

PERDITE DI POTENZA NEI TRASFORMATORI

www.elettrone.altervista.org
www.professore.mypodcast.com
www.marcochirizzi.blogspot.com

Prof. Marco Chirizzi

PREMESSA

Il trasformatore è una macchina elettrica statica, cioè priva di parti in movimento. Durante il funzionamento di una macchina elettrica, si verificano delle perdite di potenza attiva. Il valor medio della potenza totale persa moltiplicato per il tempo di funzionamento della macchina elettrica rappresenta l'energia persa sotto forma di calore, che determina un riscaldamento della macchina stessa. Analizziamo separatamente quelle che sono le perdite di un trasformatore.

1.1 PERDITE NEGLI ELEMENTI CONDUTTORI

Dato un conduttore di lunghezza ℓ , sezione S , resistività r , percorso da corrente continua, le perdite ohmiche si calcolano come segue:

$$P_J = R \cdot I^2 = r \cdot \frac{\ell}{S} \cdot I^2$$

L'intensità di corrente I è legata alla densità di corrente J dalla relazione $I = J \cdot S$; sostituendo, si ha:

$$P_J = r \cdot \frac{\ell}{S} \cdot J^2 \cdot S^2 = r \cdot \ell \cdot S \cdot J^2 \quad [W]$$

Notiamo che la potenza P_J è direttamente proporzionale al quadrato della densità di corrente. Il prodotto $\ell \cdot S$ rappresenta il volume V del conduttore in esame. Dividendo i due membri dell'ultima relazione per il volume $S \cdot \ell$ si ottiene l'espressione della perdita specifica del rame per unità di volume, cioè:

$$P_{JV} = \frac{P_J}{V} = r \cdot J^2 \quad [W/m^3]$$

Introducendo il fattore $s = \frac{M}{V}$ (massa volumica del materiale conduttore), possiamo ricavare l'espressione della potenza specifica del rame per unità di massa, cioè:

$$P_{JM} = \frac{P_J}{M} = \frac{r \cdot J^2 \cdot V}{M} = r \cdot J^2 \cdot \frac{M}{s \cdot M} = \frac{r \cdot J^2}{s} \quad [W/Kg]$$

Dalle relazioni ottenute si deduce che la perdita specifica dipende dal quadrato della densità di corrente e dalle caratteristiche del materiale conduttore (s e r). In un conduttore percorso da corrente alternata sinusoidale, il fenomeno della dispersione di energia risulta più complesso, in quanto all'interno del conduttore stesso vi è la presenza di flussi magnetici di dispersione, che essendo variabili nel tempo generano una forza elettromotrice indotta, la quale rende disomogenea la distribuzione della corrente elettrica all'interno del conduttore. In poche parole, le linee di corrente si presentano più addensate da una parte e più rade dall'altra. In pratica, è come se la sezione del conduttore subisse una riduzione con un conseguente aumento della resistenza elettrica. Denotiamo con R_{ac} il valore di resistenza nel funzionamento in corrente alternata e con R_{dc} il valore che si ha in corrente continua. Si definisce potenza addizionale di un materiale conduttore, il prodotto:

$$P_{add} = R_{add} \cdot I^2$$

dove $R_{add} = R_{ac} - R_{dc}$ è la resistenza addizionale del conduttore (si ricordi che risulta $R_{ac} > R_{dc}$).

In definitiva, le perdite complessive nel rame si possono esprimere nel seguente modo:

$$P_{CU} = P_J + P_{add} = R_{dc} \cdot I^2 + R_{add} \cdot I^2 = R_{dc} \cdot I^2 + (R_{ac} - R_{dc}) \cdot I^2 = R_{ac} \cdot I^2$$

1.2 PERDITE NEI NUCLEI MAGNETICI

Nei nuclei magnetici delle macchine elettriche si verificano perdite di potenza attiva dovute principalmente a due fenomeni legati alla variabilità nel tempo del flusso magnetico f : isteresi magnetica e correnti parassite. Quando del materiale ferromagnetico è sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa, l'energia fornita al materiale durante la magnetizzazione non viene interamente restituita durante la smagnetizzazione, bensì una parte di essa viene persa per ogni ciclo sotto forma di calore. Tale quantità di energia è proporzionale all'area del ciclo di isteresi. Le perdite per isteresi dipendono dai seguenti fattori:

- Tipo di materiale, in funzione del quale cambia la forma e le dimensioni del ciclo di isteresi e quindi il valore dell'energia persa per ogni ciclo;
- Valore dell'induzione massima raggiunta durante il ciclo (quanto maggiore risulta questo valore, tanto più largo diventa il ciclo di isteresi con conseguente aumento delle perdite di potenza);
- Frequenza della corrente magnetizzante, il cui aumento determina un incremento del numero di cicli di isteresi e quindi un aumento della potenza persa per isteresi.

In formula si ha:

$$P_i = K_i \cdot f \cdot B_M^n \quad (\text{potenza unitaria persa per isteresi})$$

Il coefficiente n può assumere i seguenti valori:

$$n = 1,6 \quad \text{per } B_M < 1\text{Tesla};$$

$$n = 2 \quad \text{per } B_M \geq 1\text{Tesla}.$$

La costante K_i dipende dal tipo di materiale. Il termine f rappresenta la frequenza della corrente magnetizzante.

