



MATERIALI FERROMAGNETICI E MATERIALI CONDUTTORI

Lucia FROSINI

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

1

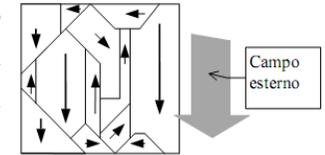
L. Frosini

Materiali ferromagnetici

I materiali ferromagnetici risultano attivi dal punto di vista magnetico, in quanto partecipano alla magnetizzazione attraverso la propria struttura cristallina, interagendo con il campo magnetico H prodotto esternamente.

Il loro comportamento è intuibile attraverso l'analisi del comportamento magnetico della struttura a domini magnetici tipica di questi materiali.

Internamente al dominio esiste un campo magnetico dotato di un orientamento preferenziale. A causa del disordine naturale, i vari domini risultano polarizzati magneticamente in modo casuale.



Tuttavia, sotto l'azione di un campo magnetico esterno, i domini tendono a disporsi in modo da favorire il campo eccitante. L'azione si produce in modo graduale ed è legata all'intensità del campo eccitante. Per campi particolarmente intensi si può arrivare al completo orientamento del materiale (fenomeno della saturatione).

2

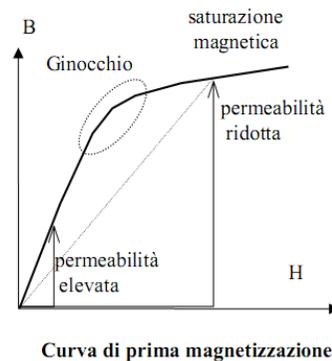
L. Frosini

Materiali ferromagnetici

Si attribuisce a B l'effetto risultante generato dal materiale magnetico e dalla corrente di eccitazione, lasciando ad H il significato di campo originato dalla sola corrente di eccitazione. Ne consegue che per i materiali ferromagnetici deve essere fornita la relazione: $B = B(H)$

Tale relazione, per un materiale magnetizzato per la prima volta, variando il campo H da un valore nullo fino ad uno massimo, è rappresentata in figura. Tale caratteristica viene denominata curva di prima magnetizzazione.

Si ricorda che l'equazione che lega queste due grandezze nei mezzi lineari è: $B = \mu H$, con $\mu = \mu_0 \mu_r$, dove $\mu_0 =$ permeabilità magnetica del vuoto $= 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m e $\mu_r =$ permeabilità relativa del materiale (numero puro).



3

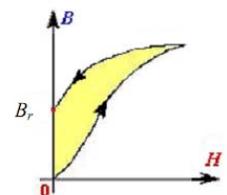
L. Frosini

Materiali ferromagnetici

La pendenza massima della caratteristica di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico risulta $10^3 \div 10^4$ volte la pendenza della caratteristica magnetica del vuoto. Questo significa che, per produrre uguali valori di induzione B , vengono richiesti valori del campo H (e quindi della corrente di eccitazione i) 10^4 volte più piccoli nel ferro di quelli necessari nell'aria.

Diminuendo con continuità il campo H dal valore massimo a zero, non si ripercorre più la caratteristica di prima magnetizzazione, a causa degli attriti nei moti di orientamento dei domini.

Annullando il campo esterno H , rimane un orientamento residuo dei domini e quindi un valore di induzione residua (B_r). Per annullare l'induzione residua, si deve applicare al materiale un campo esterno negativo (cioè di verso opposto al precedente), denominato campo coercitivo (H_c).



4

Materiali ferromagnetici

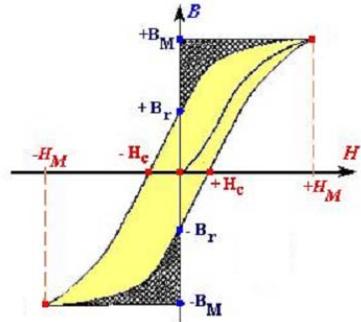
Sottoponendo il materiale ad una magnetizzazione alternativa (ad es. sinusoidale) si percorrerà un ciclo di isteresi.

L'area del ciclo d'isteresi assume il significato di energia per unità di volume perduta nel materiale per un ciclo completo di magnetizzazione.

Tale dissipazione di energia è imputabile agli attriti connessi con il movimento delle pareti dei domini e assume un'espressione del tipo:

$$E_{ist} = k_{ist} B_M^n$$

dove k_{ist} ed n dipendono dal tipo di materiale. Tipicamente n (esponente di Steinmetz) varia tra 1,6 (per $B_M < 1$ T) e 2 (per $B_M \geq 1$ T).



