

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA
Dipartimento di Ingegneria
Contrada Di Dio I, 98166 – Villaggio S. Agata Messina

Appunti Corso di Elettrotecnica

Correnti Vorticose nei Conduttori Massicci

Anno Accademico 2023-2024

prof. ing. Bruno Azzerboni

Fonti:

Lezioni di Elettrotecnica Generale - Giulio Battistini

Colombo Corsi Pisa

Elettrotecnica - Giulio Battistini – Franco Nencioni

Le Monnier 1984

https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_pelle

Equazioni di Maxwell

Ricapitoliamo ora le equazioni di Maxwell:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q_{interne}}{\epsilon_0} & \text{Teorema di Gauss per il campo elettrico} \quad (1) \\ \oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi(\vec{B})}{dt} & \text{Legge di Farady – Newmann} \quad (2) \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 & \text{Teorema di Gauss per il campo magnetico} \quad (3) \\ \oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_1^n I_{conc} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi(\vec{E})}{dt} & \text{Legge o Teorema di Ampere – Maxwell} \quad (4) \end{array} \right.$$

Queste equazioni, chiaramente, le possiamo anche scrivere nella seguente forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q_{interne}}{\epsilon_0} & \text{Teorema di Gauss per il campo elettrico (L'origine di } \vec{E} \text{ sono le cariche elettriche)} \\ \oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi(\vec{B})}{dt} & \text{Legge di Farady – Newmann (} \vec{E} \text{ è creato anche da } \vec{B}(t)) \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 & \text{Teorema di Gauss per il campo magnetico (Non esistono cariche magnetiche)} \\ \oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_1^n I_{conc} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi(\vec{E})}{dt} & \text{Legge o Teorema di Ampere – Maxwell} \\ & \text{(L'origine di } \vec{B} \text{ sono sia le correnti, sia } \vec{E}(t)) \end{array} \right.$$

Effetti prodotti dalle correnti vorticosi

I fenomeni prodotti da un campo magnetico variabile che agisce nell'interno di una massa metallica, costituiscono un oggetto di studio di fondamentale interesse per la vastità e l'importanza delle conseguenze e delle applicazioni a cui danno luogo nella tecnica.

Sotto l'aspetto qualitativo, tali fenomeni hanno un'origine estremamente semplice. Allorché un campo magnetico variabile nel tempo $^1 \vec{H}(t)$ agisce nell'interno di un conduttore massiccio (fig. 1), attorno alle sue linee di forza si genera

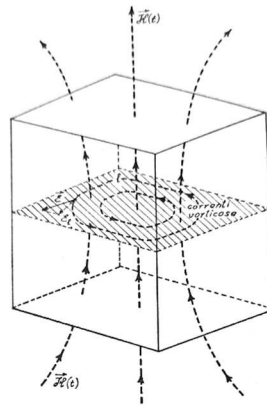


Fig. 1 – Le correnti vorticosi

un campo elettrodinamico \vec{E} che, in virtù della seconda equazione di Maxwell, quando μ è costante, è legato ad \vec{H} dalla relazione

$$\oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi(\vec{B})}{dt} = -\mu \oint_\gamma \frac{\partial \mathcal{H}_n}{\partial t} dy$$

¹ È ovvio che tutte le considerazioni che svolgeremo sugli effetti prodotti dalla variazione di \vec{H} nel tempo, sono valide anche quando \vec{H} è costante e si verifica un moto relativo fra esso e la massa metallica.

Il campo \vec{E} agisce sulle cariche elettriche di conduzione del metallo, le quali si mettono in moto dando luogo a correnti elettriche che circolano lungo gli infiniti circuiti esistenti nell'interno della massa metallica. Tali correnti, di intensità variabile nel tempo, vengono chiamate *correnti vorticosse o correnti di Foucault*.

L'intensità delle correnti vorticosse che vengono generate nella massa metallica è ovviamente funzione dell'entità della variazione del campo magnetico e della rapidità con cui questa ha luogo, della resistività elettrica ρ del materiale e delle permeabilità magnetiche del metallo e del mezzo ad esso circostante.

Quando l'andamento nel tempo del campo magnetico ha carattere sinusoidale, se il metallo ha permeabilità μ costante, le correnti vorticosse variano nel tempo con forma d'onda anch'essa sinusoidale.

