

MATERIALI PER LE MACCHINE ELETTRICHE

Materiali passivi

Si tratta dei *materiali che costituiscono le parti strutturali* della macchina, in particolare la carcassa, che sostiene e protegge le parti attive della macchina. È costruita generalmente in ferro e si può ritenere che non sia interessata, se non marginalmente, dai flussi magnetici e dai relativi fenomeni di perdita. La forma della carcassa può essere predisposta per realizzare il raffreddamento o convogliare opportunamente i flussi di refrigerante.

Materiali attivi

Intervengono direttamente nel meccanismo di funzionamento della macchina. Si possono classificare come segue:

MATERIALI CONDUTTORI:	<i>circuiti elettrici</i>
MATERIALI FERROMAGNETICI:	<i>circuiti magnetici</i>
MATERIALI ISOLANTI:	<i>isolanti</i>
MATERIALI SEMICONDUCTORI:	<i>circuiti elettronici di potenza</i>

I materiali semiconduttori di norma sono importanti soprattutto perché fanno parte integrante dei moderni sistemi di alimentazione con convertitori statici. Esistono tuttavia alcuni motori di recente costruzione in cui le conversioni richieste possono essere realizzate direttamente all'interno della macchina, che contiene pertanto circuiti con transistor o altri semiconduttori di potenza. La trattazione delle loro caratteristiche è svolta in dettaglio nel corso di Elettronica di potenza.

Nel seguito verranno affrontati sinteticamente alcuni temi relativi agli altri tipi di materiali indicati.

Materiali conduttori

Costituiscono gli avvolgimenti della macchina e sono quasi esclusivamente fabbricati in rame (Cu) ad elevata purezza, preferito per l'elevata conducibilità (bassa resistività), la duttilità e la resistenza alla corrosione. L'unica alternativa, sia pure per usi limitati, è costituita dall'alluminio (Al).

Resistività del rame: $\rho_{Cu} = 0,017 \mu\Omega m$

Resistività dell'alluminio: $\rho_{Al} = 0,028 \mu\Omega m$

Ai fini della valutazione delle perdite è importante ricordare che nei metalli la resistività varia con la temperatura. In particolare, noto il valore della resistività ρ_1 a una data temperatura θ_1 , la variazione di resistività è data dalla seguente espressione:

$$\rho_2 = \rho_1 \left(1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_{critica} + \theta_1} \right)$$

in cui $\theta_{critica}$ è la *temperatura critica*. Il suo valore per il rame è:
 $\theta_{criticaCu} = 234,5^{\circ}C$

Si può facilmente verificare che la variazione percentuale della resistività risulta pari a circa lo 0,4% per $^{\circ}C$, ossia pari al 20% per una variazione della temperatura di $50^{\circ}C$, piuttosto comune nel funzionamento delle macchine in diverse condizioni di carico. Si noti quindi la rilevanza di tale variazione, anche ricordando la relazione diretta di questo parametro con la *resistenza*

$R = \rho \frac{\ell}{A}$ in cui ℓ è la lunghezza e A la sezione del conduttore in esame.

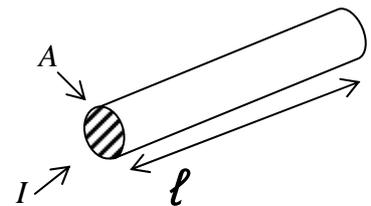
Perdite nei conduttori

La principale fonte di perdite nei conduttori è la dissipazione di energia per effetto Joule dovuta al passaggio di corrente. Si distinguono i casi in cui la corrente è continua, cioè costante nel tempo, e il caso in cui la corrente ha forma d'onda variabile, in particolare il caso di corrente alternata periodica.

Perdite in corrente continua (P_{cc}). Sono determinate dalla formula nota:

$$P_{cc} = RI^2 = \rho \frac{\ell}{A} (\delta A)^2 = \rho \delta^2 V \quad [W]$$

in cui δ è la densità di corrente e V il volume del conduttore. Si possono definire in altra forma



PERDITE SPECIFICHE PER UNITÀ DI VOLUME:

$$P_{Vcc} = \frac{P_{cc}}{V} = \rho \delta^2 \quad [W / m^3]$$

PERDITE SPECIFICHE PER UNITÀ DI MASSA:

$$P_{Mcc} = \frac{P_{Vcc}}{\gamma} = \frac{\rho \delta^2}{\gamma} \quad [W / Kg]$$

Valori tipici delle perdite nei conduttori di rame si deducono dai seguenti calcoli:

Resistività $\rho_{Cu} = 0,017 \mu\Omega m$, Densità di massa $\gamma_{Cu} = 8930 \text{ Kg}/m^3$, Densità tipica $\delta = 3 \text{ A}/mm^2$

$$P_{mCu} = 17,7 [W/kg]$$

Più in generale P_m è dell'ordine di qualche decina di W/kg .