5

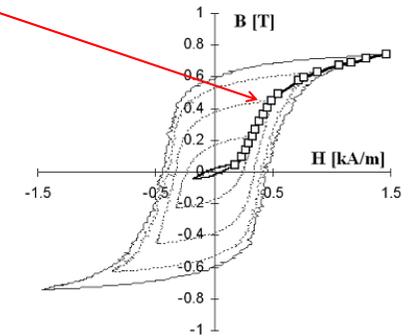
Materiali ferromagnetici

Si definisce curva di normale magnetizzazione del materiale il luogo dei punti costituito dai vertici dei cicli di isteresi simmetrici di ampiezza crescente.

I materiali ferromagnetici vengono a loro volta classificati in due famiglie a seconda della forma del loro ciclo di isteresi:

- Materiali magnetici dolci.
- Materiali magnetici duri.

I primi sono caratterizzati da un ciclo di isteresi stretto e molto pendente (cioè con permeabilità molto elevate) e vengono utilizzati nella realizzazione dei nuclei magnetici delle macchine elettriche (in forma massiccia per flussi costanti o in forma laminata per flussi variabili nel tempo).

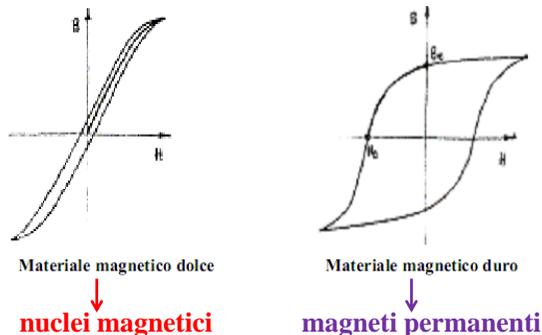


6

Materiali ferromagnetici

I materiali magnetici duri sono invece caratterizzati da un ciclo di isteresi molto ampio con valori di induzione residua e campo coercitivo elevati: per queste loro caratteristiche vengono utilizzati per la realizzazione di magneti permanenti.

Vista la forma del loro ciclo di isteresi, i materiali magnetici duri non possono essere eccitati con campi alternativi, in quanto le perdite per isteresi sarebbero troppo elevate.



7

Perdite nei nuclei magnetici

Nei nuclei magnetici delle macchine elettriche, costituiti da materiali magnetici dolci, si hanno perdite di potenza attiva dovute ai fenomeni di:

- 1) **Isteresi magnetica**
 - 2) **Correnti parassite**
- } ➡ **PERDITE NEL FERRO**

Entrambi i fenomeni sono legati alla variabilità nel tempo del flusso magnetico.

Sono dette “perdite nel ferro” proprio perché i nuclei magnetici sono costituiti da leghe di ferro.

Nel caso di flusso magnetico costante, tali perdite sono nulle.

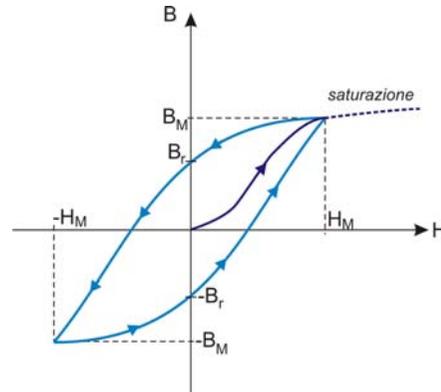
8

Perdite per isteresi

Il fenomeno dell'**isteresi magnetica** si manifesta quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa.

Ciò si verifica, ad esempio, quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sede di un flusso magnetico Φ variabile alternativamente nel tempo, in quanto prodotto da una corrente i variabile alternativamente nel tempo.

A causa del fenomeno dell'**isteresi magnetica**, l'energia fornita al nucleo durante la fase di magnetizzazione non viene interamente restituita durante quella di smagnetizzazione, ma, ad ogni ciclo, rimane immagazzinata nel nucleo magnetico una quantità di energia proporzionale all'area del ciclo stesso.



9

Perdite per isteresi

La **potenza persa per isteresi** (= energia persa per unità di tempo) è proporzionale al numero di cicli d'isteresi descritti in un secondo e dipende da:

- **tipo di materiale**, in base a cui varia la forma e la dimensione del ciclo;
- **valore dell'induzione massima B_M** , all'aumentare del quale il ciclo diventa più ampio;
- **frequenza della corrente magnetizzante f** , il cui aumento determina un maggior numero di cicli descritti nell'unità di tempo.