Come ogni altra corrente elettrica, le correnti vorticosse che si stabiliscono nell'interno d'una massa metallica, producono un campo magnetico, il quale reagisce sul campo inducente, componendosi con esso e dando luogo ad un campo risultante che, in definitiva, è quello che effettivamente agisce nel metallo e genera le correnti vorticosse stesse.

Generalmente la reazione magnetica delle correnti vorticosse è tale da produrre l'effetto di attenuare gradualmente l'intensità del campo magnetico, via via che dagli strati più esterni si procede verso gli strati più interni del metallo (*effetto smagnetizzante delle correnti vorticosse*). Normalmente quindi, l'azione delle correnti vorticosse tende a contrastare la penetrazione del campo magnetico nell'interno della massa metallica ed a confinarlo negli strati periferici.

Le correnti vorticosse reagiscono sul campo che le produce, anche mediante un'azione ponderomotrice² che manifesta i suoi effetti tutte le volte che il sistema è tale da consentirlo.

Tale azione può manifestarsi, a seconda dei casi, sotto l'aspetto di una sollecitazione motrice oppure frenante.

Consideriamo, ad esempio, un disco metallico ruotante attraverso le espansioni polari di un magnete, con velocità angolare costante ω (fig.2).

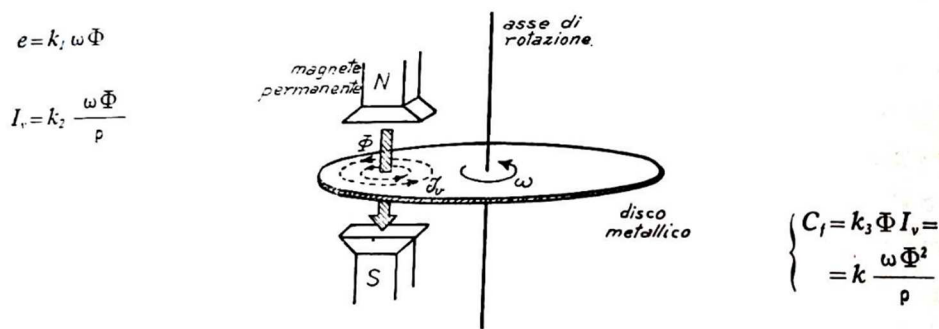


Fig. 2 – Principio di funzionamento del freno elettromagnetico a disco

Se Φ è il flusso magnetico globale che attraversa il disco, le f. e. m. che vengono generate nella massa metallica in virtù del moto relativo fra essa ed il flusso Φ , hanno ovviamente un'intensità proporzionale a Φ ed a ω :

$$E = k_1 \Phi \omega$$

Le correnti vorticosse prodotte hanno intensità I proporzionale alle f. e. m. ed inversamente proporzionale alla resistività ρ del metallo:

$$I_v = \frac{E}{\rho} = k_2 \frac{\omega \Phi}{\rho}$$

E poiché l'interazione ponderomotrice fra un flusso magnetico ed una corrente elettrica è proporzionale al prodotto dell'intensità delle due grandezze, si deduce in definitiva che la reazione ponderomotrice delle correnti vorticosse sul flusso che le genera, si manifesta in questo caso sottoforma di una coppia d'intensità:

$$C_f = \Phi * I_v = \Phi * k_2 \frac{\omega \Phi}{\rho} = k \frac{\omega \Phi^2}{\rho}$$

² Forza ponderomotrice: locuzione, introdotta inizialmente nell'elettrotecnica per distinguere le vere e proprie forze elettriche, cioè quelle mutuamente esercitate da cariche elettriche (o da cariche su corpi elettrizzabili: vedasi dielettrico), dalle forze elettromotrici, che non sono forze (si tratta infatti di energie a unità di carica); l'uso si estese poi al magnetismo e all'elettromagnetismo per indicare le azioni tra magneti, tra magneti e circuiti percorsi da corrente elettrica e tra circuiti (anche qui per distinguere dalle forze magnetomotrici, che non sono forze) e all'intera meccanica, come equivalente di forza vera e in contrapposizione a forza apparente (per es., le forze apparenti dei moti relativi). Attualmente tale qualifica appare superflua e in conseguenza tende a uscire dall'uso.