Ricordando la relazione tra perdite, resistività e temperatura, vale ad esempio per un salto tipico di temperatura:

$$P_{mcc}(75^{\circ}C) = 1,2 \times P_{mcc}(20^{\circ}C)$$

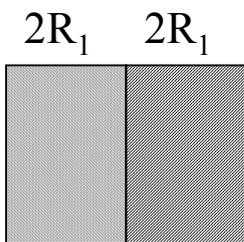
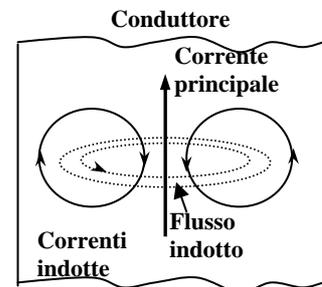
Perdite in corrente alternata (P_{ca}). Si manifestano nel caso, molto frequente per le macchine elettriche, di correnti in alternata, siano esse di forma sinusoidale o di forma qualunque purché periodica (ad es. per i motori alimentati da inverter). In questo caso l'espressione è basata sul valore della corrente efficace:

$$P_{cc} = R I_{eff}^2 \quad [W] \qquad I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Si verifica sperimentalmente che le perdite in c.a. sono **maggiori** di quelle in c.c. . La differenza è dovuta a una serie di fenomeni fisici non completamente modellizzabili e nel complesso si parla di **perdite addizionali**.

Queste ultime si possono in parte spiegare come conseguenza della disuniformità con cui la corrente risulta distribuita sulla sezione del conduttore.

A causa della circolazione di corrente alternata nel conduttore si generano flussi variabili su linee chiuse nel piano normale alla direzione della corrente. Questi ultimi inducono a loro volta f.e.m. secondo la legge dell'induzione lungo le linee chiuse che concatenano i flussi stessi. Trattandosi di linee su materiale conduttore sono indotte correnti circolanti nella direzione opposta a quelle che hanno generato i flussi. L'effetto complessivo è una redistribuzione della densità di corrente che risulta generalmente aumentata sulla periferia e ridotta al centro della sezione (*effetto pelle*).



Una semplice verifica del fatto che la distribuzione disuniforme di corrente produce perdite più elevate è illustrata dal seguente esempio. Si consideri un conduttore di resistenza complessiva R_1 , in cui la corrente I si distribuisce come indicato in figura, in modo tale che essa risulta addensata su una metà del conduttore, e rarefatta sull'altra metà. Il parametro α , compreso fra 0 e 1, è un indice della disuniformità (per $\alpha=0$ la distribuzione è uniforme). E' facile verificare che le perdite per effetto joule sono date dall'espressione:

$$P = R I^2 (1 + \alpha^2) \geq R I^2$$

La dipendenza delle perdite addizionali dalle variabili e dai parametri elettrici può essere valutata come segue:

- flusso indotto nel conduttore $\varphi = \varphi(\mu_0, I)$
- f.e.m. indotta $e = d\varphi/dt = e(\mu_0, I, f)$
- caso di corrente sinusoidale $E \equiv \mu_0 I f$
- correnti indotte $i \equiv \mu_0 I f / \rho$
- **perdite addizionali** $P_{add} = R i^2 \equiv \mu_0^2 I^2 f^2 / \rho$

Le perdite addizionali dipendono quindi dal quadrato della corrente, come le normali perdite per effetto Joule, tuttavia dipendono dalla resistività del conduttore in maniera inversa. In particolare esse diminuiscono al crescere della temperatura. Anche se il meccanismo di generazione di queste perdite è diverso da quello delle normali perdite in c.c., risulta utile

attribuire queste perdite alla presenza di una *resistenza addizionale*, da aggiungere cioè al valore della resistenza misurata in continua, per rendere conto dell'aumento di perdite in alternata.

$$R_{c.a.} = R_{c.c.} + R_{add}$$

La componente R_{add} non può essere trattata esattamente come R_{cc} e in particolare si può notare che essa diminuisce al crescere della temperatura (per la dipendenza inversa da \square delle relative perdite).

