

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.
Parte nove: campo magnetico all'interno dei materiali

A cura della Redazione

9.1 - Permeabilità magnetica

La permeabilità magnetica assoluta è una grandezza fisica che esprime l'attitudine di una certa sostanza a lasciarsi attraversare dal flusso magnetico. La permeabilità magnetica relativa è quella che si ottiene dal rapporto tra la permeabilità assoluta e quella del vuoto. Nei materiali diamagnetici la permeabilità magnetica assume un valore costante praticamente coincidente con il valore della permeabilità del vuoto.

Nel paragrafo precedente è stata messa in evidenza una grandezza fisica che interviene in diverse formule: la permeabilità magnetica. In particolare si è visto che la permeabilità magnetica costituisce il coefficiente di proporzionalità tra l'induzione magnetica B e l'intensità del campo H :

$$B = \mu \cdot H$$

La permeabilità magnetica, che si misura in henry/metro (H/m), esprime l'attitudine che possiede un certo materiale a lasciarsi attraversare dal flusso magnetico: i corpi che hanno permeabilità elevata (ad esempio, i ferromagnetici) si magnetizzano intensamente anche con forze magnetiche ridotte.

La permeabilità μ è quindi una caratteristica il cui valore dipende dalla natura del materiale entro il quale si sviluppa il campo magnetico.

A differenza di quanto si è visto per altre caratteristiche elettriche dei materiali (come la costante dielettrica), la permeabilità magnetica assume in molti casi dei valori variabili. Per il vuoto, l'aria e la maggior parte dei materiali diamagnetici essa è però costante. Nel vuoto la permeabilità vale:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

Questo valore, analogamente a quanto si è visto per la costante dielettrica, viene preso come termine di riferimento in base al quale si esprime la permeabilità relativa degli altri materiali. Per ricavare la permeabilità assoluta si applica la relazione:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Si osservi che essendo la permeabilità delle sostanze diamagnetiche praticamente coincidente con quella del vuoto, l'introduzione di tali sostanze entro un campo magnetico non ne modifica sostanzialmente le caratteristiche.

Saturazione magnetica

La saturazione magnetica è un fenomeno per il quale nei materiali magnetici, all'aumentare dell'intensità di campo, la permeabilità non si mantiene costante, ma tende a diminuire.

I materiali ferromagnetici hanno una permeabilità assoluta che può essere anche di qualche migliaio di volte superiore a quella del vuoto.

Questa permeabilità, però, non è costante, ma per effetto del fenomeno della saturazione magnetica va diminuendo all'aumentare dei valori dell'induzione B .

Per la spiegazione del fenomeno si può ricorrere alla teoria atomica del magnetismo cui si è già fatto riferimento al paragrafo 8.2.

Nei materiali diamagnetici e paramagnetici gli atomi (magnetini) risentono poco del campo e solo pochi di essi si orientano nel senso necessario per dare luogo a magnetizzazione; nei materiali ferromagnetici l'orientamento degli atomi avviene invece in massa fin da valori bassi dell'intensità di campo. All'aumentare di H si arriva, però, ad un punto in cui quasi tutti gli atomi sono orientati nel senso del campo: il materiale comincia allora a comportarsi come paramagnetico perché non ha più atomi da poter orientare e per quanto si aumenti il valore di H , l'induzione cresce di poco.

Caratteristica di magnetizzazione

La caratteristica di magnetizzazione è una curva che esprime l'andamento dell'induzione di un materiale al variare dell'intensità del campo magnetico.

Per le applicazioni pratiche non è sufficiente fornire solo il valore della permeabilità assoluta, come è possibile per i materiali paramagnetici, ma sono necessari grafici o tabelle che diano per ogni valore dell'induzione la relativa permeabilità (Figura 9.1) oppure la caratteristica di magnetizzazione del materiale cioè del diagramma che dà per ogni valore dell'intensità di campo magnetico H il corrispondente valore di induzione B (Figura 9.2).

Modifiche di campo apportate da un materiale ferromagnetico

A completamento di questo paragrafo può essere opportuno illustrare brevemente il meccanismo secondo il quale l'introduzione di un materiale ferromagnetico entro un campo esistente può modificare la struttura di quest'ultimo.

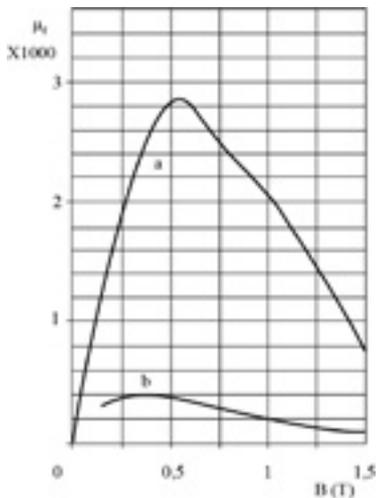


Figura 9.1 - Andamento della permeabilità magnetica al variare dell'induzione:
 a - ferro fucinato e acciaio non temprato;
 b - ghisa e acciaio temprato.