dove la costante k tiene conto di tutti i parametri del sistema che erano stati compresi nelle costanti k_1 e k_2 . Infine, poiché tale reazione, in virtù della legge di Lenz, ha senso tale da opporsi alla causa che genera le correnti (che nel caso in esame è costituita dal moto relativo fra il flusso magnetico ed il metallo del disco), può concludersi che *la reazione ponderomotrice delle correnti vorticosi dà luogo ad una coppia frenante d'intensità proporzionale alla velocità angolare ed al quadrato del flusso ed inversamente proporzionale alla resistività del metallo.*

Il fenomeno della interazione ponderomotrice fra le correnti vorticosi ed il campo magnetico che le genera, come si è detto, è diffusamente utilizzata nelle applicazioni pratiche sia per produrre coppie frenanti (come nell'esempio citato), sia per produrre coppie motrici, ad esempio, per i contatori a induzione.

Unitamente ad un effetto magnetico, le correnti vorticosi danno luogo ovviamente anche ad un effetto termico. Esse assorbono energia, estraendola dal campo magnetico inducente nel caso che siano generate da un campo variabile nel tempo, oppure dall'organo motore nel caso che siano generate dal moto relativo fra campo magnetico e metallo, e la trasformano in calore per effetto Joule.

Si rileva pertanto che, sia per quanto concerne la reazione magnetica, sia per ciò che concerne l'effetto termico, *i circuiti vorticosi esistenti nella massa metallica si comportano, nei confronti del campo inducente, come spire indotte in corto circuito.*

Il fenomeno della produzione di calore da parte delle correnti vorticosi trova larga applicazione pratica nei *forni a induzione* (fig. 3), nei quali i metalli vengono portati ad alta temperatura, semplicemente sottoponendoli all'azione di un campo magnetico alternativo di opportune intensità e frequenza.

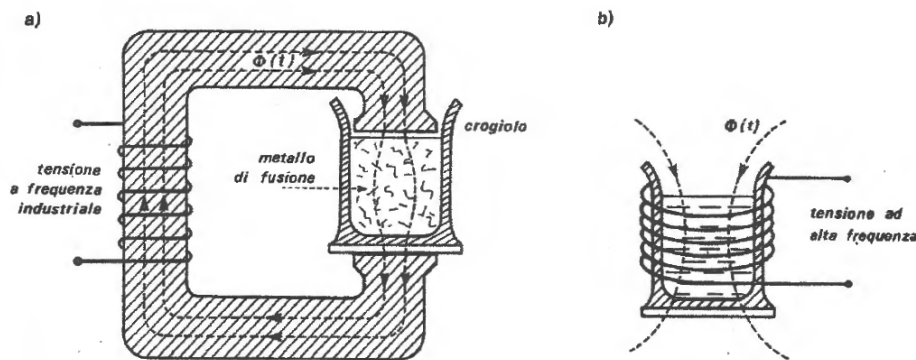


Fig. 3 – Schema di funzionamento dei forni elettrici ad induzione
a) Forno a frequenza industriale b) Forno ad alta frequenza

La proprietà, poi, delle correnti vorticosi di provocare una disuniformità nella distribuzione interna del campo magnetico, e quindi della loro stessa densità, è oggi diffusamente utilizzata per l'effettuazione dei trattamenti termici localizzati dei metalli.

In altri casi, invece, molto frequenti nella pratica, la produzione di calore da parte delle correnti vorticosi costituisce un fenomeno gravemente nocivo, che è necessario contenere nella misura più limitata possibile. Per tale ragione le correnti vorticosi in questo caso vengono anche denominate *correnti parassite* e la potenza da esse dissipata si chiama *perdita per correnti parassite* (P_{cp}).

Vedremo nel seguito quali accorgimenti costruttivi è necessario adottare, nella pratica, per limitare le perdite per correnti parassite.

I problemi connessi con la generazione di correnti vorticosi nell'interno delle masse metalliche, assumono nella pratica aspetti sensibilmente diversi a seconda delle condizioni nelle quali il fenomeno si verifica.

Per noi è di particolare interesse distinguere i due casi in cui:

- *le correnti vorticosi sono generate da un campo magnetico prodotto da una f. m. m. esterna*

oppure

- *sono prodotte dal campo magnetico generato da una corrente variabile che fluisce entro la massa metallica stessa.*

Il primo caso è quello caratteristico dei nuclei magnetici lungo i quali viene convogliato un flusso generato da una f. m. m. prodotta da un avvolgimento percorso da corrente; il secondo è quello relativo ai conduttori massicci percorsi da correnti variabili.