In pratica, nelle misure di laboratorio, si ricava un valore complessivo delle perdite in alternata. Dal confronto con il corrispondente valore delle perdite in continua si può dedurre per differenza il valore della resistenza addizionale. Qualora fosse necessario riportare i valori delle perdite ad una diversa temperatura, questa operazione deve essere svolta separando le due componenti.

Si osservi che il fenomeno delle perdite addizionali è più complesso di quanto descritto dalla semplice schematizzazione ora fatta, anche se questa ipotesi spiega sufficientemente ai fini pratici il loro comportamento ed è utile per la loro valutazione. In particolare causa delle correnti e delle perdite addizionali è anche la presenza sui conduttori di campi elettromagnetici diversi da quelli indotti dal passaggio interno della corrente.

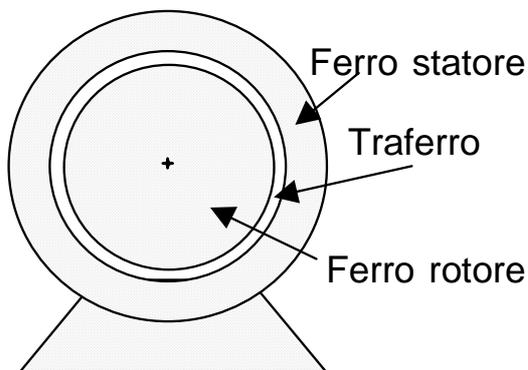
Materiali magnetici

Costituiscono la struttura al cui interno si manifestano i fenomeni di interazione dei campi elettromagnetici e di conseguenza le trasformazioni e gli scambi di energia su cui si basa il funzionamento delle macchine.

Sono caratterizzati dalla *permeabilità magnetica* μ misurata in [H/m].

Ai fini dello studio delle macchine elettriche si distinguono i materiali ferromagnetici (ferro e leghe a base di ferro) da quelli che non lo sono. Questi ultimi hanno tutti una permeabilità molto bassa, che in pratica viene sempre assimilata a quella del vuoto:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]}$$



in questa categoria rientra in particolare l'aria, che occupa il *traferro*, cioè lo spazio vuoto che separa nelle macchine rotanti il ferro dello statore da quello del rotore.

La permeabilità del vuoto μ_0 è un *parametro costante*, e stabilisce pertanto relazioni lineari tra l'induzione magnetica B e l'intensità del campo magnetico H .

$$B = \mu_0 H$$

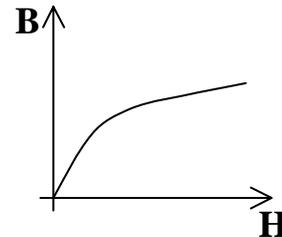
Al contrario la parte del nucleo realizzata in ferro o leghe di ferro presenta un valore di permeabilità molto più elevato e definito da un termine di permeabilità relativa μ_r :

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

Valori tipici della permeabilità relativa dei materiali ferromagnetici sono nell'ordine delle migliaia e decine di migliaia:

$$\mu_r = 10^3 \div 10^4$$

Inoltre i materiali ferromagnetici presentano il fenomeno della saturazione, che si riflette nella dipendenza di μ dall'intensità H secondo un tipico andamento nonlineare.



$$\mu_{Fe} = \mu_{Fe}(H)$$

La permeabilità del ferro pertanto deve essere definita in funzione del punto di lavoro.

L'elevata permeabilità del ferro determina elevati valori di *permeanza* (bassi valori di *riluttanza*): di conseguenza in un circuito magnetico in cui sia presente una sezione in ferro, le linee di flusso saranno confinate generalmente al suo interno. Per questo motivo anche le parti strutturali della macchina sono spesso costruite in materiale ferromagnetico (carcassa, supporti) in modo da contenere e limitare comunque i flussi dispersi in aria e pertanto non utili ai fini della trasformazione energetica.