La formula di Steinmetz: $P_{ist} = k_{ist} \cdot f \cdot B_M^n$

permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume [W/m^3] o per unità di massa [W/kg], a seconda di come viene espressa la costante k_{ist} , che dipende dal **tipo di materiale**.

Utilizzando il **ferro-silicio**, è possibile **ridurre l'area del ciclo di isteresi** e, di conseguenza, le perdite per isteresi.

10

Perdite per correnti parassite

Le **correnti indotte parassite** nascono nei corpi conduttori quando:

- il corpo conduttore è investito da **flusso magnetico variabile nel tempo**;
- il corpo conduttore **si muove** in campi magnetici costanti.

Ciò accade come conseguenza della **legge di Faraday** relativa al fenomeno dell'**induzione magnetica**, ossia quando un circuito elettrico si concatena con un flusso magnetico variabile nel tempo, nel circuito elettrico nasce una **f.e.m. indotta**:

$$e = \frac{d\Psi}{dt}$$

dove: $\Psi = N\Phi$ è il **flusso concatenato** con N spire.

$\Phi = B \cdot A$ è il **flusso magnetico**, che varia:

- quando varia B , ossia quando varia la corrente magnetizzante i ;
- quando varia A , ossia quando la spira si muove o si deforma.

11

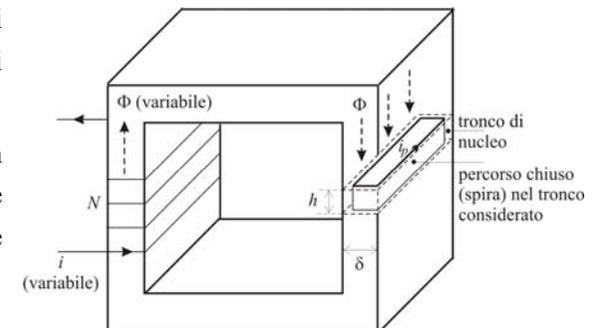
Perdite per correnti parassite

Se la **f.e.m. indotta** agisce in un circuito chiuso di resistenza R , nel circuito si ha circolazione di una **corrente indotta parassita** pari a e/R .

Consideriamo il caso illustrato in figura: un nucleo in ferro massiccio, sede di un flusso magnetico Φ variabile nel tempo, in quanto prodotto da una corrente magnetizzante i variabile nel tempo (ad es., alternata sinusoidale).

In un piccolo tronco di nucleo di altezza h e spessore δ sono presenti tanti percorsi chiusi (spire).

Poiché il flusso concatenato con queste spire varia nel tempo, esse diventeranno sede di f.e.m. indotte e quindi di correnti indotte parassite i_p .



12

Perdite per correnti parassite



Nel tronco di nucleo considerato si hanno tante correnti indotte parassite.

Queste correnti determinano una dissipazione di energia elettrica in calore nel materiale.

Più alta è la resistività del materiale ρ , più piccola risulterà l'intensità delle correnti parassite e quindi minore sarà la dissipazione di energia elettrica in calore.

La formula:

$$P_{cp} = \frac{k'_{cp} \cdot \delta^2 \cdot f^2 \cdot B_M^2}{\rho} = k_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2 \quad \delta = \text{spessore nucleo}$$

permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume [W/m³] o per unità di massa [W/kg], a seconda di come viene espressa la costante k'_{cp} , che dipende dal **tipo di materiale**.

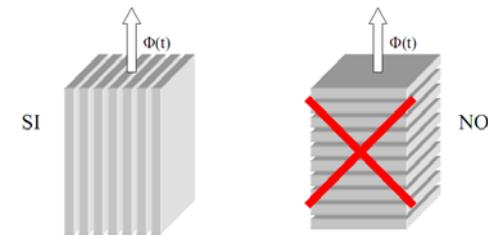
13

Perdite per correnti parassite



Per diminuire gli effetti delle correnti parassite occorre **aumentare la resistenza dei possibili percorsi** che le correnti indotte trovano all'interno nel conduttore investito da flusso magnetico variabile nel tempo:

- suddividendo il nucleo massiccio in tante lamiere sottili, parallele alle linee di flusso (e quindi diminuendo lo spessore δ);
- aumentando la resistività dei materiali impiegati (ad es., utilizzando ferro-silicio anziché ferro dolce: la resistività del ferro-silicio è 4 volte maggiore di quella del ferro dolce).