In quest'ultimo caso le correnti vorticosi in realtà non si producono, ma si manifestano solo attraverso i loro effetti. Infatti esse si compongono con la corrente inducente, dando luogo a fenomeni di disuniforme distribuzione della densità della corrente risultante nella sezione del conduttore.

E poiché, come vedremo, l'effetto delle correnti vorticosi è di tendere a far passare la corrente prevalentemente attraverso gli strati periferici del conduttore, il fenomeno viene comunemente indicato col nome di *effetto pellicolare*.

In definitiva, ricapitolando, gli effetti prodotti negli impianti tecnici dalle correnti vorticosi assumono aspetti sensibilmente diversi a seconda che:

- a) le correnti vorticosi siano generate da un campo magnetico prodotto da una f.m.m. applicata alla massa metallica dall'esterno;
- b) le correnti vorticosi siano generate dal campo magnetico prodotto da una corrente elettrica variabile che fluisce entro la massa metallica stessa.

I principali effetti prodotti dalle correnti vorticosi generate da una f.m.m. esterna applicata ad una massa metallica sono di tre tipi:

1. Un **effetto smagnetizzante** dovuto al campo magnetico generato dalle correnti vorticosi stesse, il quale, componendosi col campo magnetico induttore, generalmente produce l'effetto di attenuarne gradualmente l'intensità via via che dagli strati più esterni si procede verso gli strati più interni del metallo.
2. Un **effetto di interazione meccanica** fra le correnti vorticosi ed il campo esterno che le genera. Tale effetto, a seconda della configurazione del sistema, può manifestarsi sotto l'aspetto di una sollecitazione motrice, oppure frenante. Il fenomeno è diffusamente utilizzato nelle applicazioni pratiche, sia, coppie motrici, sia per produrre coppie frenanti.
3. Un **effetto termico**, che si manifesta col riscaldamento del corpo entro il quale le correnti vorticosi circolano.

Per limitare gli effetti nocivi delle correnti parassite, nella pratica si usano due accorgimenti: *l'aumento della resistività del materiale e la laminazione del ferro*.

L'aumento della resistività ρ può conseguirsi mediante idonee leghe del ferro con opportuni elementi che ne accrescono la resistività. È molto usato nella pratica il ferro al silicio (lega di ferro col 3 - 5% di silicio) col quale, ad esempio, si costruiscono normalmente i nuclei dei trasformatori statici.

La laminazione del ferro viene effettuata allo scopo di limitare il flusso che risulta concatenato con i circuiti delle correnti vorticosi.

Consideriamo infatti il nucleo massiccio della fig. 4a; in esso le correnti vorticosi risultano concatenate con il flusso $\Phi(t)$ relativo all'intera area della sezione del nucleo. Se adesso dividiamo in due parti la sezione del nucleo (fig. 4b) e le isoliamo fra loro, il flusso $\Phi(t)$ si svolge ugualmente nel suo circuito magnetico, ma le correnti vorticosi risultano concatenate con un flusso metà e quindi la loro intensità risulta molto inferiore a quella del caso precedente. Se poi la suddivisione, invece che in due parti, viene effettuata costituendo il nucleo di tante lamine di limitato spessore (fig. 4c), l'intensità delle correnti parassite viene evidentemente ridotta a valori molto bassi.

