Zeno Martini (admin)

IL CAMPO ELETTROMAGNETICO: II PARTE

1 January 2004

Articolo n° 10 su 13 del corso "**Elettrotecnica di base**". Vai all'**indice** del corso.

Paragrafi dell'articolo:

Introduzione

Definite le grandezze del campo magnetico con lo strumento matematico dei campi vettoriali, si esamina la sequenza tecnica dei fenomeni a fondamento della teoria. La legge di Faraday in particolare, vista anche come metodo di indagine di un fenomeno fisico per identificarne i parametri descrittivi.

Un cenno alle equazioni di Maxwell, la sintesi del campo elettromagnetico sorgente delle innumerevoli intuizioni che hanno "inventato" il XX secolo, concluderà l'articolo ed il corso di base di elettrotecnica.

Il campo magnetico come campo vettoriale

- Campo magnetico è la porzione di spazio in cui dipoli magnetici (aghi magnetici, spire percorse da corrente) si orientano;
- è prodotto da correnti elettriche
- vi si manifestano forze agenti su cariche elettriche in movimento, perpendicolari al loro moto;

- da esso si possono ricavare forze elettromotrici, (f.e.m. indotte)

Matematicamente, il campo magnetico è un campo vettoriale in cui:

- L'effetto magnetico è rappresentato dal vettore **B**, induzione magnetica;
- la causa tecnica, dal vettore **H**, campo magnetico;
- la forza agente sulla carica *q* dotata di velocità *v* è **F=q·vxB** (prodotto vettoriale esterno, v. art. 9, fig. 9.1b)
- le linee di forza sono chiuse;
- l'integrale di linea di **H** è detto tensione magnetica;
- la circuitazione di **H** non è nulla ed è detta forza magnetomotrice: è la somma algebrica delle intensità di corrente che attraversano la linea di calcolo considerata; H dunque si misura in A/m.
- il legame tra causa ed effetto, è del tipo **B=mH** in cui **m** è lacaratteristica del materiale, chiamata permeabilità magnetica
- il flusso di **B** corrisponde al totale impulso di tensione (V·s) che si sviluppa sul contorno della superficie e la sua velocità di variazione dà origine a f.e.m indotte sul contorno della superficie.

La legge di Faraday

E' la legge fondamentale per le applicazioni di conversione elettromeccanica di energia. Può essere la base per la definizione di tutte le grandezze del campo. La discussione che segue in tal senso è tecnica: la natura fisica del campo magnetico è pià[1] problematica, in quanto esso appare come una correzione relativistica del campo elettrico.

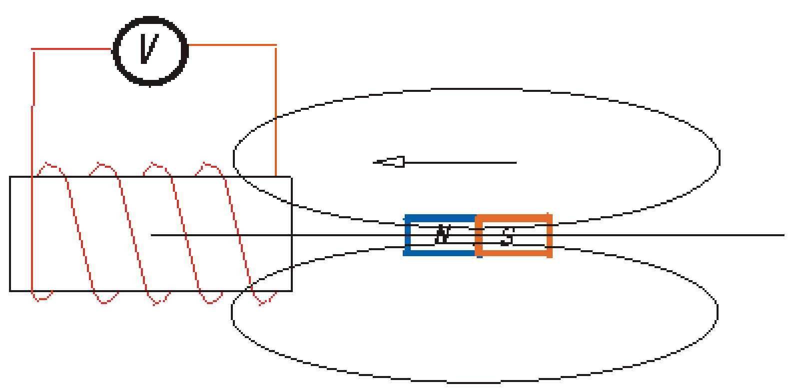


fig. 10. 1

Le osservazioni

1. Se un avvolgimento di N spire assume posizioni variabili nel tempo rispetto ad un magnete permanente o ad un altro circuito percorso da corrente, un voltmetro collegato ai suoi terminali misura una tensione. Diremo circuito indotto quest'ultimo e chiameremo induttore il magnete o l'altro circuito percorso da corrente. (fig.10.1)
2. Movimenti opposti generano tensioni opposte e movimenti identici effettuati a velocità maggiore determinano tensioni pià¹ elevate.
3. In bobine diverse movimenti identici generano tensioni diverse: maggiori se il numero delle spire è maggiore e se la sezione delle spire aumenta.