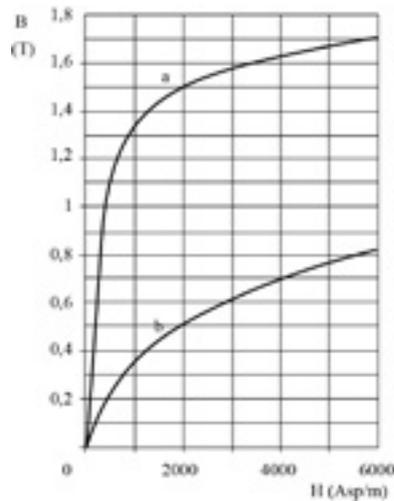


Figura 9.2 - Caratteristica di magnetizzazione di alcuni materiali ferromagnetici al variare dell'induzione:
 a - ferro fucinato e acciaio non temprato;
 b - ghisa e acciaio temprato.

Si supponga, a questo scopo, di avere inizialmente un campo uniforme che si svolge entro l'aria e che quindi ha le linee di forza parallele ed equidistanti (Figura 9.3). Se si introduce un pezzo di ferro, esso si magnetizza per induzione con polarità opposte a quelle del campo; tenendo presente che dove si hanno linee di forza aventi direzioni contrarie esse si annullano reciprocamente, ne risulta che al di fuori del ferro si ha una diminuzione delle linee di forza cui fa riscontro un aumento all'interno del medesimo.

È quindi come se il materiale incanalasse nel suo interno le linee di forza addensandole e diventando quindi fortemente magnetizzato.

Questo fatto spiega perché normalmente i circuiti magnetici vengono realizzati con leghe di ferro in quanto possono incanalare un flusso magnetico molto maggiore di quello che potrebbe transitare attraverso la medesima sezione di aria, naturalmente a parità di forza magnetomotrice applicata.

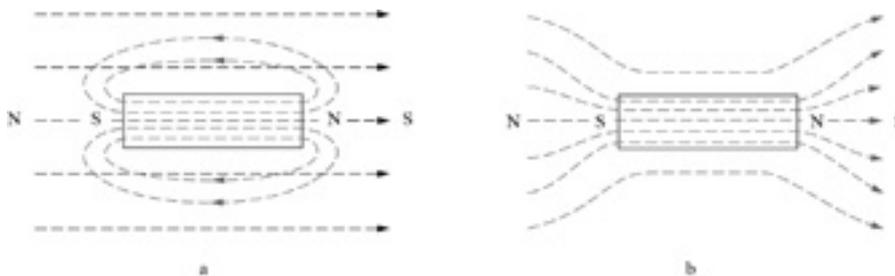


Figura 9.3 - Effetto dell'introduzione di un corpo ferromagnetico in un campo magnetico uniforme. Si noti come il corpo si magnetizzi per induzione (a) e ciò determini un addensamento delle linee di forza all'interno del corpo e una conseguente diminuzione delle stesse all'esterno (b).

9.2 - Isteresi magnetica

L'isteresi magnetica è un fenomeno per il quale un materiale magnetico subisce dei cicli di magnetizzazione che dipendono dagli stati magnetici precedenti.

Il ciclo di magnetizzazione del quale si è parlato nel paragrafo precedente viene rilevato sperimentalmente per mezzo di un solenoide nel quale viene introdotto un provino del materiale in esame che non sia stato sottoposto in precedenza a magnetizzazione: il solenoide è collegato in modo da poter regolare a piacere il valore della corrente cosicché, in base al numero delle spire, risulta possibile definire i valori assunti da H (Figura 9.4). L'induzione B corrispondente si rileva con strumenti di misura particolari sui quali non è il caso di soffermarsi.

Aumentando gradatamente il valore della corrente, H e B aumentano sino a che la curva di magnetizzazione mostra il fenomeno della saturazione già visto (tratto $0 a$ di figura 9.5). Se ora si riduce gradualmente H , si constata che la curva non riassume i valori che si erano ottenuti durante la fase di aumento, la nuova curva si mantiene infatti al di sopra di quella precedente (tratto $a c$): a pari valori di H , quando l'intensità del campo è in fase di diminuzione, si ha una induzione maggiore di quando il campo era crescente.

Questo fenomeno è detto isteresi magnetica e si spiega pensando che durante la magnetizzazione tutti gli atomi si sono dovuti orientare in una certa direzione: diminuendo la corrente essi dovrebbero riassumere le posizioni disordinate iniziali; per la presenza di un certo attrito essi faticano a riprendere tale assetto e quindi il materiale risulta attraversato da un flusso superiore a quello che si era ottenuto inizialmente.

Se ora si cambia la polarità della corrente, in modo da invertire la direzione di H , la curva continua con valori invertiti dell'induzione riproducendosi simmetricamente (tratto $c d$). Poi si può di nuovo aumentare H trovando così una curva di magnetizzazione che rimane tutta al di sotto di quella ottenuta precedentemente e che giunge a toccarla solo in corrispondenza del valore massimo di H (tratto $d e a$).

Ripetendo più volte le operazioni descritte si ottiene sempre lo stesso grafico che è stato denominato ciclo di magnetizzazione o di isteresi e la cui forma è caratteristica per ogni materiale.

In particolare interessa osservare due punti caratteristici del ciclo: quello relativo all'induzione B_r che si ottiene quando si annulla la forza magnetica e quello relativo alla forza magnetica $-H_c$ che si deve applicare per annullare l'induzione. B_r si chiama induzione residua e $-H_c$ è detta forza coercitiva.