Lo studio dei materiali magnetici viene qui limitato a due temi:

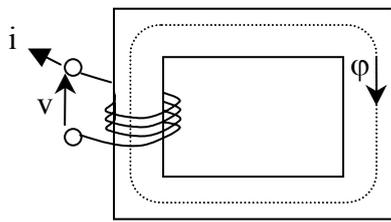
- *calcolo dell'energia necessaria per sostenere un determinato flusso in un circuito magnetico;*
- *calcolo delle perdite presenti nei circuiti magnetici.*

Energia necessaria per sostenere un flusso in un circuito magnetico

La trasformazione e lo scambio di energia nelle macchine dipende dal loro livello di magnetizzazione. Per stabilire un flusso in una macchina costituita da materiali magneticamente non ideali (cioè con permeabilità non infinita) si deve spendere un'energia adeguata, che dipende dal tipo di materiali e dalla costruzione del circuito magnetico. In linea di principio l'energia spesa è funzione del livello di flusso richiesto. Quest'ultimo deve essere quello massimo ottenibile senza entrare nella regione di saturazione del circuito magnetico (comprendente ferro e traferro), dove piccoli incrementi di flusso si ottengono a spese di incrementi elevati di forza magnetomotrice, cioè di corrente magnetizzante.

Un parametro che caratterizza da questo punto di vista il funzionamento delle macchine elettriche è l'induzione magnetica B espressa in *tesla* [T] o *weber per metro quadrato* [Wb/m²]. Valori tipici di magnetizzazione sono, per i normali circuiti magnetici, intorno ad 1 T.

L'energia di magnetizzazione si può valutare con riferimento ad un circuito magnetico, alimentato da una bobina a N spire, a partire dall'energia specifica per unità di volume e riferita ad un dato materiale, di cui sia nota la curva di permeabilità:



Calcolo per un circuito magnetico elementare alimentato con N spire. Si suppone trascurabile la resistenza della bobina ($R=0$). Risulta allora:

$$v = e = \frac{d\varphi_c}{dt} = N \frac{d\varphi}{dt}$$

in cui φ è il flusso e φ_c il flusso concatenato con la bobina. L'energia infinitesima dE vale:

$$dE = v i dt = N i d\varphi$$

L'energia specifica per volume ($V=\ell A$, con ℓ lunghezza media e A sezione media del nucleo)

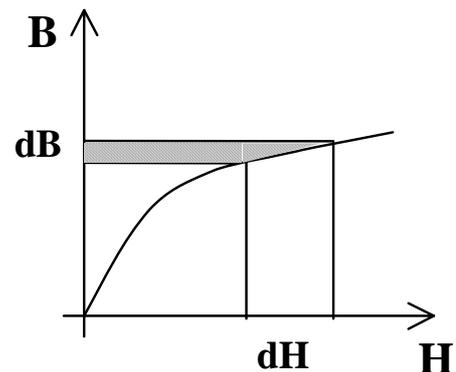
$$dE_{spv} = dE/(\ell A) = (N i/\ell)(d\varphi/A) = H dB \text{ [J/m}^3\text{]}$$

L'energia specifica per raggiungere un valore di induzione \bar{B} si esprime:

$$E_{sp} = \int_0^{\bar{B}} H dB = \int_0^{\bar{H}} \mu H dH$$

Per μ costante (es. μ_0 in aria)

$$E_{sp} = \int_0^{\bar{H}} \mu H dH = \frac{1}{2} \mu \bar{H}^2 = \frac{1}{2} \bar{B} \bar{H} = \frac{1}{2} \frac{\bar{B}^2}{\mu}$$



L'energia necessaria per magnetizzare un circuito magnetico, caratterizzato da una determinata geometria, un volume e un materiale di permeabilità μ costante risulta:

$$E = \frac{1}{2} BH \cdot (A \cdot \ell) = \frac{1}{2} (BA)(H \ell) = \frac{1}{2} \varphi M = \frac{1}{2} \Lambda M^2 = \frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{\Lambda} = \frac{1}{2} Li^2$$

dove si è utilizzata l'espressione che lega la permeanza al flusso e alla forza magnetomotrice:

$$\Lambda = \frac{\mu A}{\ell} = \frac{\varphi}{M}$$

Valori tipici dell'energia specifica

- in aria
 $B = 1 \text{ Wb/m}^2$, $\mu = \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$