L'analisi

Campo magnetico è lo spazio dove i fatti osservati avvengono e sua sorgente è il sistema induttore. Come può evidenziare un ago magnetico sonda, si tratta di un campo vettoriale. Raffigurandolo con le linee di forza, intuiamo che il moto relativo tra indotto ed induttore può essere descritto dall'intersezione delle linee di forza con la superficie delle spire dell'indotto. L'intersezione variabile si può interpretare come causa della tensione elettrica. La grandezza matematica che descrive il "numero" di linee di forza, è il flusso del vettore che rappresenta il campo. Poichà© la tensione osservata dipende dalla velocità dei movimenti è naturale affermare che la *f.e.m. nell'indotto è proporzionale alla velocità (di variazione) del flusso magnetico che attraversa (si concatena con) le spire.* Poichà© è anche proporzionale al numero di sipire si può scrivere:

$$\mathbf{e(t)=N*dF(t)/dt} \qquad 10.\ 1$$

avendo indicato con dF(t)/dt la velocità (di variazione) del flusso.

La legge definisce il flusso magnetico, come il prodotto di una tensione per un tempo, cioè un impulso di tensione, chiamato weber: [Wb]=[V][s].

Il ragionamento teorico che si è avvalso di nozioni definite per i campi vettoriali, si può verificare con l'esperimento. Si traccia un grafico tensione-tempo per il passaggio da una data configurazione iniziale ad una finale del sistema induttore-indotto. Si scopre allora che l'area sottesa dalla curva è costante, qualunque sia l'intervallo di tempo $Dt= t_f - t_i$cui corrisponde una variazione del flusso magnetico

$F= F_f - F_i$ dove $F_f - F_i$sono i flussi magnetici finale ed iniziale, ed è proporzionale al numero di spire N dell'avvolgimento indotto. Si può allora trovare un rettangolo di altezza E_m che insistendo sullo stesso intervallo di tempo ha la stessa area sottesa dalla curva. In definitiva si può scrivere

$$\mathbf{E_m=N \cdot DF/ Dt} \quad 10.\ 2$$

Spesso si scrive anche

$$\mathbf{E_m=DF_C / Dt} \quad 10.\ 3$$

Avendo posto

$$\mathbf{DF_C=N \cdot DF= N \cdot (F_f-F_i)} \quad 10.\ 4$$

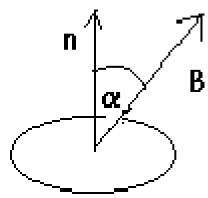
Il prodotto $\mathbf{F_C=N \cdot F}$ è detto *flusso concatenato* con il circuito di N spire**.** E_m è il valore medio della f.e.m indotta. Il valore istantaneo si ottiene considerando un intervallo di tempo piccolissimo generalmente indicato con dt, cui corrisponde una variazione di flusso concatenato piccolissima dF_c. Il valore istantaneo della tensione indotta è la "velocità del flusso concatenato" cioè, matematicamente, la sua derivata rispetto al tempo.

$$\mathbf{e(t)=dF_C(t)/dt} \quad 10.\ 5$$

L'induzione magnetica B

Il vettore responsabile del flusso magnetico è detto induzione magnetica ed indicato con **B**. La sua unità di misura, chiamata tesla, [T], ed è un flusso per unità di superficie. Quindi $[T]=[Wb][m]^{-2}$ *weber diviso metro quadro.*

Nella discussione precedente non si è accennato alla polarità della tensione che pure dipende dal flusso. E' necessario allora precisare le convenzioni adottate per il segno del flusso e la polarità della tensione indotta. Non è una novità : già parlando dei bipoli nell'art. 2, si è visto che il legame tra tensione e corrente è definito anche nel segno, una volta fissati i versi positivi per tensione e corrente. Nel caso della legge di Faraday, stabilito come verso positivo per il flusso quellodeterminato dal segno di cosa, dove a è l'angolo tra il vettore e la normale alla superficie, si è scelto come verso positivo sul contorno quello uscente dal pià¹ della fem indotta. La scelta è arbitraria e corrisponde al senso di rotazione di una vite destrogira che avanza secondo il verso positivo assegnato alla normale e si deve al fatto che una corrente con quel verso produce un campo magnetico orientato come la normale.



