m. (forza magneto motrice) primaria, $N_2 I_2$ la f.m.m. secondaria, \mathfrak{R} la riluttanza del circuito magnetico e Φ il flusso di induzione. Ma nel modello ideale $\mathfrak{R}=0$ per cui risulta:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \tag{2.7}$$

da cui immediatamente discende la 2.5.

Funzionamento a vuoto

Un trasformatore funziona a vuoto quando il circuito secondario non risulta percorso da corrente ossia :

$$I_2 = 0$$

per la (2.5) discendono le conclusioni :

$$I_1 = 0$$

$$Z_{1v} = \frac{V_1}{I_{1v}} = \infty$$

(con Z_{1v} si è indicata l'impedenza primaria a vuoto)

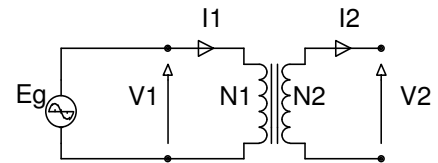


fig. 2 Trasformatore ideale funzionante a vuoto

$$2.8$$

Funzionamento in corto circuito

Un trasformatore funziona in corto circuito quando il circuito secondario risulta chiuso su un carico di impedenza nulla. In tal caso risulta :

$$V_2 = 0$$

da cui, per la 2.2, discendono immediatamente le conclusioni

$$V_1 = 0$$

$$Z_{1c} = \frac{V_1}{I_{1cc}} = 0$$

(con Z_{1c} si è indicata l'impedenza primaria di corto circuito)

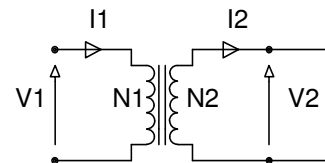


fig. 3 Trasformatore ideale funzionante in c.c.

$$2.9$$

Funzionamento con secondario chiuso su carico generico

Nel circuito di fig.4, un generico carico Z_c è collegato in parallelo ai morsetti secondari ; per la legge di Ohm si ha:

$$V_2 = Z_C \cdot I_2 \tag{2.10}$$

risolvendo la 2.5 rispetto a I_2 e la 2.2 rispetto a V_2 si ha:

$$I_2 = n I_1 \tag{2.11} \quad V_2 = \frac{V_1}{n}$$

sostituendo le 2.11 nella 2.10 si ottiene :

$$V_1 = n^2 Z_C I_1 \tag{2.12}$$

da cui si ricava :

$$Z_p = \frac{V_1}{I_1} = n^2 Z_C \tag{2.13}$$

l'espressione 2.13 fornisce il valore dell'impedenza secondaria vista ai morsetti primari.

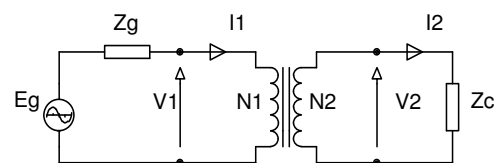


fig. 4 Trasformatore con secondario chiuso su carico generico

$$2.11$$

$$2.12$$

$$2.13$$

Il circuito di fig. 5 rappresenta il circuito equivalente visto ai morsetti primari.

Si può notare che, passando dal circuito secondario a quello primario, le tensioni vengono moltiplicate per il rapporto spire n , le correnti vengono divise per il rapporto spire n e le impedenze vengono moltiplicate per il quadrato del rapporto spire.

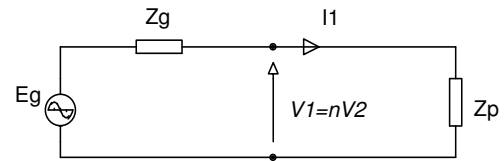


fig. 5 Circuito equivalente visto ai morsetti primari

Nel circuito di fig.4, un generico carico Z_c è collegato in parallelo ai morsetti secondari; scrivendo il principio di Kirchoff alla maglia che contiene il circuito primario si ha :

$$E_g = Z_g I_1 + V_1 \quad 2.14$$

risolvendo la 2.5 rispetto a I_1 e la 2.2 rispetto a V_1 si ha:

$$I_1 = \frac{I_2}{n} \quad V_1 = nV_2 \quad 2.15$$

sostituendo le 2.15 nella 2.14 si ottiene:

$$E_g = Z_g \frac{I_2}{n} + nV_2 \quad 2.16$$

ricavando dalla 2.16 V_2 si ottiene :

$$V_2 = \frac{E_g}{n} - \frac{Z_g}{n^2} \cdot I_2 \quad 2.17$$

Il circuito di fig. 6 rappresenta il circuito equivalente visto ai morsetti secondari il cui funzionamento è descritto dalla relazione 2.17.