$$E_{sp} \approx 400.000 \text{ J/m}^3 = 400.000/3.600 = 110 \text{ Wh/m}^3$$

- in ferro

$$B = 1 \text{ Wb/m}^2, \mu = 5 \cdot 10^3 \mu_0$$

$$E_{sp} \approx 22 \cdot 10^{-3} \text{ Wh/m}^3$$

Perdite nei materiali ferromagnetici

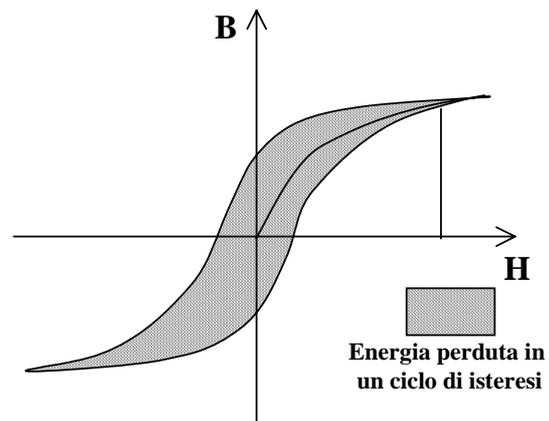
Sono essenzialmente di due tipi: *perdite per isteresi* e *perdite per correnti parassite*.

Perdite per isteresi. Il ciclo di isteresi proprio di un materiale magnetico definisce l'energia resa e accumulata in un ciclo di lavoro; quando cioè l'intensità del campo magnetico assume valori crescenti e quindi decrescenti secondo un ciclo periodico alternato. Questo si verifica in pratica quando il materiale è sottoposto alla magnetizzazione prodotta da una corrente alternata. Il ciclo di isteresi dipende dal materiale interessato e dal livello massimo dell'induzione. L'energia contenuta all'interno dell'area definita dal ciclo di isteresi sul grafico B-H rappresenta le perdite per ogni ciclo; quindi la potenza perduta è proporzionale alla frequenza di alimentazione.

Si possono esprimere le perdite per isteresi con una formula empirica:

$$P_{ist} = \alpha B_M^n f \text{ [W/kg]}$$

In cui α dipende dal materiale e n è il coefficiente di Steinmetz (1,6 ÷ 2)



Perdite per correnti parassite. Una sezione di materiale magnetico percorso da un flusso alternato è interessato da *correnti circolanti che si oppongono al flusso e determinano ulteriori perdite*. Valgono considerazioni analoghe a quelle già svolte a proposito delle perdite addizionali nei conduttori, con la differenza che in questo caso il materiale in cui si manifestano le perdite, il ferro del nucleo, ha una resistività più elevata, ma offre al tempo stesso un maggiore volume allo svolgersi di queste correnti dette *parassite*. La loro espressione analitica è simile a quella già vista per le addizionali:

$$P_{c.par} = \alpha_l B^2 f^2 \delta^3 / \rho$$

Il calcolo delle perdite per correnti parassite può essere definito con riferimento a un nucleo di ferro di forma regolare (v. figura) e nell'ipotesi che le correnti indotte dal flusso entrante nel materiale seguano il percorso indicato

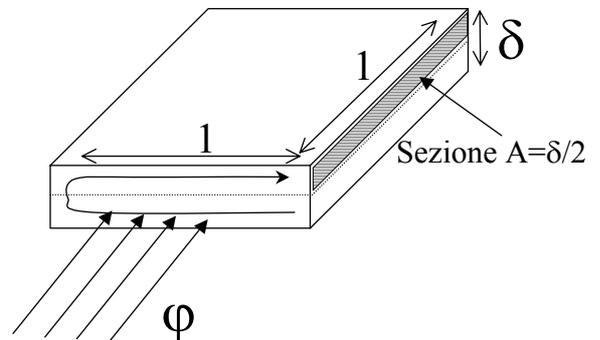
$$E = \omega \Phi = \omega B \delta$$

$$R = \rho \frac{1}{1 \cdot \frac{\delta}{2}} + \rho \frac{1}{1 \cdot \frac{\delta}{2}} = \frac{4\rho}{\delta}$$

$$P_{cp} = \frac{E^2}{R} = \frac{\omega^2 B^2 \delta^3}{4\rho} \quad [W]$$

$$P_{cspvolum} = \frac{P_{cp}}{V} = \frac{\omega^2 B^2 \delta^2}{4\rho} \quad [W / m^3]$$

$$P_{cspmassa} = \frac{P_{cp}}{V\gamma} = \frac{\omega^2 B^2 \delta^2}{4\rho\gamma} \quad [W / kg]$$



I calcoli sono stati svolti considerando l'ipotesi di grandezze alternate sinusoidale di pulsazione ω ed esprimendo le perdite in funzione della tensione E .