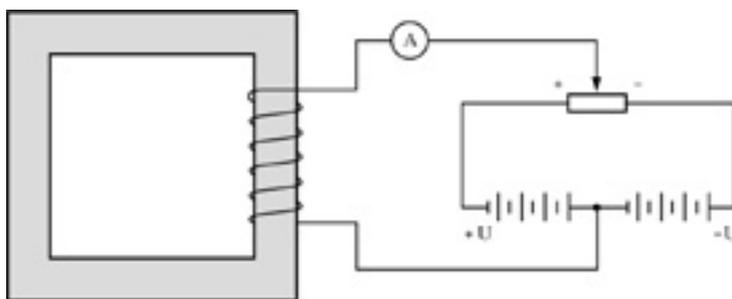


Figura 9.4 - Circuito per il rilievo della caratteristica di magnetizzazione di un materiale.

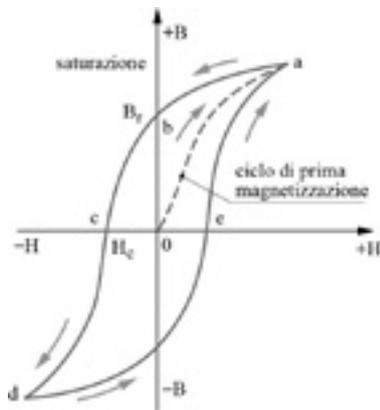


Figura 9.5 - Ciclo di magnetizzazione.

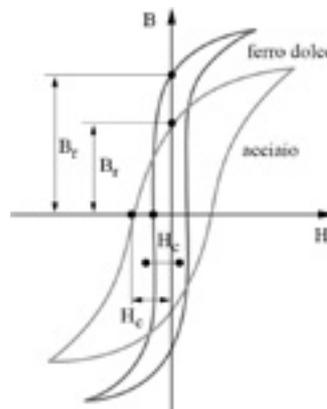


Figura 9.6 - Confronto tra cicli di isteresi.

I fatti descritti assumono un'importanza fondamentale nell'impiego dei materiali ferromagnetici in applicazioni ove sono presenti campi magnetici. Ad esempio, il ferro dolce non si presta per la realizzazione di magneti permanenti: nonostante il suo ciclo di magnetizzazione mostri che esso ha una induzione residua talvolta anche più elevata dall'acciaio (Figura 9.6), la forza coercitiva è minima e quindi bastano perturbazioni di modesta entità per eliminare l'induzione residua. L'acciaio, invece, ha valori più bassi di induzione residua, ma la forza coercitiva è sufficientemente elevata perché il contatto con campi magnetici esterni accidentali (come quello terrestre o di un solenoide) non lo smagnetizzi con facilità.

Il ferro ha, peraltro, la caratteristica di magnetizzarsi notevolmente, ma di perdere anche con facilità il suo magnetismo quando si annulla la forza magnetica per cui risulta adatto a formare i circuiti magnetici delle macchine elettriche.

Si osservi infine che il ciclo di isteresi varia con la temperatura dei corpi: verso i 700 °C le proprietà magnetiche scompaiono quasi del tutto, per cui una calamita riscaldata al color rosso raffreddandosi risulta quasi completamente smagnetizzata.

9.3 - Perdite per isteresi

Le perdite per isteresi rappresentano l'energia che viene dissipata in un materiale sottoposto a ciclo di magnetizzazione a causa dell'isteresi magnetica.

Se si osserva un ciclo di magnetizzazione si rileva che gli atomi del materiale sottoposto a magnetizzazione devono prima orientarsi in un senso poi quando la forza magnetica inverte il suo senso in quello opposto. Questo movimento non avviene liberamente, ma è ostacolato dagli attriti che gli atomi incontrano, essendo legati gli uni agli altri, per cui è lecito pensare che ciò dia luogo a perdite di energia con sviluppo di calore. Il fenomeno risulta particolarmente vistoso se al solenoide è applicata una corrente alternata che cambia di polarità parecchie volte al secondo facendo così compiere al materiale rapidissimi cicli di magnetizzazione.

Queste perdite di energia, dette per isteresi, sono proporzionali all'area del ciclo di magnetizzazione e vengono di solito espresse, per ogni materiale, in watt/kilogrammo (W/kg); esse indicano cioè quanti watt di potenza si trasformano in calore entro un kilogrammo del materiale sottoposto ai cicli di magnetizzazione.

9.4 - Circuiti magnetici

Per circuito magnetico s'intende un insieme di corpi che, pur differendo nella sezione e nel materiale di cui sono composti, formano un percorso chiuso lungo il quale può stabilirsi un flusso magnetico.

Finora si è parlato delle caratteristiche magnetiche dei materiali, ragionando con l'induzione B e la forza magnetica H che sono caratteristiche specifiche dei corpi; nella realtà le linee di forza magnetiche si sviluppano lungo percorsi chiusi, più o meno complessi, che vengono detti circuiti magnetici.

Se nel circuito è presente un corpo ferromagnetico, esso viene chiamato nucleo magnetico, mentre eventuali brevi tratti in cui il circuito si estende in aria sono denominati traferri.

Nella terminologia corrente si usa chiamare circuito chiuso un circuito magnetico che si svolge totalmente nel ferro senza soluzioni di continuità e circuito aperto se nel circuito sono presenti uno o più traferri.