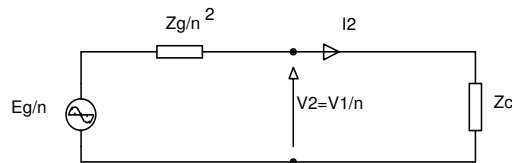


fig.6 Circuito equivalente visto ai morsetti secondari

Si può notare che, passando dal circuito primario a quello secondario, le tensioni vengono divise per il rapporto spire n , le correnti vengono moltiplicate per n e le impedenze vengono divise per il quadrato del rapporto spire.

Bilancio Energetico in un Trasformatore Ideale

È facile dimostrare che in un trasformatore ideale la potenza apparente primaria è uguale alla potenza apparente secondaria. In altri termini :

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad 2.18$$

per verificare tale eguaglianza, è infatti sufficiente ricavare dalla 2.2 V_1 e dalla 2.5 la I_1 , sostituirle nel primo membro della 2.18. D'altra parte ciò è una logica conseguenza delle ipotesi 1, 2, 3 su cui si costruisce il modello ideale di un trasformatore; infatti l'ipotesi 1 assicura che è nulla la potenza attiva persa nel rame (avvolgimenti primario e secondario del trasformatore), l'ipotesi 2 assicura che è nullo il flusso disperso e la potenza reattiva che ne consegue; l'ipotesi 3 assicura che sono nulle le perdite di potenza attiva nel nucleo. Dunque, per il teorema di Bucherot deve essere:

$$P_1 = P_2 \quad Q_1 = Q_2 \quad A_1 = A_2 \quad 2.19$$

Modalità di funzionamento di in un Trasformatore

Un trasformatore può funzionare:

come elevatore di tensione se $N_2 > N_1$ (in tal caso $V_2 > V_1$)
come riduttore di tensione se $N_1 > N_2$ (in tal caso $V_1 > V_2$).

Nel funzionamento da elevatore di tensione si ha pure una riduzione di corrente mentre nel funzionamento da riduttore di tensione si ha pure una elevazione di corrente (vedi bilancio energetico).

- *Il trasformatore, viene usato come elevatore di V e quindi come riduttore di I nelle stazioni di trasformazione collocate in prossimità delle centrali di produzione dell'energia elettrica; ciò consente di ridurre le perdite di potenza attiva che si verificano sulle linee di trasporto dell'Energia Elettrica (le perdite sono proporzionali al quadrato della corrente); le linee di trasporto sono linee ad alta tensione: 130KV, 220KV, 380KV.*
- *Il trasformatore viene usato come riduttore di V e quindi come elevatore di I nelle apparecchiature elettroniche e nelle stazioni di trasformazione collocate in prossimità delle aree di utilizzo dell'Energia Elettrica (città, aree industriali, insediamenti civili etc); le linee di trasporto possono essere linee in media tensione (es.: 15KV) o bassa tensione (220V o 380V).*
- *Un trasformatore con $N_1 = N_2$ e quindi $V_1 = V_2$ e $I_1 = I_2$ prende il nome di trasformatore di isolamento. Questo tipo di trasformatore viene usato per migliorare le condizioni di sicurezza e immunità ai disturbi su impianti di tipo particolare.*

Modello reale

Un trasformatore reale presenta le seguenti caratteristiche elettriche:

1)- *Le resistenze degli avvolgimenti primario e secondario sono di valore basso ma non nullo;*

2)- *Gli sforzi di tipo costruttivo sono volti a realizzare un accoppiamento quasi perfetto (riducendo al minimo il flusso disperso), compatibilmente con la necessità di realizzare condizioni di isolamento adeguate fra primario e secondario, primario e nucleo, secondario e nucleo, e tra le varie spire sia del primario che del secondario.*

3)- *Le perdite di potenza attiva nel nucleo si distinguono in due categorie:*

a) *perdite per correnti parassite*

b) *perdite per isteresi*

-le perdite per correnti parassite vengono contenute realizzando il nucleo con un pacco di lamierini isolati fra loro (con una ossidazione superficiale) ciò riduce il riscaldamento del nucleo provocato dalle correnti di Foucault (correnti indotte nel nucleo che è buon conduttore di elettricità e che viene investito da un flusso magnetico variabile nel tempo);

-le perdite per isteresi magnetica sono presenti in quanto è necessario fornire energia al materiale magnetico per magnetizzarlo e smagnetizzarlo (tale energia è proporzionale all'area del ciclo di isteresi). Scegliendo Fe-Si si riduce l'area del ciclo di isteresi.