14

Nuclei magnetici

Proprio al fine di limitare le perdite per correnti parassite, i nuclei delle macchine elettriche in corrente alternata sono generalmente laminati con spessori $\delta = 0,35 \pm 0,5$ mm. I lamierini sono isolati tra loro, ad es. con vernici termoindurenti.

L'impiego del **silicio** ha due vantaggi:

- riduce l'ampiezza del ciclo di isteresi del materiale;
- aumenta la resistività elettrica ρ del materiale.

Quindi, l'impiego del silicio fa diminuire sia le perdite per isteresi, sia le perdite per correnti parassite.

Lo svantaggio è che il silicio rende il materiale molto fragile.

Pertanto, la percentuale di silicio è limitata a un massimo del 5% per i trasformatori e a percentuali inferiori nelle macchine rotanti.

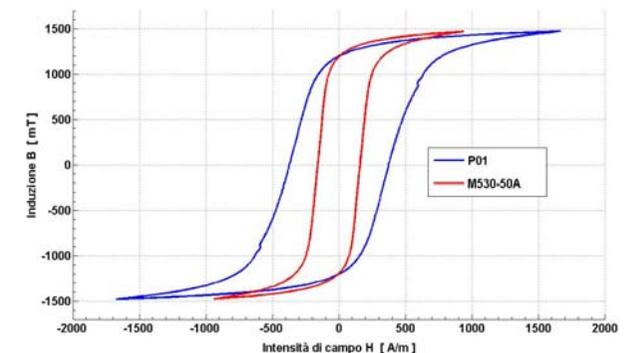
15

Vantaggi dei lamierini in ferro-silicio

Di seguito sono riportate le caratteristiche sperimentali di due lamierini, differenti sia nel materiale che nello spessore, che possono essere utilizzati ad es. per la costruzione dei nuclei di statore e rotore di un motore asincrono:

- lamierini in ferro P01 (spessore $\delta = 0,65$ mm)
- lamierini in lega ferro silicio M530-50 A (spessore $\delta = 0,5$ mm)

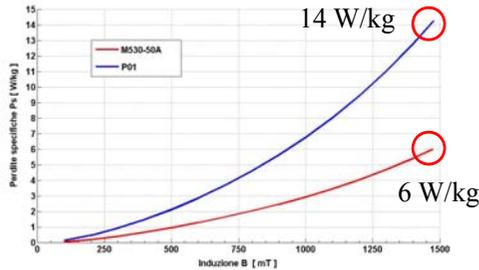
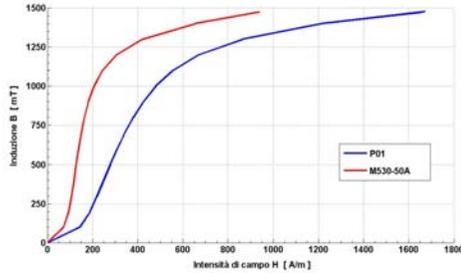
Cicli d'isteresi dei due materiali a 50 Hz :



16

Vantaggi dei lamierini in ferro-silicio

Curve di prima magnetizzazione a 50 Hz:



Perdite specifiche a 50 Hz, in funzione dell'induzione B

Lamierini in ferro-silicio

Le perdite nei materiali magnetici dovute a isteresi e a correnti parassite possono essere stimate attraverso le formule semi-empiriche già citate. Tuttavia, nella pratica, generalmente non sono noti i valori delle costanti k_{ist} e k_{cp} .

I produttori di materiali magnetici forniscono però un particolare valore di perdita specifica, determinato sperimentalmente, detto **cifra di perdita**.

La **cifra di perdita** [W/kg] è definita come la perdita specifica, per isteresi e per correnti parassite, che si ha quando un materiale è investito da un campo magnetico alternato sinusoidale a frequenza $f = 50$ Hz con induzione massima fissata B_M .

Generalmente si fa riferimento a $B_M = 1$ T oppure $B_M = 1,5$ T.