Quando un circuito elettrico si concatena con linee di flusso magnetico f variabile nel tempo, nel circuito viene indotta una forza elettromotrice e_0 che si oppone alla variazione del flusso stesso ed è data da:

$$e_0 = -\frac{\Delta f_c}{\Delta t}$$

dove Δf_c è la variazione del flusso concatenato che si verifica nell'intervallo di tempo Δt . La tensione indotta e_0 genera una corrente $i = \frac{e_0}{R}$ inversamente proporzionale alla resistenza R del circuito. Lo stesso fenomeno si verifica nei nuclei ferromagnetici dei trasformatori. Il nucleo, infatti, può essere considerato come un insieme di circuiti chiusi che, quando soggetti ad un flusso magnetico variabile nel tempo, sono sede di correnti elettriche (vedi figura 1) che fluiscono su dei piani perpendicolari alle linee di flusso magnetico e determinano dissipazione di energia sotto forma di calore.

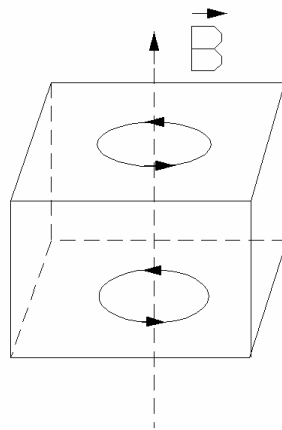


Figura 1. Rappresentazione schematica delle correnti parassite

Si dimostra che la potenza specifica per correnti parassite in una lamina ferromagnetica di spessore S e resistività r , sottoposta a magnetizzazione sinusoidale con frequenza f ed induzione massima B_M è data da:

$$P_{CP} = \frac{K \cdot S^2 \cdot f^2 \cdot B_M^2}{r}$$

Ponendo $K_{CP} = \frac{K \cdot S^2}{r}$, possiamo scrivere:

$$P_{CP} = K_{CP} \cdot f^2 \cdot B_M^2$$

Notiamo che le perdite per correnti parassite dipendono dal quadrato della frequenza, quindi per ridurre tali perdite si potrebbe diminuire la frequenza, ma questa grandezza è legata al funzionamento del trasformatore. In effetti, si possono limitare le perdite, riducendo lo spessore del lamierino e aumentando la resistività. L'aumento della resistività si ottiene aggiungendo del silicio nel materiale ferromagnetico. Per diminuire ulteriormente le perdite, il nucleo lo si realizza con lamiere sottili poste una sopra l'altra e isolate tra loro mediante vernici. La laminazione viene realizzata in senso parallelo alla direzione di magnetizzazione (vedi figura 2).

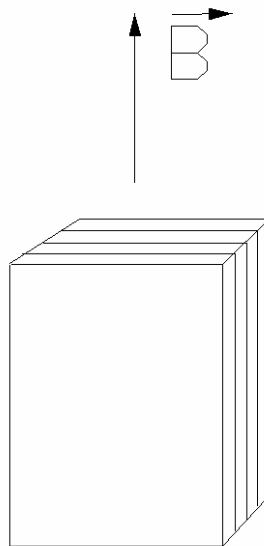


Figura 2. Laminazione del nucleo ferromagnetico di un trasformatore

Si definisce perdita specifica del ferro la perdita di potenza totale per unità di volume o di massa, a seconda del valore dei coefficienti. La relazione risulta la seguente:

$$P_{fs} = P_i + P_{CP} = K_i \cdot f \cdot B_M^n + K_{CP} \cdot f^2 \cdot B_M^2$$

Nelle applicazioni, questa relazione non può essere utilizzata, in quanto le costanti non sono generalmente note. I costruttori forniscono però la cifra di perdita, che rappresenta il valore della perdita specifica, somma delle perdite per isteresi e per correnti parassite, che si ha per un'induzione sinusoidale di frequenza $50H_z$ e valore massimo di 1 Tesla oppure 1,5 Tesla. Indicando con B_0 il valore massimo di induzione magnetica prestabilito e con P_0 il relativo indice di perdita, possiamo scrivere:

$$P_0 = K_i \cdot 50 \cdot B_0^2 + K_{CP} \cdot 50^2 \cdot B_0^2 = 50 \cdot B_0^2 \cdot (K_i + 50 \cdot K_{CP})$$

L'espressione di P_{fs} può essere scritta come segue:

$$P_{fs} = f \cdot B_M^2 \cdot (K_i + f \cdot K_{CP})$$

Confrontando le due espressioni si ha:

$$\frac{P_{fs}}{P_0} = \frac{f \cdot B_M^2 \cdot (K_i + f \cdot K_{CP})}{50 \cdot B_0^2 \cdot (K_i + 50 \cdot K_{CP})}$$

da cui si ricava:

$$P_{fs} = P_0 \cdot \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 \cdot \frac{f \cdot (K_i + f \cdot K_{CP})}{50 \cdot (K_i + 50 \cdot K_{CP})}$$

Ponendo $K_f = \frac{f \cdot (K_i + f \cdot K_{CP})}{50 \cdot (K_i + 50 \cdot K_{CP})}$, l'espressione presedente diventa:

$$P_{fs} = P_0 \cdot \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 \cdot K_f$$

Nelle applicazioni si ha generalmente $f = 50 \text{ Hz}$, per cui $K_f = 1$ e quindi

$$P_{fs} = P_0 \cdot \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2$$

Nel calcolo delle perdite complessive nel ferro, bisogna tener conto dell'invecchiamento del materiale, aggiungendo 5% ÷ 10% di aumento delle perdite.