4)- *La riluttanza del circuito magnetico non è nulla in quanto la permeabilità del materiale magnetico è elevata ma non infinita.*

Elementi circuitali del modello reale

Abolendo la ipotesi 4 sul modello ideale ossia ritenendo che la riluttanza \mathfrak{R} del circuito magnetico sia diversa da zero si perviene alle seguenti formule :

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \mathfrak{R} \cdot \Phi \quad 2.20$$

$$I_1 = \frac{N_2 \cdot I_2}{N_1} + \frac{\mathfrak{R} \cdot \Phi}{N_1} \quad 2.21$$

Se poniamo nella 2.13 $I_2 = 0$ ossia facciamo funzionare a vuoto il trasformatore risulta :

$$I_1 = I_{10} = \frac{\mathfrak{R} \cdot \Phi}{N_1} \quad 2.22$$

ove con I_{10} viene indicata la corrente che circola nell'avvolgimento primario quando il trasformatore lavora a vuoto ossia con l'avvolgimento secondario aperto. Tale corrente viene denominata corrente magnetizzante. Essa risulta sfasata di 90° in ritardo rispetto a V_1 (vedi 2.3); pertanto la sua presenza può essere schematizzata introducendo in parallelo al primario del trasformatore ideale una reattanza induttiva X_m data dalla seguente relazione :

$$X_m = \frac{V_1}{I_{10}} \quad 2.23$$

-Abolendo l'ipotesi 3, relativa al modello ideale, ossia ritenendo che le perdite nel nucleo per isteresi e per correnti parassite non siano nulle, è necessario introdurre in parallelo al al primario del trasformatore ideale una resistenza R_{fe} data dalla seguente relazione :

$$R_{fe} = \frac{V_1^2}{P_{fe}} \quad 2.24$$

-Abolendo la ipotesi 2 relativa al modello ideale ossia, ritenendo l'accoppiamento fra i due circuiti primario e secondario non perfetto, è necessario introdurre due reattanze di dispersione, X_{1d} in serie al primario e X_{2d} in serie al secondario, per tenere conto del flusso che si concatena solo con il primario o solo con il secondario.

Da ultimo, abolendo l'ipotesi 1 relativa al modello ideale, ossia ritenendo diversa da zero la resistenza degli avvolgimenti primari e secondari, è necessario introdurre due resistenze, R_1 in serie al primario e R_2 in serie al secondario.

In fig. 7 è riportato il circuito elettrico completo del modello reale del trasformatore.

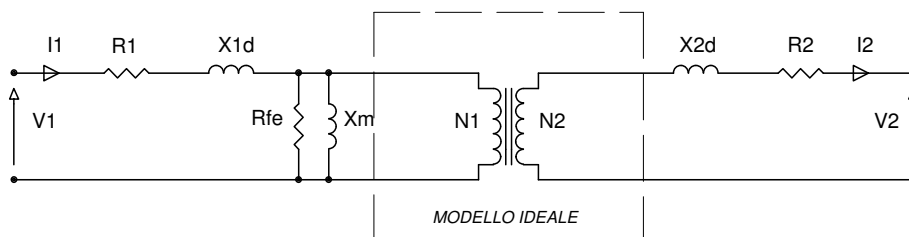


fig.7 Modello reale di un trasformatore

- X_m Reattanza di magnetizzazione
- R_{fe} Schematizza le perdite di potenza attiva nel nucleo
- X_{1d} reattanza di dispersione primaria
- R_1 Resistenza ohmica dell'avvolgimento Primario
- X_{2d} reattanza di dispersione secondaria
- R_2 Resistenza ohmica dell'avvolgimento Secondario

Circuiti equivalenti

Se nel circuito di fig. 7 si trasferiscono tutti i parametri secondari a livello primario si ottiene il circuito di fig. 8.