La legge è così scritta:

$$e(t)= - dF_C(t)/dt \quad 10.\ 6$$

Il segno meno evidenzia che l'eventuale corrente dovuta alla f.e.m. indotta, dà origine ad *un campo magnetico opposto alla variazione che lo ha prodotto.* E' la *legge di Lenz* , prevedibile per il fatto che la tensione indotta assume un valore finito. Se cosìnon fosse, se cioè la corrente indotta producesse un campo magnetico concorde con la variazione che ne è la causa, il fenomeno si autoesalterebbe determinando impossibili tensioni infinite. La legge di Lenz è il principio di azione e reazione elettromagnetico.

Forza magnetomotrice (f.m.m.), campo magnetico (H), permeabilità (m)

L'induzione **B** è la grandezza che quantifica l'effetto magnetico. La sua "causa" tecnica è l'intensità di corrente, anche nel caso del magnete permanente, che deve la sua azione alla struttura delle sue microcorrenti molecolari.

Una qualsiasi corrente elettrica produce un campo magnetico ma le strutture geometriche che lo potenziano a parità di corrente sono le spire, cioè il numero di giri completi equiversi, N, che la corrente I compie. Il prodotto **N·I** è detto forza magnetomotrice (fmm) e si misura in A (comunemente si dice *amperspire*). La grandezza che in ogni punto dipende unicamente dalle amperspire e dalla loro distribuzione geometrica, generalmente indicata con **H,** si chiama campo magnetico, e la sua unità di misura è *l'ampere diviso metro*, $[A][m]^{-1}$. **H** si può interpretare, tecnicamente, come causa di B. L'"effetto" **B** dipende dal mezzo in cui agisce la causa secondo una relazione del tipo

$$\mathbf{B=m\cdot H} \quad 10.\ 7$$

m è il parametro caratteristico del mezzo dal punto di vista magnetico: la *permeabilità assoluta*. La sua unità di misura, deducibile dalla relazione, è l'[W][s][m]$^{-1}$. L'impulso di resistenza[W][s] è l' *henry* [H], unità di misura del coefficiente di autoinduzione **L** che lega la corrente al flusso magnetico prodotto

$$\mathbf{F_c = L \cdot I}. \quad 10.\ 8$$

Se il mezzo è il vuoto la permeabilità assoluta vale $m_0 = 4p \cdot 10^{-7}$ H/m

Si definisce permeabilità relativa il rapporto tra la permeabiltà assoluta del mezzo e la permeabilità assoluta del vuoto**:** $\mathbf{m_r = m/m_0}$

Le strutture magnetiche fondamentali

Filo rettilineo

Analizziamo il campo magnetico prodotto da un filo percorso da una intensità di corrente I.

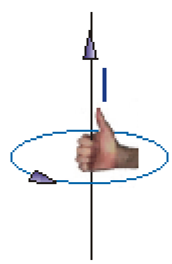


fig. 10. 3

Un ago magnetico sospeso ad un filo assume orientazioni dipendenti dalla posizione. L'inviluppo delle rette di direzione dell'asse dell'ago, dà luogo a circonferenze concentriche con il filo, che stanno su piani ad esso perpendicolari. Sono le linee di forza magnetiche ed il loro verso è quello uscente dal Nord dell'ago.

Il verso della corrente ed il verso della linea di forza magnetica sono associati secondo la regola del pugno destro come mostrato in fig. 10. 3 (dita chiuse concordi con il verso sulla linea)

Su linee maggiormente distanti dal filo, l'intensità della coppia che orienta l'ago è minore.

Se osserviamo che la corrente I si sviluppa in un percorso chiuso, possiamo affermare che linee di corrente (le linee di forza del campo elettrico nel conduttore) sono concatenate con le linee di forza magnetiche.

Per ogni punto si può definire il vettore **H** con direzione e verso coincidenti con quello della tangente alla linea di forza passante per quel punto, ed intensità proporzionale alla coppia che orienta l'ago, proporzionale all'intensità di corrente ed inversamente proporzionale alla distanza dal filo, o, ciò che è lo stesso, inversamente proporzionale alla lunghezza della linea di forza che passa per quel punto. Quindi:

H=I/2pd 10. 9

Si tratta di un'applicazione della circuitazione definita nell'art. 9 (9.3) nota come

teorema di Ampere:

la circuitazione di **H** è uguale alla totale intensità di corrente che attraversa la linea utilizzata per il calcolo.