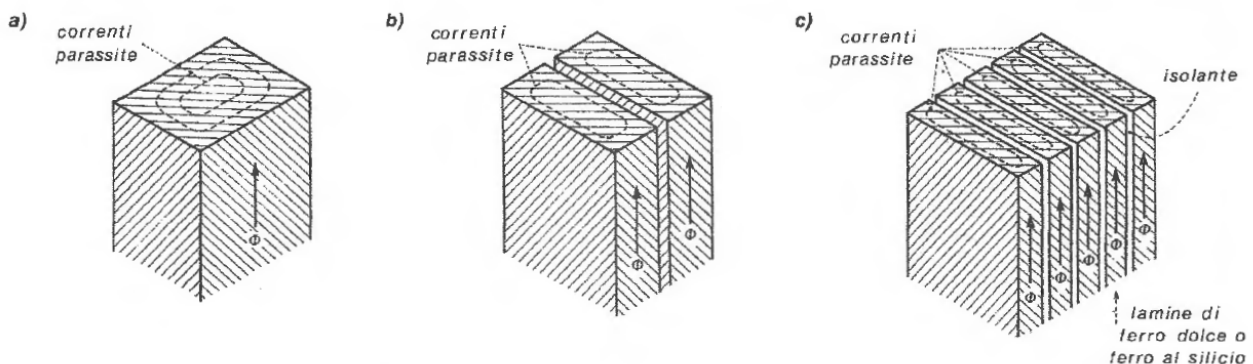


Fig. 4 – Laminazione del ferro

In generale, quindi, tutte le parti dei circuiti magnetici, soggette a flussi variabili nel tempo, vengono costituite da tante lamine isolate l'una dall'altra mediante sottili fogli di carta o strati di ossidi o di fosfati, le quali assicurano la continuità del materiale ferromagnetico nel senso del flusso ed invece tagliano la strada alle correnti vorticosse riducendone l'intensità. Lo spessore di tali lamine è normalmente di 3,5 - 5 decimi di mm.

Osserviamo, dunque, che un materiale ferromagnetico, sottoposto ad un campo magnetico alternativo, dà luogo a due tipi di dissipazione di potenza: il primo è costituito, come si sa, dalle *perdite per isteresi* P_i ; il secondo dalle *perdite per correnti parassite* P_{cp} .

Nella pratica si usa comunemente valutare le due perdite complessivamente, denominandole globalmente *perdite totali nel ferro* P_{Fe} :

$$P_{Fe} = P_i + P_{cp}$$

Le prove pratiche indicano che, a flusso costante, tali perdite sono funzione crescente della frequenza del campo alternativo e sono funzione pressoché quadratica del valore massimo della induzione alla quale è sottoposto il materiale. Le caratteristiche dissipative dei lamierini usati per la costruzione dei nuclei magnetici³ vengono usualmente sintetizzate in un numero detto *cifra di perdita* C_p .

Si dice comunemente cifra di perdita di un determinato tipo di lamiera, il numero di watt dissipati globalmente in 1 kg di materiale allorché è sottoposto ad un campo che varia con legge sinusoidale compiendo 50 cicli al secondo e di induzione massima 1 Wb/m^2 .

È da rilevare tuttavia che la cifra di perdita di un materiale è un parametro che ha un valore eminentemente indicativo; esso non consente una determinazione precisa delle perdite nel ferro, perché esse variano al variare del valore massimo della induzione e del numero dei cicli al secondo compiuti dal campo magnetizzante.

Effetto pellicolare nei conduttori cilindrici

Esaminiamo adesso gli effetti prodotti in un conduttore massiccio dal campo magnetico generato da una corrente variabile che fluisce nel conduttore stesso.

Consideriamo, ad esempio, un conduttore cilindrico rettilineo di notevole sezione (fig. 5), costituito di materiale omogeneo, situato in un mezzo omogeneo e isotropo, e supponiamo che sia percorso da una corrente $i(t)$ variabile nel tempo.

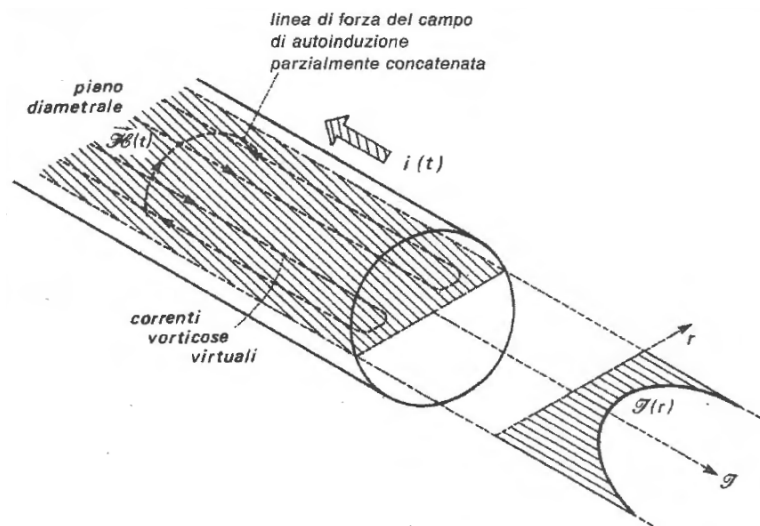


Fig. 5 – Effetto pellicolare in un conduttore cilindrico

³ Il ferro legato col silicio ha normalmente un ciclo di isteresi più «magro» del ferro dolce. Perciò i lamierini al silicio, oltre a minori perdite per correnti parassite, danno luogo anche a minori perdite per isteresi, rispetto ai lamierini di ferro dolce.