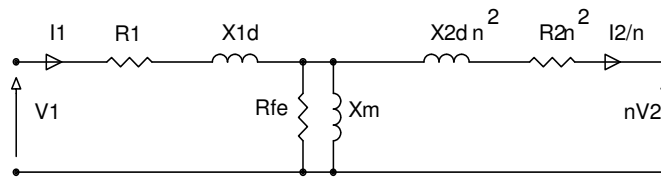


fig. 8 modello reale con i parametri riferiti al circuito primario

Tale circuito può essere semplificato in quello di fig. 9 tenendo conto del fatto che, in condizioni normali, la c.d.t. su $R_1 X_{1d}$ non supera il 3% di V_{1n} .

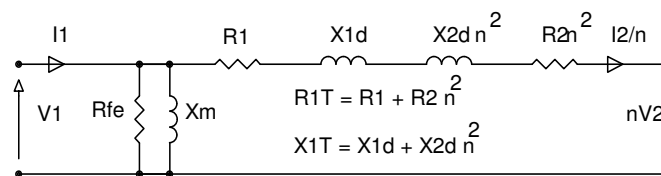


fig. 9 Modello reale semplificato al Primario

Grandezze nominali o di Targa di un Trasformatore

Le grandezze nominali sono le grandezze di normale funzionamento del trasformatore, in base alle quali si è proceduto a dimensionare le dimensioni del nucleo e le dimensioni e le sezioni dei conduttori primari e secondari. Esse sono :

- V_{1n} tensione nominale primaria
- V_{2n} tensione nominale secondaria
- I_{1n} corrente nominale primaria
- I_{2n} corrente nominale secondaria

Il prodotto $V_{1n} I_{1n}$, rappresenta la potenza apparente del trasformatore; tale potenza non deve essere superata se si vuole che il trasformatore funzioni correttamente (senza sovraccarichi sia di tensione che di corrente).

È importante osservare che nei trasformatori

- la corrente magnetizzante riferita al primario I_{10} è circa il 5% della corrente nominale primaria I_{1n} ,
- la caduta di tensione che si stabilisce su R_1 e X_{1d} è circa il 3% della tensione nominale primaria V_{1n} ,
- la caduta di tensione che si stabilisce su R_2 e X_{2d} è circa il 3% della tensione nominale secondaria V_{2n} .

È facile convincersi quindi, che nel funzionamento a vuoto di un trasformatore reale, l'impedenza primaria a vuoto si identifica praticamente con l'impedenza data dal parallelo fra R_{fe} e X_m ,

$$Z_{1v} = \frac{R_{fe} \cdot jX_m}{R_{fe} + jX_m} \cong jX_m \quad 2.25$$

mentre nel funzionamento in corto circuito l'impedenza vista ai morsetti primari è data da :

$$Z_{1c} = R_1 + R_2 + j(X_{1d} + X_{2d}) \quad 2.26$$

ove R_{12} e X_{12} sono rispettivamente resistenza e reattanza secondarie trasferite a livello primario.

Si definisce inoltre tensione di corto circuito primaria V_{1CC} il valore di tensione che dev'essere applicato al trasformatore (con secondario in corto circuito) perchè sul primario circoli la corrente primaria nominale I_{1n} .

Estensione dei concetti all'Autotrasformatore

L'autotrasformatore è un particolare trasformatore costituito da un solo avvolgimento primario di N_1 spire. Il carico è collegato ai capi di una porzione di avvolgimento costituita da N_2 spire. Non esiste, come nel trasformatore, isolamento galvanico fra circuito primario e carico. L'autotrasformatore, a parità di potenza è costruttivamente più piccolo ed è più economico in quanto è dotato di un solo avvolgimento (minori costi per Rame), ma in caso di interruzione del tratto composto da N_2 spire si possono avere seri problemi al carico, in quanto tutta la tensione primaria V_1 in tale situazione finisce interamente ai capi del carico stesso. È facile dimostrare che, nell'ipotesi di considerare un modello ideale, sono ancora valide le considerazioni fatte che ci hanno portato a concludere.