Suddividendo una qualsiasi linea di forza magnetica in **n** parti, in ciascuna delle quali possa essere ritenuto **H** costante, ed eseguendo la somma degli n prodotti $\mathbf{H_i}\cdot\mathbf{Dl_i}$ dove $\mathbf{Dl_i}$ è la lunghezza dell'i-esima porzione di linea ed $\mathbf{H_i}$ il campo costante in $\mathbf{Dl_i}$, si ottiene la somma algebrica delle intensità di corrente che attraversano la linea di forza. Sono considerate positive le intensità di corrente il cui verso convenzionale è associato al verso della linea di forza come il senso di avanzamento di una vite destrogira rispetto al verso di rotazione. Quindi:

$\mathbf{SH_i}\cdot\mathbf{Dl_i} = \mathbf{S_aI}$ (i=1...n)n 10. 10

Applicando il teorema alla configurazione esaminata, essendo **H** di intensità costante in ogni punto di una linea di forza, si può raccogliere a fattor comune e scrivere

$\mathbf{H}\cdot\mathbf{SDl_i}=\mathbf{I}$ (i=1...n) 10. 11

ma SDl_i è la lunghezza della circonferenza e, indicata con d la distanza del punto dal filo, cioè il raggio della linea di forza, possiamo concludere di nuovo con $H\cdot 2pd=I$.

Solenoide rettilineo

La struttura tecnicamente pià¹ significativa per creare campi magnetici è il solenoide.

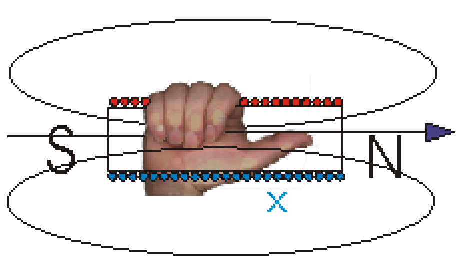


fig. 10. 4

Si ottiene avvolgendo del filo conduttore ad esempio su un supporto prismatico. Il numero di giri completi del filo è il numero di spire N del solenoide. Una corrente I che percorre l'avvolgimento, crea un campo magnetico. Nella fig. 10.4 è illustrato il modo per individuare il verso delle linee magnetiche: chiudendo la mano destra con le dita nel senso della corrente convenzionale (in figura uscente rosso, entrante azzurro) il pollice indica il verso positivo delle linee di forza magnetica, che escono dal polo Nord del solenoide.

Consideriamo una linea di forza concatenata con la totalità delle spire e suddividiamola in due parti: una interna alle spire ed una esterna. Sia H_i il campo magnetico che supponiamo costante nel percorso interno di lunghezza l_i , ed H_e il campo esterno che supponiamo costante per tutta la lunghezza l_e.

Per il teorema di Ampere si ha:

$$\mathbf{H_i * l_i + H_e * l_e = S_a I} \quad 10.12$$

Se si può ritenere $H_e \cdot l_e = 0$, ipotesi valida per i solenoidi lunghi (li/d>10 con d diametro delle spire), essendo la somma algebrica delle correnti pari a $N \cdot I$, si ha $H_i l_i = N \cdot I$ cioè

$$\mathbf{H = N \cdot I / l} \quad 10.13$$

essendo $H=H_i$, $l=l_i$

Il campo magnetico interno ad un solenoide lungo è proporzionale all'intensità di corrente che percorre le spire e la costante di proporzionalità è il numero di spire per unità di lunghezza N/l.

Allo stesso tipo di relazione si giunge con un avvolgimento toroidale. Le spire sono uniformemente avvolte su un supporto a forma di ciambella, *toro* in matematica. Le linee di forza sono circonferenze interne alle spire con lo stesso centro del toro. Considerando la linea di forza media di raggio $R_m=(R_i+R_e)/2$, ed osservando che, per ragioni di simmetria, il campo H ha lo stesso valore in ogni punto si può scrivere, sempre per il teorema di Ampere, $2pR_m \cdot H = N \cdot I$ cioè ancora $H = I \cdot N/l$ (l=2pRm è la lunghezza della linea di forza) che definisce ancora la dipendenza di H dalla I e dal numero di spire per unità di lunghezza.