Per il calcolo dei circuiti magnetici conviene fare riferimento alla legge di Hopkinson già esposta al paragrafo 8.6 e che si riporta per comodità:

$$M = R_m \cdot \Phi$$

nella quale M è la f.m.m., Φ il flusso e R_m la riluttanza del circuito magnetico che può essere espressa così:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

La riluttanza risulta proporzionale alla lunghezza del circuito ed inversamente proporzionale alla sua sezione analogamente a quanto visto per la resistenza; la permeabilità μ appare invece al denominatore poiché esprime la facilità del materiale a lasciarsi attraversare dal flusso, mentre la resistività rappresentava l'ostacolo che il materiale oppone al passaggio della corrente.

La similitudine fra legge di Hopkinson e legge di Ohm è però formale data la diversa natura dei fenomeni in gioco; inoltre, nel caso delle correnti, la resistenza R può sovente considerarsi costante e quindi è lecito dire che tensione e corrente risultano fra loro proporzionali; nel caso del campo magnetico la permeabilità non è in generale costante e quindi anche la riluttanza varierà al variare dei valori di induzione nel circuito. E ciò non solo per il circuito nel suo complesso, ma anche per i vari tratti di esso realizzati in materiale magnetico, nel caso in cui la sezione sia diversa da un punto all'altro come si verificherebbe nel circuito magnetico di cui alla figura 9.7.

9.5 - Calcolo di un circuito magnetico

Il problema consiste, in genere, nel definire le caratteristiche che deve possedere il circuito elettrico induttore (che produce il campo magnetico) per ottenere un certo flusso in un determinato circuito magnetico. Il calcolo è, di norma, abbastanza laborioso perché nel dimensionamento del circuito magnetico non si può prescindere, nei casi reali, dal soddisfare esigenze di ottimizzazione tecnico-economiche tuttavia, nel seguito, viene data qualche indicazione per i casi più semplici.

Si supponga che siano noti i seguenti dati: il valore del flusso che deve agire nel circuito, il percorso che deve compiere il flusso (in altre parole, la forma del circuito magnetico) e i materiali

da utilizzare per i vari tratti del circuito. Definito un appropriato valore di induzione cui far lavorare i materiali (di solito, per i ferromagnetici, si assume un valore compreso tra 1,4 e 1,7 T), si può procedere come segue (esempi numerici sono riportati tra i problemi già svolti posti alla fine del Capitolo).

Calcolo della sezione dei vari tronchi di circuito

Il calcolo deve essere eseguito, per ogni tronco, con la relazione $S = \Phi/B$ avendo cura di verificare che le sezioni risultanti comportino delle dimensioni del nucleo magnetico compatibili con gli impieghi che se ne intende fare.

A questo punto si può procedere in due modi: attraverso il calcolo della riluttanza o attraverso il metodo dell'intensità di campo.

a - Metodo della riluttanza magnetica

Può essere effettuato agevolmente deducendo dagli appositi grafici (Figura 9.1) il valore della permeabilità in relazione all'induzione per ogni tronco di circuito.

Nota la permeabilità magnetica si possono calcolare le riluttanze parziali e quella totale, quest'ultima come somma delle precedenti.

Il calcolo della c.d.t. magnetica si ottiene moltiplicando la riluttanza magnetica totale per il flusso che deve essere stabilito nel circuito.

Il valore della c.d.t. magnetica totale individua, di fatto, il valore minimo che dovrà avere la f.m.m. affinché nel circuito si stabilisca il flusso previsto.

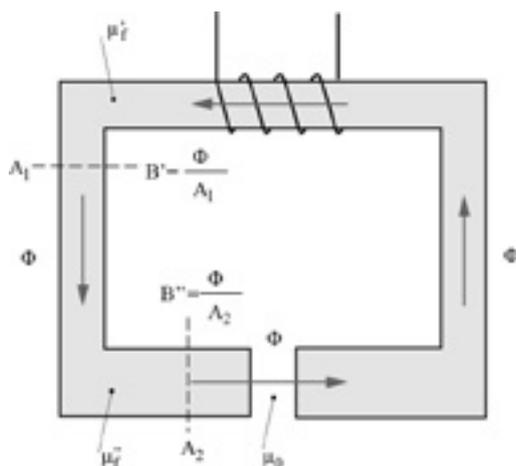


Figura 9.7 - Circuito magnetico quasi chiuso con sezioni diverse.

b - Metodo dell'intensità di campo

Dalle caratteristiche di magnetizzazione dei materiali (Figura 9.2), per ogni tronco di circuito si può ottenere, alle induzioni di lavoro di ogni tronco, la corrispondente intensità di campo magnetico.

Per il calcolo della f.m.m. si moltiplicano le diverse intensità di campo per le rispettive lunghezze di circuito: la somma dei valori parziali dà il valore totale della c.d.t. magnetica e quindi della f.m.m. di cui bisognerà disporre per stabilire il flusso previsto.

Dimensionamento del circuito induttore

Dai valore della f.m.m. necessaria si risale poi al calcolo dell'avvolgimento induttore sapendo che $M = NI$; si devono quindi avere N spire affinché con la corrente che circola la f.m.m. sia quella richiesta.

Flussi dispersi

La procedura di calcolo sopra illustrata parte dal presupposto che si abbia a che fare con un circuito perfetto, nel quale cioè tutto il flusso rimane entro il circuito stesso e quindi ha lo stesso valore in ogni punto.