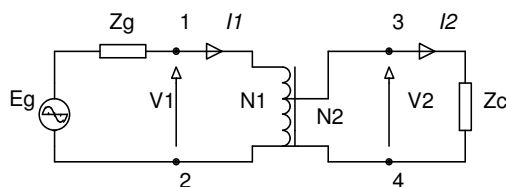


fig. 10 Circuito con Autotrasformatore

Equazione sulle tensioni

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad 2.27$$

Equazione sulle correnti

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad 2.28$$

Estensione al trasformatore a tre o più avvolgimenti

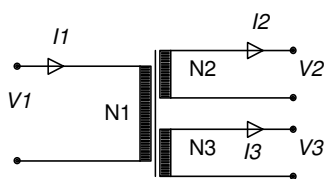


fig. 11 Trasformatore a tre avvolgimenti

Si consideri, a titolo d'esempio, un trasformatore a tre avvolgimenti:

- -primario costituito da N_1 spire
- -secondario costituito da N_2 spire
- -secondario costituito da N_3 spire

Limitandoci a considerare il modello ideale, è immediato, rifacendosi ad espressioni analoghe alle 2.3 e 2.4, pervenire alle seguenti equazioni:

Equazioni sulle tensioni

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 2.29$$

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{N_1}{N_3} \quad 2.30$$

Rifacendosi ad espressioni analoghe alla 2.6, è altrettanto immediato concludere il seguente bilancio delle forze magneto-motrici:

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 - N_3 \cdot I_3 = \mathfrak{R} \cdot \Phi \quad 2.31$$

da cui, tenendo presente che la riluttanza \mathfrak{R} per l'ipotesi 4 è nulla, si ricava :

$$I_1 = \frac{N_2 \cdot I_2}{N_1} + \frac{N_3 \cdot I_3}{N_1} \quad 2.32$$

Funzionamento a V_1 variabile e a frequenza variabile

Fare funzionare un trasformatore ad una tensione primaria V_1 diversa rispetto alla tensione primaria nominale V_{1n} o a una frequenza diversa rispetto quella per cui è stato progettato, richiede molta cautela. Per capire cosa può accadere, è opportuno riprendere la 2.3, ricavando da essa il modulo del prodotto $N_1 \Phi$:

$$N_1 \cdot \Phi = \frac{V_{in}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad 2.33$$

Scelto un trasformatore, quindi fissata la sua V_{1n} e la frequenza di lavoro f , risulta automaticamente determinato il prodotto $N_1 \cdot \Phi$; il flusso Φ dovrà essere scelto in modo da impedire la saturazione del materiale magnetico e N_1 risulterà determinato di conseguenza.

Se viene applicata ai morsetti primari una tensione V_1 superiore a V_{1n} (mantenendo inalterata la frequenza f), per la 2.33 dovrà crescere il prodotto $N_1 \cdot \Phi$ e con esso il flusso di induzione magnetica. È probabile che il nucleo si saturi (dipende dall'entità dell'aumento di V_1) con tutte le conseguenze che ciò comporta:

- -*aumento della corrente magnetizzante,*
- -*riduzione della reattanza di magnetizzazione,*
- -*aumento considerevole delle perdite a vuoto,*
- -*deformazione della forma d'onda della tensione secondaria V_2 ,*
- -*introduzione di armoniche in rete.*

Se viene applicata una tensione V_1 inferiore a V_{1n} (mantenendo inalterata la frequenza f), per la 2.33 diminuisce il prodotto $N_1 \cdot \Phi$ e con esso il flusso di induzione magnetica; ciò migliora le condizioni di lavoro del nucleo, che si allontana dalla saturazione.

Se mantenendo inalterata la tensione primaria V_{1n} , si aumenta la frequenza di lavoro del trasformatore, diminuisce il flusso di induzione magnetica (migliorano quindi le condizioni di lavoro del nucleo che si allontana dalla saturazione) mentre se diminuisce la frequenza di lavoro del trasformatore si rischia di far lavorare il nucleo in saturazione.

Quindi un trasformatore progettato per il mercato europeo ($f=50$ Hz) funziona senz'altro se allacciato alla rete di distribuzione dell'energia elettrica USA ($f=60$ Hz); viceversa un trasformatore prodotto per il mercato USA non funziona correttamente se allacciato alla rete di distribuzione europea a meno di non ridurre la tensione primaria nominale V_{1n} in modo da riportare il prodotto $N_1 \cdot \Phi$ entro valori ragionevoli (2.33).

Esempio :

Un trasformatore progettato per il mercato U.S.A. per lavorare a 220V/60Hz in Europa può essere alimentato a 183V/50Hz; un trasformatore progettato per il mercato Italiano per lavorare a 220V/50Hz può essere utilizzato in U.S.A. 264V/60Hz.