Per quanto si è visto in precedenza, le linee di forza del campo \vec{H} prodotto da i , interne ed esterne al conduttore, sono circonferenze concentriche giacenti su piani perpendicolari all'asse del conduttore. La variazione nel tempo del campo nell'interno del conduttore provoca le correnti vorticosi, le quali si richiudono su sé stesse come è indicato nella fig. 5.

Esse si compongono, punto per punto ed istante per istante, con la corrente principale $i(t)$, determinando una distribuzione della densità di corrente \mathcal{J}_r nella sezione del conduttore più concentrata negli strati più esterni e più rarefatta negli strati centrali, come è indicato nel diagramma della fig. 5.

La disuniformità della distribuzione della densità di corrente è tanto maggiore quanto più rapida è la variazione di $i(t)$; alle frequenze molto elevate la corrente fluisce solamente nella corteccia del conduttore e non penetra negli strati interni di esso⁴.

Effetto pelle

L'effetto pelle (in inglese skin effect) è la tendenza di una corrente elettrica alternata a distribuirsi in modo non uniforme all'interno di un conduttore: la sua densità è maggiore sulla superficie e inferiore all'interno. Questo comporta un aumento della resistenza elettrica del conduttore, particolarmente alle alte frequenze. In altre parole, una parte del conduttore non viene utilizzata ed è quindi come se non esistesse. Questo comporta una maggiore dissipazione di potenza, a parità di corrente applicata, o il passaggio di una minore corrente a parità di tensione applicata (legge di Ohm).

Il fenomeno venne spiegato, per la prima volta, da Lord Kelvin nel 1887; inoltre anche Nikola Tesla studiò il problema.

Viene chiamato "effetto pelle" perché, come la pelle protegge i tessuti sottostanti a essa, così il campo decade molto velocemente nello strato esterno del conduttore come se fosse presente uno strato di pelle, evitando che il campo interagisca con ciò che è interno al conduttore. L'analogia permette di comprendere il motivo per cui viene utilizzato per creare schermi elettromagnetici.

Da un punto di vista teorico la densità di corrente \mathcal{J} (la corrente che attraversa l'unità di superficie) in un conduttore decresce esponenzialmente man mano che dalla superficie esterna si penetra nel suo interno. Questo vale per conduttori a sezione circolare o di altra forma. Alla profondità d la densità di corrente \mathcal{J} è approssimativamente:

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_0 e^{-d/\delta}$$

dove: \mathcal{J}_0 è la densità della corrente sulla superficie del conduttore e δ è una costante che indica la "profondità di penetrazione" (o "profondità di pelle") della corrente (lo spessore, a partire dalla superficie, in cui scorre la maggior parte della corrente).

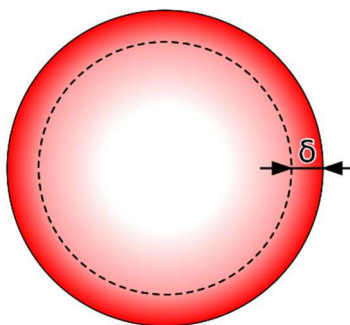


Fig. 6 – Profondità di penetrazione

Alla profondità δ la densità della corrente vale $1/e$ (circa 0,37) volte quella presente sulla superficie esterna.

⁴ I conduttori per correnti a radiofrequenze, infatti, spesso sono costituiti da cilindri vuoti nell'interno.

Per calcolarne il valore, si usa la relazione:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

dove ρ = resistività (detta anche resistenza specifica) del conduttore; $\omega = 2\pi f$ = frequenza angolare (o pulsazione) della corrente (f frequenza); μ = permeabilità magnetica assoluta del materiale conduttore (che, per i conduttori comuni, è uguale a quella del vuoto μ_0).

La resistenza di una lastra piana (di spessore maggiore di δ) al passaggio di una corrente alternata è uguale alla resistenza di una lastra di spessore δ in cui scorre una corrente continua.

Se il conduttore è un filo a sezione circolare la sua resistenza in alternata è circa la stessa che presenta un filo cavo di spessore δ e con lo stesso diametro del filo pieno.