In realtà si hanno spesso dei flussi dispersi, ossia dei flussi che escono dal nucleo e vi rientrano in un punto diverso da quello di uscita senza quindi passare interamente attraverso la parte utile (Figura 9.8).

Di ciò occorre molte volte tener conto in sede di calcolo in quanto parte delle linee di flusso si richiudono attraverso percorsi che non sono quelli previsti.

In genere se ne tiene conto eseguendo un calcolo prudenziale e maggiorando il valore del flusso richiesto del 10 ÷ 20% e usando tale valore in ogni parte del circuito.

9.6 - Confronto tra circuiti magnetici e circuiti elettrici

Dal raffronto tra le grandezze e i comportamenti che caratterizzano i circuiti elettrici e magnetici si possono formulare le seguenti osservazioni:

- la *f.m.m.* è analoga alla f.e.m.;
- la *caduta di tensione magnetica* è assimilabile alla c.d.t.;
- la *riluttanza* è assimilabile alla resistenza;
- il *circuito magnetico eccitato è sempre percorso da flusso*, perciò non esiste grandezza corrispondente alla f.e.m. a morsetti aperti;
- il *circuito magnetico dà luogo a dispersioni di flusso*, che in un circuito elettrico non si verificano essendo la corrente sempre rigorosamente la stessa lungo un conduttore (nell'ipotesi che non esistano diramazioni);
- la *permeabilità dei materiali ferromagnetici varia con il valore dell'induzione*, mentre la resistività non è influenzata dalla densità di corrente (assimilabile all'induzione);
- il *circuito magnetico con intensità di campo magnetico costante non assorbe energia*, salvo quella richiesta inizialmente per crearlo e che viene poi resa quando viene

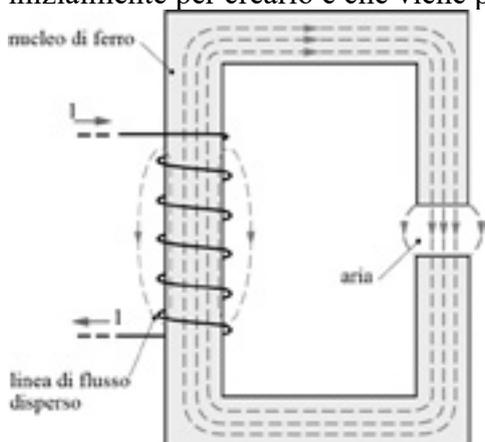


Figura 9.8 - Esempio dell'andamento delle linee di flusso magnetico disperso.

annullato, mentre una circolazione di corrente di valore costante avviene sempre con perdite per effetto di Joule.

9.7 - Applicazioni del magnetismo

I campi magnetici trovano innumerevoli applicazioni in elettrotecnica, anzi si può dire che la maggior parte delle macchine e delle apparecchiature basano il loro funzionamento su fenomeni magnetici.

Un esempio tipico è costituito dagli elettromagneti, formati da un solenoide percorso dalla corrente di eccitazione, avvolto attorno ad un nucleo di ferro dolce per ottenere dei valori più elevati di flusso. Gli elettromagneti possono essere usati essenzialmente per due scopi: produrre e convogliare un flusso in un punto dove esso è utilizzato (ad esempio, nelle macchine elettriche); generare una forza attrattiva nel traferro.

Per quest'ultimo scopo si usa generalmente un'ancora, costituita da un elemento di ferro mobile posto in corrispondenza del traferro e sulla quale si esercita la forza, chiamata forza portante dell'elettromagnete (Figura 9.9) Tale forza può venire calcolata mediante la formula:

$$F = 400\,000 B^2 \cdot S \quad (N)$$

dove:

B = induzione sul nucleo dell'elettromagnete in tesla;

S = sezione totale, in metri quadrati, dei punti di contatto dei poli con l'ancora (se i punti sono due, vanno considerati entrambi).

Naturalmente il valore massimo della forza portante si ha quando l'ancora è a contatto con i poli ed il traferro è quasi nullo: infatti, se si ha un traferro, a parità di corrente di eccitazione il flusso diminuisce notevolmente e con esso l'induzione che nella formula compare al quadrato.

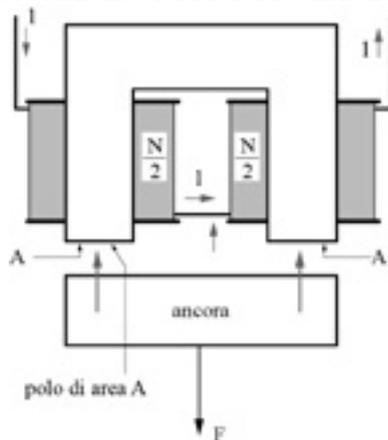


Figura 9.9 - Esempio di elettromagnete.