Se è nota la cifra di perdita P_0 per $B_0 = 1$ T, allora la perdita specifica P_{fs} per $B_M = 1,2$ T è data da:

$$P_{fs} = P_0 \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 = P_0 \left(\frac{1,2}{1} \right)^2$$

Lamierini in ferro-silicio: cifra di perdita

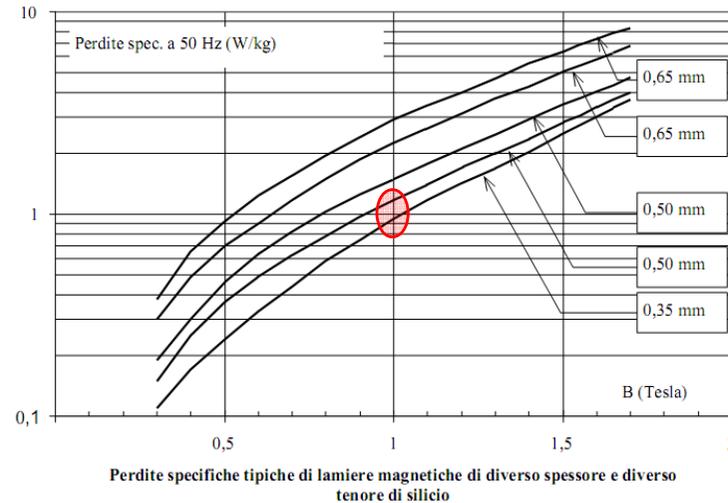
La **cifra di perdita** [W/kg] varia a seconda del materiale e spessore del lamierino. Con riferimento a $B_M = 1$ T, abbiamo ad es. i seguenti valori di cifra di perdita:

	$\delta = 0,5$ mm	$\delta = 0,35$ mm
■ ferro normale:	3,6	-
■ ferro all'1÷1,5% di Si:	2,2÷2,5	- lamiera semilegata
■ ferro al 2÷2,5% di Si:	1,7÷2	- lamiera legata
■ ferro al 3,5÷4,5% di Si:	1÷1,2	0,8÷1 lamiera extralegata
■ ferro al 3% di Si a cristalli orientati:		0,4÷0,5 (nella direzione della laminazione)

La **cifra di perdita** è generalmente riferita a lamiere nuove: nella valutazione delle perdite nel ferro si deve tenere conto di un loro aumento del 5÷10% per l'invecchiamento del materiale e per le lavorazioni meccaniche a cui i lamierini sono sottoposti durante le fasi di realizzazione dei nuclei magnetici.

Lamierini in ferro-silicio: cifra di perdita

$$P_{ferro} = k_{ist} \cdot f \cdot B_M^n + k_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2 \left[\frac{W}{kg} \right]$$



Per $B_M = 1$ T
($f = 50$ Hz):
~ 1 W/kg
ferro-silicio a cristalli NON orientati

Lamierini a cristalli orientati

I **lamierini a cristalli orientati** (*grain-oriented*) sono ottenuti da lamiere di alcuni millimetri di ferro silicio al 3% laminate a caldo.

Queste lamiere vengono successivamente laminate a freddo e sottoposte, tra una laminazione e l'altra, ad opportuni trattamenti termici, fino a ottenere lamiere di spessore $\delta = 0,35$ mm.

Con questo procedimento, i domini magnetici (cristalli) del materiale si "organizzano" in modo da presentare **proprietà magnetiche decisamente migliori, se soggetti a flussi nella direzione della cristallizzazione**.

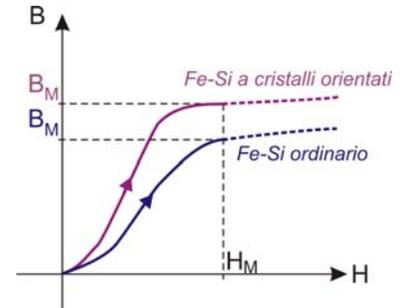
La cifra di perdita è $0,4 \div 0,5$ W/kg (con $B_M = 1$ T), quando le linee di flusso sono nella direzione della laminazione.

Nella direzione ortogonale al senso di laminazione, le perdite specifiche sono circa 3 volte superiori ($1,5 \div 2$ W/kg), ma comunque paragonabili a quelle dei lamierini ordinari in ferro silicio al $2 \div 2,5\%$.

21

Lamierini a cristalli orientati

Nei lamierini a cristalli orientati, rispetto a quelli ordinari, è più elevata la permeabilità magnetica e aumenta anche il valore massimo di induzione magnetica B_M che si può ottenere prima di arrivare alla saturazione (valore corrispondente al "ginocchio" della curva di magnetizzazione $B-H$), sempre nel caso in cui la direzione della magnetizzazione sia quella della laminazione.