La formula approssimata di calcolo in questo caso è:

$$R = \frac{\rho}{\delta} \left[\frac{L}{\pi(D - \delta)} \right] \cong \frac{\rho}{\delta} \left(\frac{L}{\pi D} \right)$$

dove: L = lunghezza del conduttore cavo, D = diametro esterno del conduttore cavo e δ = spessore della corona circolare. L'ultima approssimazione è più accurata se $D \gg \delta$.

Sostituendo il valore di δ nel valore approssimato ricavato per R otteniamo:

$$R \cong \rho \left(\frac{L}{\pi D} \right) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\rho}} = \left(\frac{L}{\pi D} \right) \sqrt{\frac{\omega\mu\rho}{2}}$$

Quindi:

$$R \propto \sqrt{\omega}$$

Si può quindi affermare che: "per un filo circolare la resistenza aumenta in modo proporzionale alla radice quadrata della frequenza"

Quando un conduttore è percorso da una corrente continua, oppure da una corrente alternata che non dà luogo ad un apprezzabile effetto pellicolare (conduttori sottili), la sua resistenza, come si è visto, è uguale alla resistenza ohmica $R = \rho \frac{L}{S}$ e le perdite nel rame per effetto Joule che in esso si verificano, si dicono *perdite ohmiche* (P_{cu0}).

Quando invece in un conduttore si manifesta una disuniformità nella distribuzione della densità di corrente (conduttori massicci), come abbiamo rilevato, gli effetti prodotti dal flusso magnetico di autoinduzione e parzialmente concatenato danno luogo ad un fenomeno equivalente ad un aumento della resistenza del conduttore (la quale assume il valore $R_{eq} = k_R R$) e provocano conseguentemente delle perdite, nel rame:

$$P_{cu} = R_{eq} I^2 = k_R R I^2 = k_R P_{cu0}$$

che risultano *uguali alle perdite ohmiche moltiplicate per il rapporto di resistenza*.

Pertanto, ricordando che lo spessore del tubo equivalente ad un conduttore di raggio r_0 , quando r_0/δ , è maggiore di 2, coincide praticamente con lo spessore di penetrazione δ , si deduce che *le perdite effettive nel rame di un conduttore cilindrico percorso da una corrente alternata, per grandi valori del rapporto r_0/δ , sono praticamente uguali a quelle che si verificherebbero, in regime di corrente continua, se la corrente fluisse lungo una "corteccia" di spessore uguale a δ .*

La differenza fra le perdite effettive nel rame e le perdite ohmiche, dovuta alla resistenza addizionale del conduttore, si dice *perdita addizionale nel rame* (P_{cuadd}):

$$P_{cuadd} = P_{cu} - P_{cu0} = P_{cu0}(k_r - 1)$$

In pratica le perdite addizionali del rame si manifestano nei conduttori percorsi da correnti ad elevate frequenze e nei conduttori di grande sezione situati nelle cave delle grosse macchine elettriche. Esse sono ovviamente tanto più grandi, quanto maggiore è la disuniformità nella distribuzione della densità della corrente nella sezione del conduttore e possono assumere valori particolarmente elevati, uguali anche a qualche decina di volte le perdite ohmiche.

Nella pratica è quindi necessario evitare che il fenomeno si manifesti con intensità tale da oltrepassare certi ragionevoli limiti, sia perché ciò comporterebbe l'impiego di notevole quantità di materiale conduttore, piuttosto costoso, scarsamente utilizzato; sia perché il cospicuo aumento di perdite nel rame rappresenterebbe un inutile spreco di energia; sia infine perché in molti casi il calore prodotto potrebbe danneggiare, ed in taluni casi anche fondere il conduttore. Per contenere gli effetti nocivi delle correnti parassite e limitare le perdite addizionali nel rame, si ricorre nella pratica ad opportuni accorgimenti costruttivi.

Ad esempio, si suddividono i conduttori in tanti fili sottili in parallelo, isolati fra loro ed intrecciati (fig. 7a) in maniera che le f. e. m. indotte dal flusso d'autoinduzione parzialmente concatenato si compensino mutuamente ed il sistema risulti così praticamente esente da addensamenti di corrente⁵. Oppure, nella tecnica costruttiva delle macchine elettriche, si suddividono i grossi conduttori, destinati ad essere alloggiati nei canali, in sbarrette opportunamente sagomate e collegate in parallelo fra loro (fig. 7b). Oppure, nella tecnica delle alte frequenze, si usano dei conduttori tubolari (fig. 7c), nei quali sono stati eliminati gli strati interni ed è rimasta la sola: "corteccia" esterna.