Si nota, oltre alla dipendenza inversa dalla resistività, anche quella diretta dallo spessore del nucleo.

I metodi per ridurre le perdite sono quindi basati:

- sulla scelta di materiali di spessore molto ridotto, *lamine*, che vengono sovrapposte per formare un nucleo delle dimensioni necessarie. La laminazione avviene parallelamente alla direzione del flusso e gli spessori sono dell'ordine di 0,3 mm per i trasformatori e 0,35-0,5 mm per le macchine rotanti. Le lamine vengono isolate tra loro interponendo un sottile strato di materiale isolante o più spesso ricoprendole con una vernice isolante.
- sull'aumento della resistività del materiale ottenuta con l'aggiunta di Silicio

La presenza di materiale isolante tra le lamine riduce la sezione netta in ferro del nucleo magnetico, introducendo il cosiddetto **coefficiente di stipamento**, definito come:

$$K_{stipamento} = \frac{\text{Sez. netta Fe}}{\text{Sez. lorda}} = 0,85 \div 0,93$$

di cui si deve tenere conto ai fini dei calcoli dell'induzione, delle perdite e dell'energia di magnetizzazione.

Laminazione. Le lamiere necessarie per la costruzione delle macchine elettriche, a base di ferro, vengono costruite secondo diversi criteri, in gran parte legati alla riduzione delle perdite e alla funzionalità meccanica, sia scegliendo leghe con il tenore di silicio più adeguato, sia utilizzando un corretto metodo di fabbricazione.

Una percentuale di silicio del 4% aumenta la resistività di 4-5 volte, riducendo di circa la metà le perdite per isteresi, e aumenta la permeabilità massima del materiale. Tenori di silicio superiori al 5%, pur riducendo ulteriormente le perdite, non sono accettabili perché rendono la lamiera troppo fragile.

I processi industriali di laminazione sono di due tipi fondamentali.

La **laminazione a caldo** viene utilizzata per la produzione delle normali lamiere utilizzate per la costruzione delle macchine rotanti. Si producono lamine di spessori variabili da 0,35 mm a qualche millimetro (tipicamente **0,35-0,5 mm**) con **tenore di silicio dell'ordine del 2-4%**. In queste lamiere il rapporto tra perdite per isteresi e perdite per correnti parassite è nella percentuale $P_{ist} - P_{c.par}$ 70% - 30%.

La **laminazione a freddo** consente la produzione di lamine a *cristalli orientati*, in cui cioè i domini magnetici mantengono una direzione preferenziale lungo la quale la permeabilità al passaggio del flusso risulta molto superiore a quella che si manifesta per una direzione del flusso normale (circa 20 volte superiore). In questo caso la materia prima per la produzione delle lamine non può essere riscaldata prima di essere introdotta nei laminatoi, come avviene nel processo a caldo, per impedire che il calore introduca un fattore di disordine nella disposizione dei domini magnetici. Il processo risulta più complesso e costoso, in quanto richiede apparecchiature più potenti e precise e anche la successiva fase di assemblaggio dei nuclei richiede maggiore attenzione per assicurare che le lamine siano sempre disposte con i cristalli orientati nella stessa direzione del flusso principale. Si realizzano in questo caso lamine di **spessori inferiori (da 0,2 a 0,35 mm)**, con **tenori di silicio del 4%** e una distribuzione $P_{ist} - P_{c.par}$ 50% - 50%. Tutte le caratteristiche ora descritte servono per ottimizzare il rendimento di questi nuclei, che **vengono utilizzati principalmente per la costruzione di trasformatori di potenza**, e per i quali il maggiore costo di produzione viene ampiamente compensato dai ridotti costi di esercizio, dal momento che da queste macchine si possono ottenere rendimenti che raggiungono e superano il 99%.