Nella pratica, i lamierini possono essere:

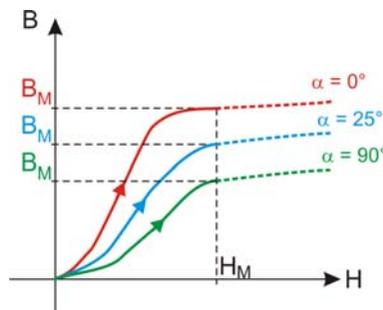
- ✚ in **ferro-silicio** ordinari nelle macchine rotanti di piccola e media potenza e nei trasformatori di piccola potenza;
- ✚ in **ferro-silicio a cristalli orientati** in quasi tutti i trasformatori e negli statori dei grandi generatori sincroni (in quest'ultimo caso, con orientamento circonferenziale).

22

Lamierini a cristalli orientati

All'aumentare dell'angolo di scostamento α tra la direzione in cui il materiale è magnetizzato durante il funzionamento e la direzione della laminazione, i valori dell'induzione B corrispondenti ai diversi valori di H diminuiscono.

Di conseguenza, il ciclo di isteresi si allarga e le perdite specifiche del materiale aumentano.



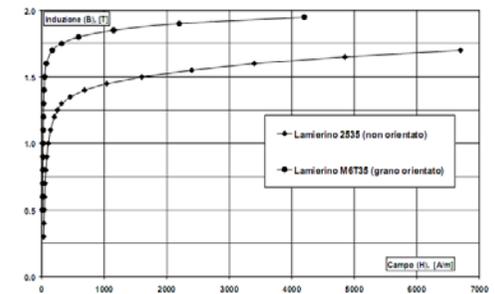
23

Lamierini a cristalli orientati e non orientati

Le lamiere magnetiche a cristalli non orientati possono essere denominate con un codice di 4 cifre in cui le prime due cifre indicano la cifra di perdita a 1,5 T moltiplicata per dieci, mentre le ultime due cifre indicano lo spessore di laminazione in centesimi di millimetro.

Esempio: Il codice 2535 descrive una lamiera da 2,5 W/kg a 1,5 T di spessore uguale a 0,35 mm.

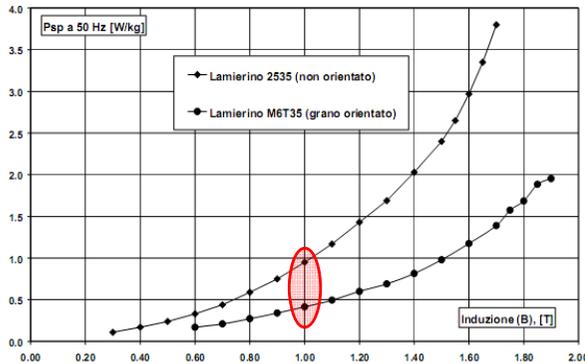
Possono essere utilizzati altri codici, come ad es. M310-50A, dove 310 indica la cifra di perdita a 1,5 T moltiplicata per 100 (quindi 3,1 W/kg) e 50 lo spessore nominale in centesimi di millimetro (0,5 mm).



Caratteristica B-H a 50 Hz: lamierino a grano non orientato (2535) e a grano orientato (M6T35)

24

Lamierini a cristalli orientati e non orientati



Per $B = 1 \text{ T}$ ($f = 50 \text{ Hz}$):

$\sim 1 \text{ W/kg}$

ferro-silicio a cristalli
NON orientati

$\sim 0,5 \text{ W/kg}$

ferro-silicio a cristalli
orientati

Perdite specifiche a 50 Hz: lamierino a grano non orientato (2535) e a grano orientato (M6T35)

N.B.: nelle macchine elettriche operanti a frequenze superiori a quelle industriali ($>50 \div 60 \text{ Hz}$), la scelta di lamierini a basse perdite diventa particolarmente importante, in quanto le perdite nel ferro dipendono linearmente e quadraticamente dalla frequenza. Per queste applicazioni, esistono lamierini speciali, tagliati al laser, con spessore $0.1 \div 0.2 \text{ mm}$ e perdite ancora più basse.

25

Materiali conduttori

Nelle macchine elettriche, i materiali conduttori vengono utilizzati per realizzare gli avvolgimenti elettrici.