In tutte le precedenti considerazioni sull'effetto pellicolare si è supposto che il conduttore fosse isolato nello spazio e sottratto alla influenza di ogni campo magnetico prodotto all'esterno di esso. Negli usuali apparati tecnici, accade spesso invece che nelle vicinanze di un conduttore percorso da corrente, vi siano altri conduttori percorsi da correnti di uguale frequenza.

Una parte del campo magnetico creato dalle correnti esterne risulta parzialmente concatenato col conduttore ed esercita pertanto su di esso un'azione che influisce sulla distribuzione della densità di corrente, determinandone un'alterazione, rispetto a quella che si verificherebbe in presenza del solo effetto pellicolare.

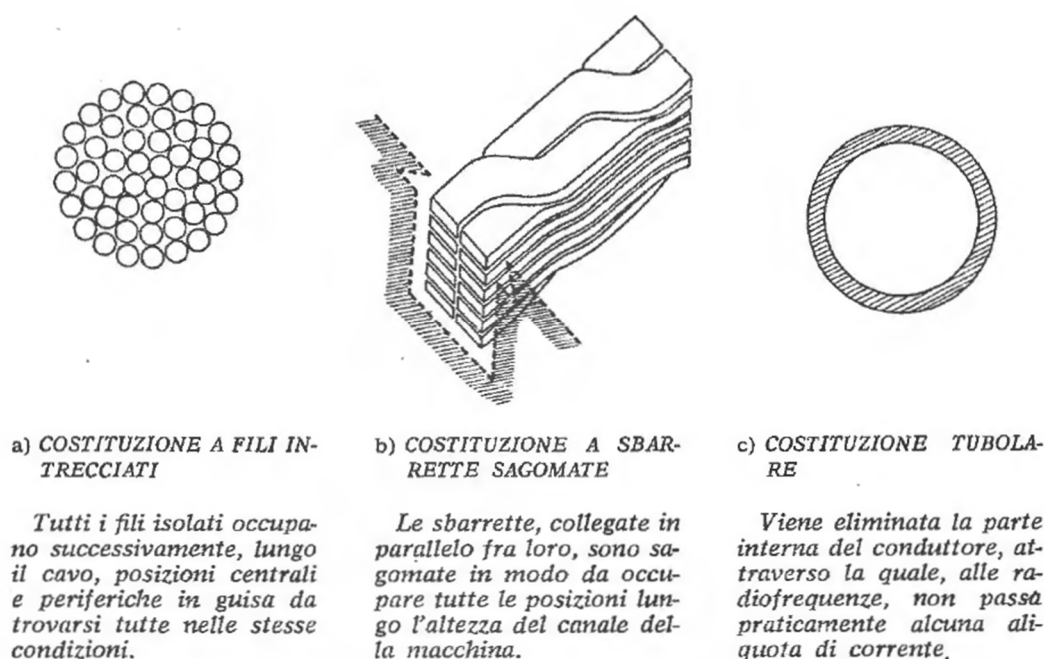


Fig. 7 – Accorgimenti costruttivi per limitare le perdite addizionali nel rame

Tale effetto, assai comune nelle bobine ad alta frequenza e, a volte, nei collegamenti frontali delle grosse macchine elettriche, viene chiamato *effetto di prossimità*.

⁵ A volte vengono usati conduttori costituiti da fili intrecciati anche per correnti a frequenza industriale; in tal caso però normalmente lo scopo è diverso: quello di conferire al conduttore una elevata flessibilità meccanica.

Un altro fenomeno che frequentemente si manifesta nella pratica è quello derivante dal fatto che l'asse del conduttore, invece che rettilineo, ha in molti casi andamento elicoidale. Anche in questo caso l'azione reciproca fra le spire determina un'alterazione nella distribuzione della densità della corrente, rispetto a quella che si avrebbe se l'asse del conduttore fosse rettilineo. Tale fenomeno viene comunemente denominato *effetto di spiralizzazione*.

Sommario

Equazioni di Maxwell	2
Effetti prodotti dalle correnti vorticosi	2
Effetto pellicolare nei conduttori cilindrici	6
Effetto pelle	7
Sommario	10