Cifra di perdita. Per tenere conto complessivamente delle perdite di un materiale magnetico si utilizza una *cifra di perdita* che riassume le diverse componenti di perdita ora descritte. È definita come la perdita specifica di massa [W/kg] di un materiale sollecitato a una induzione massima di 1 T alla frequenza di lavoro (usualmente 50 o 60 Hz).

Nota la cifra di perdita si può estrapolare il valore delle perdite nel caso di valori diversi dell'induzione, tenendo conto che le perdite complessivamente variano quadraticamente con l'induzione magnetica **B**.

La tabella seguente riporta alcuni valori tipici delle cifre di perdita.

Tipo di lamiera	% Si	Spessore [mm]	Cifra di perdita [W/kg]
Laminatura A Caldo	1 ÷ 1,5	0,5	5 ÷ 2
	2 ÷ 2,5	0,5 ÷ 0,35	2 ÷ 1,5
	3,5	0,35	1,3 ÷ 1

Laminatura A Freddo	4÷4,5	0,35 0,30 0,28	0,6 ÷ 0,8 0,4 ÷ 0,6 0,35 ÷ 0,5
---------------------------	-------	----------------------	--------------------------------------

Materiali isolanti

L'isolamento dei conduttori della macchina è un fattore determinante per stabilirne le condizioni di impiego e la durata. A differenza di quanto avviene per conduttori e materiali magnetici le perdite negli isolanti costituiscono una frazione minima delle perdite totali (ordine dei mW/kg). Le proprietà in base a cui sono classificati sono la *rigidità dielettrica* e la *stabilità termica*.

La rigidità dielettrica è il massimo gradiente di tensione sopportabile senza che avvenga una scarica elettrica e si misura in [kV/mm]. Per isolanti solidi la scarica provoca danni irreversibili, mentre per gli isolanti fluidi dopo un periodo di tempo si ripristina la capacità isolante.

Si parla di **rigidità di massa** quando la sollecitazione interessa lo spessore del materiale. Valori tipici sono:

- a. aria 2 kV/mm
- b. carta non impregnata 10 kV/mm
- c. olio 20 kV/mm
- d. mica e derivati 60 kV/mm

La **rigidità superficiale** si riferisce a campi elettrici tra punti di una superficie. Valori tipici sono:

- e. aria 0,5 kV/mm
- f. olio 2 kV/mm

Stabilità termica. È l'attitudine del materiale a sopportare alte temperature senza deteriorarsi. Al crescere della temperatura si riduce il **tempo medio probabile** impiegato da un materiale per divenire incapace di sostenere sollecitazioni meccaniche e dielettriche. La dipendenza dalla temperatura è esponenziale:

$$t_{mp1}/t_{mp2} = e^{m(\theta_2 - \theta_1)}$$

il valore di m è tale che il t_{mp} dimezza per un $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$

Gli isolanti svolgono un ruolo fondamentale nel funzionamento della macchina, tanto che dalla loro durata dipende direttamente la durata di vita della macchina. Valori tipici di vita presunta degli isolanti e delle macchine sono di 20) 30 anni per le macchine impiegate in applicazioni industriali.

La durata degli isolanti e delle macchine sono anche in stretta relazione con la loro applicazione. Ad es. per applicazioni in cui ci si attende dal motore una vita relativamente breve (come può accadere nel settore aeronautico o elettronico) anche gli isolanti sono scelti

in maniera conseguente, di modo che i tempi di vita attesi possono scendere fino a 500)1000 ore.

Classi di isolanti. Considerata l'importanza degli isolanti per la vita delle macchine elettriche, la normativa regola il loro impiego stabilendo una serie di classi di impiego. In particolare le norme CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) stabiliscono ufficialmente una suddivisione dei materiali in base alla loro stabilità termica, cioè alla temperatura a cui il materiale può resistere indefinitamente senza deterioramenti

CLASSE	MATERIALE	TEMPERAT. MASSIMA [°C]
O (Y)	Composti a base di cellulosa non impregnata	90
A	Composti a base di cellulosa impregnata	105
E	Laminati plastici, smalti sintetici	120
B	Fibre di vetro, amianto, agglomerato di mica	130
F	Materiali di classe B impregnati in resina epossidica	155
H	Materiali di classe B impregnati in resine siliconiche	180
C	Ceramiche, porcellane, ecc.	> 180