I principali materiali conduttori utilizzati sono il rame e l'alluminio, poiché sono caratterizzati da un basso valore della resistività ρ (dell'ordine di $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) e presentano un costo accettabile (rispetto ad argento e oro):

Materiale	ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] a 20°C	Peso specifico [kg/dm^3]
Argento	$1,59 \cdot 10^{-8}$	10,5
Rame	$1,72 \cdot 10^{-8}$	8,9
Oro	$2,44 \cdot 10^{-8}$	19,3
Alluminio	$2,82 \cdot 10^{-8}$	2,6

26

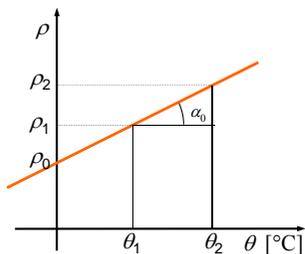
Materiali conduttori

IMPORTANTE: La resistività di un materiale conduttore aumenta all'aumentare della sua temperatura.

Indicando con ρ la resistività di un materiale conduttore alla temperatura θ e con ρ_0 la sua resistività a 0°C , vale la seguente relazione:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_0 \theta)$$

α_0 = coefficiente di temperatura della resistività riferito a 0°C
 $\cong 0,0039 \text{ [}^\circ \text{C}^{-1}\text{]}$ per rame e alluminio



I materiali detti superconduttori, quando vengono portati al di sotto della loro temperatura critica, assumono una resistività praticamente nulla.

Al contrario, la resistività di altri materiali, come ad es. i semiconduttori, diminuisce all'aumentare della temperatura.

27

Materiali conduttori

La resistenza che un conduttore di lunghezza l e sezione trasversale A presenta al passaggio di corrente vale:

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ [}\Omega\text{]}$$

Questa espressione è valida solo se la corrente è distribuita uniformemente nella sezione A del conduttore, ossia quando la corrente è continua.

Considerando la proporzionalità diretta tra R e ρ , si può quindi scrivere la seguente formula, che permette di calcolare la resistenza R_2 di un corpo alla temperatura θ_2 a partire dalla resistenza R_1 dello stesso corpo alla temperatura θ_1 :

$$R_1 = R_0(1 + \alpha_0 \theta_1)$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha_0 \theta_2)$$



$$\frac{R_2}{1 + \alpha_0 \theta_2} = \frac{R_1}{1 + \alpha_0 \theta_1}$$



$$R_2 = \frac{1 + \alpha_0 \theta_2}{1 + \alpha_0 \theta_1} R_1$$

28

Materiali conduttori

Rispetto al rame, i vantaggi fondamentali dell'alluminio sono la leggerezza e il costo. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, l'alluminio presenta:

-  resistività maggiore di quella del rame: a parità di resistenza elettrica, la sezione di un conduttore di alluminio è del 65% superiore a quella di un conduttore in rame;
-  caratteristiche meccaniche decisamente inferiori a quelle del rame (es. modulo di elasticità, carico di rottura a trazione);
-  temperatura di fusione minore di quella del rame (658 °C contro 1083°C);
-  ottime proprietà tecnologiche, in particolare è ottimo per l'ottenimento di forme per fusione o pressofusione;
-  è molto malleabile e come tale può essere facilmente sottoposto a tutte le lavorazioni plastiche, sia a caldo che a freddo; tuttavia qualche difficoltà si ha nella trafilatura, per cui non è molto adatto per la realizzazione di fili sottili.

29

Materiali conduttori

Quando il conduttore è attraversato da una corrente I , uniformemente distribuita nella sua sezione, dissipa sotto forma di calore (effetto Joule) una potenza data da:

$$P_{Joule} = RI^2 [W]$$

e si scalda di conseguenza raggiungendo temperature tanto più elevate, quanto più alta è la corrente. Si definisce densità di corrente il rapporto tra la corrente e la sezione del conduttore:

$$J = I/A [A/m^2]$$

Le perdite per effetto Joule in un conduttore possono quindi essere espresse come:

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

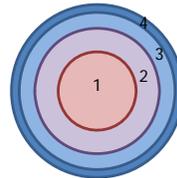
Questa espressione è analoga a quella delle perdite che si verificano in un materiale ferromagnetico. I valori di B per i materiali ferromagnetici e di J per i materiali conduttori assumono quindi il significato di indici di sfruttamento dei materiali: maggiore è il loro valore, maggiori sono le perdite nei materiali.

30

Materiali conduttori: effetto pelle

Quando la corrente è alternata o comunque variabile nel tempo, la distribuzione di corrente all'interno del conduttore non è più uniforme, ma tende ad addensarsi sulla sua superficie esterna dando luogo al cosiddetto "effetto pelle".