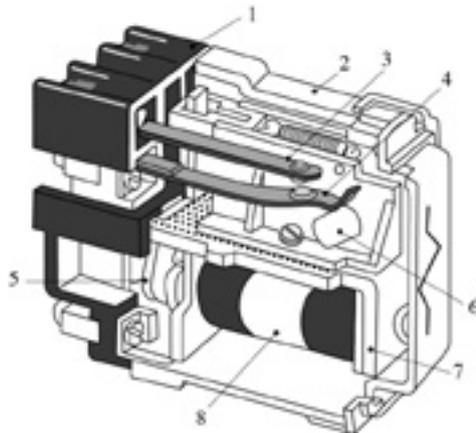


Figura 9.10 - Esempio di relè:

- 1 - base di supporto;
- 2 - calotta trasparente;
- 3 - contatto fisso;
- 4 - contatto mobile;
- 5 - cinematismo (azionato dalla bobina) che comanda la camma;
- 6 - camma che aziona il contatto mobile;
- 7 - nucleo magnetico;
- 8 - bobina di eccitazione.

La forza portante degli elettromagneti viene utilizzata in molti casi, come ad esempio nel sollevamento di rottami metallici, nei freni elettromagnetici o nei giunti elettromagnetici.

Un'altra importante applicazione è rappresentata dai relè i quali assumono forme costruttive molto diverse pur essendo basati su un unico principio: un elettromagnete attira un'ancorina che per mezzo di un sistema meccanico sposta un gruppo di molle di contatto le quali aprono o chiudono dei circuiti (Figura 9.10). In tal modo si ottiene che la corrente inviata in un circuito di comando possa, attraverso l'azione magnetica, aprire o chiudere più circuiti controllati.

I relè costituiscono, ad esempio, gli elementi fondamentali dei circuiti telefonici e delle protezioni di macchine elettriche e di linee aeree.

ESERCIZI SVOLTI

Esercizio 1 - Un toro magnetico il cui circuito è lungo 1,25 m è realizzato in aria con 2 500 spire di diametro 8,5 cm. Il circuito viene eccitato da una corrente di 12,5 A. Calcolare i valori di riluttanza, f.m.m., flusso e induzione.

Soluzione

Il calcolo della riluttanza si effettua tenendo conto che la permeabilità magnetica del vuoto (e quindi dell'aria) è uguale a $1,256 \cdot 10^{-6}$ H/m. Si deve innanzitutto calcolare la sezione del circuito magnetico:

$$S = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{3,14}{4} (8,5 \cdot 10^{-2})^2 = 5,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

e quindi:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot S} = \frac{1,25}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 5,67 \cdot 10^{-3}} = 0,1755 \cdot 10^9 \text{ H}^{-1}$$

Questo valore è indipendente dalle condizioni di eccitazione del circuito. La f.m.m. si calcola con la formula:

$$M = N \cdot I = 2\,500 \cdot 12,5 = 31,25 \cdot 10^3 \text{ Asp}$$

Applicando la legge di Hopkinson si determina il flusso:

$$\Phi = \frac{M}{R_m} = \frac{31,25 \cdot 10^3}{0,1755 \cdot 10^9} = 0,1781 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

E quindi l'induzione risulta:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,1781 \cdot 10^{-3}}{5,67 \cdot 10^{-3}} = 0,0314 \text{ T}$$

Esercizio 2 - Un solenoide lungo 25 cm e realizzato avvolgendo 100 spire su un supporto avente una permeabilità relativa $\mu_r = 600$, è percorso dalla corrente di 2 A. Si calcoli il valore dell'induzione magnetica all'interno del solenoide.

Soluzione

Essendo:

$$B = \mu H$$

si calcola la permeabilità assoluta:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 600 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} = 754 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

e l'intensità H del campo:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{100 \cdot 2}{25 \cdot 10^{-2}} = 800 \text{ Aps/m}$$

Si ha pertanto:

$$B = \mu \cdot H = 754 \cdot 10^{-6} \cdot 800 = 0,6 \text{ Wb/m}^2$$

Esercizio 3 - Un solenoide in aria costituito da 200 spire del diametro di 4 cm e lungo 50 cm assorbe una corrente di 10 A. Si chiede il valore dell'intensità del campo e quello del flusso.

Soluzione

Si calcola per prima cosa la f.m.m.:

$$M = N \cdot I = 200 \cdot 10 = 2\,000 \text{ Asp}$$

e quindi il valore della intensità di campo:

$$H = \frac{M}{l} = \frac{2\,000}{0,5} = 4\,000 \text{ Asp/m}$$

Il valore dell'induzione si determina tenendo conto che la permeabilità dell'aria è di $1,256 \cdot 10^{-6}$ H/m; e quindi si ha:

$$B = \mu \cdot H = 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^3 = 5,02 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Per calcolare il flusso è necessario determinare prima la sezione del solenoide e quindi:

$$S = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{3,14}{4} (4 \cdot 10^{-2})^2 = 0,001256 \text{ m}^2$$

valore del flusso risulta:

$$\Phi = B \cdot S = 5,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1,256 \cdot 10^{-3} = 6,31 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

Esercizio 4 - Un anello di ferro fucinato avente una sezione di 10 cm^2 ed un diametro medio di 25 cm è avvolto con 400 spire percorse da una corrente di 4 A . Si vuole conoscere il flusso che si stabilisce.