Variazione delle perdite nel ferro con la f e la V₁

Al variare della tensione V₁ e della frequenza f variano pure le perdite nel ferro infatti :

$$P_{cp} = K_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad 2.34$$

$$P_i = K_i \cdot f \cdot B^c \quad (c \text{ varia fra } 2.5 \text{ e } 2.5) \quad 2.35$$

le perdite per correnti parassite sono proporzionali al quadrato della frequenza e al quadrato dell'induzione massima mentre le perdite per isteresi sono direttamente proporzionali alla frequenza e dipendono dalla induzione magnetica massima B elevata ad un coefficiente c compreso fra 2.5 e 2.5. Si tenga presente che al crescere della V₁ cresce il flusso e quindi il valore dell'induzione magnetica B.

Trasformatori di misura TV e TA

I trasformatori vengono pure usati nei sistemi di misura di grandezze elettriche (tensioni, correnti, potenza ed energia) installati negli impianti di distribuzione e di utilizzo dell'Energia Elettrica. Si distinguono in TV (trasformatori voltmetrici) e TA (trasformatori amperometrici).

- *Il TV funziona sempre come riduttore di tensione e ha come carico secondario uno o più circuiti voltmetrici di strumenti di misura (voltmetri, wattmetri, contatori connessi in parallelo fra loro) che normalmente operano a bassa tensione (di solito tensioni comprese fra 100V e 300V); quindi il TV funziona praticamente "a vuoto". Il TV è caratterizzato da una potenza apparente A che non deve essere mai superata; per evitare danni (causati da sovraccarichi di corrente secondaria e cortocircuiti), viene corredato di fusibili di protezione collegati in serie al circuito primario, che hanno il compito di limitare l'intensità di corrente massima che può circolare.*
- *Il TA funziona sempre come riduttore di corrente e ha come carico secondario uno o più circuiti amperometrici di strumenti di misura (amperometri, wattmetri, contatori connessi in serie fra loro) che normalmente operano a bassa corrente (di solito 5A); quindi il TA funziona praticamente "in corto circuito". Il TA è caratterizzato da una potenza apparente A che non deve essere mai superata; per evitare danneggiamenti (causati da sovraccarichi di tensione che si manifestano quando si apre il secondario), viene corredato di sistemi di protezione contro le sovratensioni (resistenze su connettori o morsetti speciali) che hanno il compito di limitare la tensione secondaria V₂ a valori ragionevoli.*

È evidente che i TV e TA destinati ad essere inseriti su linee ad alta tensione, dovranno avere il circuito primario che soddisfi le esigenze di isolamento previste dalla normative di sicurezza.

Applicazioni particolari

Una interessante applicazione è rappresentata dal cosiddetto "salvavita"; si tratta di un relè amperometrico differenziale che apre il circuito di alimentazione qualora lo scarto di corrente che lo attraversa superi una entità prestabilita. Lo si può schematizzare con un trasformatore dotato di tre avvolgimenti: due primari dotati di N spire ma avvolti in modo da produrre due forze magnetomotrici discordi ed un secondario costituito da N₃ spire e chiuso sulla bobina di eccitazione di un relè R. Supponendo il circuito ideale fra le forze magnetomotrici sussiste la relazione:

$$N \cdot I_1 - N \cdot I_2 - N_3 \cdot I_3 = 0 \quad 2.36$$

$$I_3 = \frac{N}{N_3} (I_1 - I_2) \quad 2.37$$

Qualora risulti I₁ = I₂ dalla 2.37 si desume che I₃ = 0 e quindi il relè risulta diseccitato; quando la differenza I₁ - I₂ risulta diversa da 0 e supera una soglia costruttivamente prefissata ΔI (30 mA per le utenze civili e 300 mA per quelle industriali) la corrente I₃ data dalla 2.37 attiva il relè che provoca l'apertura del circuito e l'interruzione dell'alimentazione.

Determinazione sperimentale di R_{fe} e X_m

Detta V_1 la tensione di alimentazione sul primario, I_{1v} la corrente che circola sul primario a vuoto, P_{1v} e Q_{1v} rispettivamente potenza attiva e reattiva assorbite a vuoto risulta:

$$R_{fe} = \frac{V_{1v}^2}{P_{1v}} \quad 2.38$$

$$X_m = \frac{V_{1v}^2}{Q_{1v}} \quad 2.39$$

Bibliografia

Olivieri Ravelli *Fondamenti di Elettrotecnica ed Elettronica* *Cedam Padova*
Joseph A. Edminister *Electric Circuits* *Schaum*