Per comprendere questo fenomeno, si pensi di suddividere idealmente la sezione del conduttore in un certo numero di strati concentrici di uguale area, in modo che ciascuno strato presenti la stessa resistenza per unità di lunghezza:



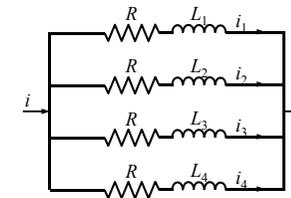
In presenza di corrente elettrica, dentro e fuori dal conduttore si genera un campo di induzione magnetica, le cui linee (circolari, centrate rispetto al conduttore e giacenti in piani ortogonali al conduttore stesso) concatenano in misura diversa i diversi strati concentrici.

31

Materiali conduttori: effetto pelle

Gli strati più interni sono quindi circondati da un numero maggiore di linee di campo magnetico rispetto agli strati più esterni.

Poiché l'induttanza è definita come il rapporto tra il flusso auto-concatenato e la corrente che circola nel conduttore, si può quindi affermare, in modo qualitativo, che gli strati più interni sono caratterizzati da una induttanza maggiore rispetto agli strati più esterni.



$$L = \frac{\Psi}{i}$$

$$L_1 > L_2 > L_3 > L_4$$

Quando il conduttore è attraversato da una corrente costante nel tempo, il ruolo delle induttanze è nullo, la corrente tra gli strati viene ripartita in ragione inversa delle resistenze e la distribuzione di corrente risulta uniforme.

32

Materiali conduttori: effetto pelle

Se la corrente che percorre il conduttore è alternata sinusoidale di pulsazione $\omega = 2\pi f$, la corrente si ripartisce nei vari strati in ragione inversa rispetto alle singole impedenze $R + j\omega L_i$.

A causa del diverso valore della parte induttiva delle impedenze dei diversi strati, la corrente tende ad addensarsi verso la parte più esterna del conduttore.

La disuniformità di distribuzione si accentua al crescere della frequenza della corrente (perché aumenta ω): di conseguenza, la resistenza apparente e le perdite del conduttore per effetto Joule aumentano.

Infatti, si può ritenere che, a causa dell'addensamento superficiale della corrente, non tutta la sezione del conduttore venga utilizzata per il passaggio della corrente e quindi, nella formula che definisce la resistenza, l'area utile A risulta ridotta rispetto all'area geometrica.

33

Materiali conduttori: effetto pelle

È possibile dimostrare che, alla frequenza di 50 Hz, le conseguenze dell'effetto pelle :

- sono molto piccole nei conduttori di piccola sezione e possono quindi, in genere, essere trascurate.
- sono invece importanti per i conduttori di sezione maggiore, quali quelli utilizzati in grosse macchine elettriche o in cavi per il trasporto di grandi potenze.

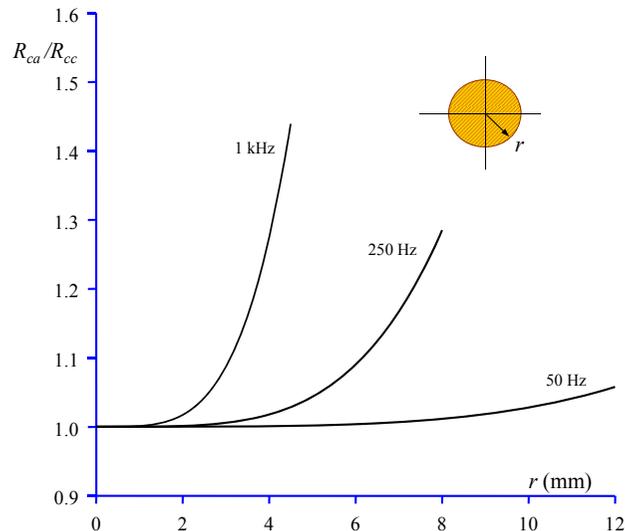
Per ridurre le conseguenze dell'effetto pelle in conduttori di grande sezione, conviene suddividere il conduttore stesso in tanti conduttori (tutti in parallelo), di piccola sezione, isolati fra di loro.

Bisogna comunque tener presente che l'effetto pelle assume importanza fondamentale in alta frequenza (>50 Hz), come illustrato nel grafico seguente.



34

Rapporto R_{ca} / R_{cc} in un conduttore di rame



35