Soluzione

Si calcola il valore della lunghezza della circonferenza media dell'anello:

$$l = \pi \cdot D = 3,14 \cdot 25 = 78,5 \text{ cm} = 0,785 \text{ m}$$

Si determina ora la f.m.m.:

$$M = N \cdot I = 400 \cdot 4 = 1\,600 \text{ Asp}$$

e quindi l'intensità del campo, che è indipendente dal grado di eccitazione del circuito magnetico:

$$H = \frac{M}{l} = \frac{1\,600}{0,785} = 2\,038 \frac{\text{Asp}}{\text{m}}$$

Il valore dell'induzione deve essere preso dalla caratteristica di magnetizzazione del materiale (vedere figura 9.2), dalla quale per il ferro fucinato si ottiene in corrispondenza di $H = 2\,038 \text{ Asp/m}$, il valore di $1,5 \text{ T}$.

Il valore del flusso si calcola immediatamente con la formula:

$$\Phi = B \cdot S = 1,5 \cdot 10 \cdot 10^{-4} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Esercizio 5 - Un anello di ferro fucinato a sezione rettangolare di $5 - 10 \text{ cm}$ con diametro esterno di 40 cm e interno di 20 cm è avvolto con 500 spire. Si chiede quale corrente sarà necessaria per ottenere un flusso di $0,006 \text{ Wb}$.

Soluzione

Si determinano per prima cosa le caratteristiche geometriche del toro. La sezione sarà:

$$S = a \cdot b = 5 \cdot 10 = 50 \text{ cm}^2 = 0,005 \text{ m}^2$$

Per la lunghezza del toro si fa riferimento al diametro medio:

$$l = \pi \frac{d + D}{2} = 3,14 \frac{0,40 + 0,20}{2} = 0,942 \text{ m}$$

Si possono quindi calcolare le varie grandezze magnetiche. L'induzione sarà:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,006}{0,005} = 1,2 \text{ T}$$

Dalla caratteristica magnetica del ferro fucinato (Figura 9.2) si rileva che per $B = 1,2 \text{ T}$ si ha $H = 670 \text{ Asp/m}$.

La f.m.m. necessaria sarà allora:

$$M = H \cdot l = 670 \cdot 0,942 = 631 \text{ Asp}$$

e la corrente necessaria risulta infine:

$$I = \frac{M}{N} = \frac{631}{500} = 1,26 \text{ A}$$

Esercizio 6 - Il circuito magnetico, avente le dimensioni date in figura, è realizzato in ferro fucinato. Si deve determinare il valore di f.m.m. necessaria per stabilire un flusso di $3 \cdot 10^{-4}$ Wb.

Soluzione

Per le sezioni *A* e *C* l'induzione risulta:

$$B_{AC} = \frac{\Phi}{S_{AC}} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-4}} = 1,5 \text{ T}$$

mentre per la sezione *B* si ha invece:

$$B_B = \frac{\Phi}{S_B} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}} = 1,00 \text{ T}$$

Ora si devono determinare i valori di *H* per i due valori di induzione leggendo la caratteristica di magnetizzazione (Figura 9.2).

Per le sezioni *A* e *C* si ha (per $B = 1,5$ T) il valore di $H_{AC} = 2\,000$ Asp/m, mentre per la sezione *B* si ha (per $B = 1$ T) il valore di $H_B = 400$ Asp/m.

In base alla lunghezza media dei vari tronchi di circuito si possono calcolare le f.m.m.:

$$M_A = H_{AC} \cdot l_A = 2\,000 \cdot 0,04 \cdot 2 = 160 \text{ Asp}$$

$$M_B = H_B \cdot l_B = 400 \cdot 0,06 \cdot 2 = 48 \text{ Asp}$$

$$M_C = H_{AC} \cdot l_C = 2\,000 \cdot 0,10 = 200 \text{ Asp}$$

Per quanto riguarda il traferro, essendo l'induzione di 1,5 T si ha:

$$H = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 1,19 \cdot 10^6 \text{ Asp/m}$$

e la corrispondente f.m.m. sarà:

$$M_0 = H_0 \cdot l = 1,19 \cdot 10^6 \cdot 0,02 = 23\,800 \text{ Asp}$$

La f.m.m. totale necessaria è la somma delle singole f.m.m.:

$$M_t = M_0 + M_A + M_B + M_C = 23\,800 + 160 + 48 + 200 = 24\,208 \text{ Asp}$$

Come si può rilevare quasi tutta la c.d.t. magnetica si verifica sul traferro a causa della grande diversità nei valori della permeabilità magnetica del ferro fucinato e dell'aria.

Esercizio 7 - Su un nucleo toroidale in ferro fucinato, di sezione circolare pari a 50 cm^2 e con circonferenza media $l = 80 \text{ cm}$, sono avvolte 250 spire. Si determini la f.m.m. necessaria affinché si possa provocare un flusso pari a $0,006$ Wb.

Soluzione

Il problema può risolversi o con il metodo delle risultanze o con quello delle tensioni magnetiche.

Con il metodo delle riluttanze, si calcola per prima cosa l'induzione *B*:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,006}{50 \cdot 10^{-4}} = 1,20 \text{ Wb/m}^2$$

Dal grafico di figura 9.1 si ricava la permeabilità relativa per il ferro fucinato in corrispondenza al valore dell'induzione appena trovato.

Si rileva che per $B = 1,20 \text{ Wb/m}^2$, $\mu_r = 1\,550$.

Si determina quindi la riluttanza R_m :

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,80}{1\,550 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-4}} = 82\,200 \text{ H}^{-1}$$

e quindi si può determinare la forza magnetomotrice:

$$M = \Phi R_m = 0,006 \cdot 82\,200 = 493 \text{ Asp}$$

Essendo $N = 250$, la corrente che dovrà percorrere l'avvolgimento vale quindi:

$$I = \frac{M}{N} = \frac{493}{250} = 1,97 \text{ A}$$

Utilizzando il metodo delle tensioni magnetiche è necessario determinare il valore dell'intensità del campo magnetico in relazione all'induzione $B = 1,20 \text{ Wb/m}^2$.

Dal grafico di figura 9.2 si ha:

$$H = 620 \text{ Asp/m}$$

Pertanto:

$$M = H \cdot l = 620 \cdot 0,80 = 496 \text{ Asp}$$

La corrente necessaria per produrre il flusso richiesto, risulta:

$$I = \frac{M}{N} = \frac{496}{250} = 1,98 \text{ A}$$

Si noti come i valori qui trovati per il numero delle amperspire e per la corrente utile con il metodo delle tensioni magnetiche, siano pressoché coincidenti con quelli ricavati con il metodo delle riluttanze.

Esercizio 8 - Dato il circuito magnetico indicato a lato, si determini il numero di amperspire necessarie per produrre nella colonna centrale un flusso pari a $0,00144 \text{ Wb}$. Avendo realizzato l'avvolgimento con $1\,000$ spire, si calcoli inoltre la corrente di eccitazione. I diversi tronchi, in ferro fucinato hanno tutti la sezione di 6 cm^2 tranne la colonna centrale che risulta di sezione doppia, ossia 12 cm^2 .

Soluzione

Il circuito magnetico è simmetrico rispetto al piano nn' su cui agisce la f.m.m. NI . È intuitivo che per la simmetria della struttura, il flusso Φ che attraversa la colonna AB , giunto al nodo A , si ripartisce in parti uguali a $\Phi/2$ fra le due colonne laterali. Agli effetti del calcolo si procede determinando innanzitutto l'induzione B :

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,00144}{12 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ T}$$

Questo valore corrisponde anche all'induzione nei tratti di circuito AD , DC e CB , in quanto in essi si riducono a metà sta il flusso che la sezione.

Dal grafico della figura 9.2 si rileva che per $B = 1,20 \text{ T}$ l'intensità del campo magnetico risulta $H = 670 \text{ Asp/m}$.

Tenendo presente che per il carattere di completa simmetria del circuito magnetico è sufficiente considerare soltanto la parte di circuito a destra della linea di mezzana nn' (ossia il tratto $A-B-C-D$). La f.m.m. che determina il flusso Φ lungo la colonna centrale e $\Phi/2$ lungo gli altri tratti di circuito risulta:

$$M = H \cdot l = 670 \cdot (10 + 5 + 10 + 5) \cdot 10^{-2} = 201 \text{ Asp}$$

E pertanto la corrente necessaria per generare il flusso Φ risulta:

$$I = \frac{M}{N} = \frac{201}{1\,000} = 0,2 \text{ A}$$

ESERCIZI DA SVOLGERE

Es. 1 - Un circuito magnetico chiuso in aria è lungo 0,218 m e ha una sezione di 0,0320 m². Si calcoli la riluttanza e quindi il valore di f.m.m. necessaria per stabilire un flusso di 0,021 Wb.

(Risultato: $R_m = 5,42 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$; $M = 113\,900 \text{ Asp}$)

Es. 2 - All'interno di un solenoide lineare lungo 12 cm si ha una intensità di campo di 195 Asp/m. Si calcoli il valore della f.m.m. applicata e quindi della corrente se il solenoide è costituito da 820 spire.

(Risultato: $M = 23,4 \text{ Asp}$; $I = 0,0285 \text{ A}$)

Es. 3 - Un solenoide a forma di toro ha lunghezza media di 325 nini e sezione di 90 mm². Il circuito è costituita da acciaio non temprato ma è previsto un traferro di 5 mm. Si determini il valore di f.m.m. da applicare per ottenere un flusso di $1,44 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$.

Quante spire si dovranno utilizzare se la corrente è di 11 A?

(Risultato: $M = 7\,490 \text{ Asp}$; 681 spire)

Es. 4 - Si vuole conoscere la permeabilità relativa di un nucleo che, posto entro un solenoide, fa variare il flusso da 0,0002 Wb a 0,4 Wb.

(Risultato: $\mu_r = 2\,000$)

Es. 5 - Calcolare la f.m.m. necessaria per stabilire 0,006 Wb nel circuito magnetico di figura (le dimensioni sono espresse in millimetri), realizzato in ferro fucinata nelle colonne (sez. BB) e in ghisa nella traversa (sez. AA).

(Risultato: $M = 7\,250 \text{ Asp}$)

Es. 6 - Nel circuito magnetico di figura (le dimensioni sono espresse in millimetri), realizzato in ghisa, si deve stabilire un flusso di $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$. Si chiede quale f.m.m. è necessaria.

(Risultato: $M = 63\,200 \text{ Asp}$)

Es. 7 - Un circuito magnetico come in figura (le dimensioni sono espresse in millimetri) formato da lamiera in ferro normale, ha un avvolgimento di 1 000 spire sulla colonna centrale. Calcolare la f.m.m, e la corrente necessaria per stabilire 0,003 Wb su ciascuna colonna laterale.

(Risultato: $U = 12\,580 \text{ Asp}$; $I = 12,58 \text{ A}$).