Principio del generatore

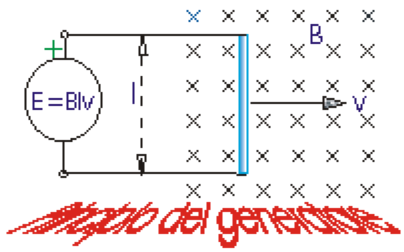
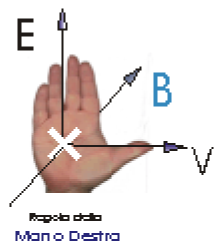


fig. 10. 5

Un conduttore giacente sul piano del disegno, è immerso, per la lunghezza l, in un campo magnetico le cui linee di forza sono perpendicolari al piano nel disegno con verso entrante (x) (fig. 10.5).



Spostando il conduttore trasversalmente, con velocità costante v perpendicolare alla sua lunghezza l ed alle linee di forza magnetiche, si rileva ai suoi capi una differenza di potenziale; la f.e.m. indotta E, è proporzionale al prodotto della lunghezza del conduttore per la velocità . La costante di proporzionalità è una la proprietà del campo dipendente dal mezzo: l'induzione magnetica B.

Il verso della f.e.m. E si ricava dalla regola della mano destra (la freccia in corrispondenza di E indica il +)

Si ha

$$\mathbf{E=B\cdot l\cdot v} \quad 10.\ 14$$

L'analisi dimensionale mostra che l'unità di misura di B è proprio il tesla: $[T]=[V][s][M]^{-2}$

Principio del motore

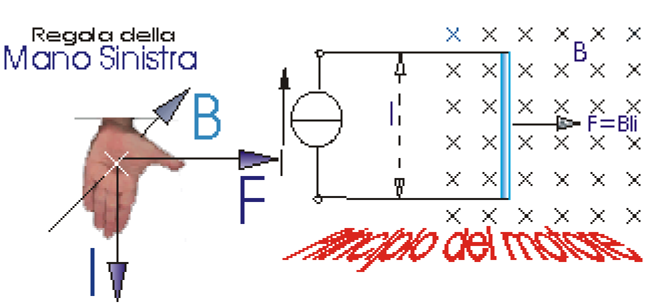


fig. 10.6

Su un conduttore in cui è impressa una corrente di intensità I, all'interno di un campo magnetico, agisce una forza perpendicolare alla sua lunghezza ed alle linee del campo. La sua intensità è proporzionale al prodotto l·I. La costante di proporzionalità è ancora B.

Il verso della forza si ricava con la regola della mano sinistra:

Si ha

$$\mathbf{F=B\cdot l\cdot I} \quad 10.15$$

L'analisi dimensionale per B: $[N][s][M]^{-1}[C]^{-1}$ i=$[V][s][M]^{-1}[M]^{-1}$ =$[V][s][M]^{-2}$ =[T] essendo $[N][C]^{-1}$=$[V][M]^{-1}$

Materiali magnetici

L'effetto magnetico desiderato (forze meccaniche e tensioni indotte) dipende da B e, per la 10.7, a parità di H, dal mezzo. La permeabilità magnetica di alcuni mezzi materiali differisce notevolmente dalla permeabilità del vuoto. Sono i materiali magnetici (ferro, cobalto, nichel, acciai...) che appaiono come degli "amplificatori magnetici" in quanto a parità di corrente che produce il campo (o, meglio di f.m.m NI) producono effetti magnetici tanto pià¹ intensi quanto maggiore è **m**. Il fenomeno è dovuto al fatto che questi materiali sono composti da innumerevoli microscopici magneti (i domini di Weiss) a loro volta raggruppamenti di atomi e molecole con asse magnetico concorde (un'orbita elettronica è una microscopica spira di corrente) che per l'azione del campo impresso H, prodotto dalla fmm NI, si orientano come tanti aghi magnetici, rafforzando il campo magnetico preesistente. Si può allora porre $\mathbf{B=B_0+J}$ dove $\mathbf{B_0}$ è l'induzione comunque esistente anche in assenza di materiale e **J** è la densità di domini che si orientano. Si pone $\mathbf{J}$=c·$\mathbf{H}$, con c detta suscettanza magnetica e si ha per la 10.7 $m=m_0+c$.

I materiali magnetici sono impiegati nella tecnica in quanto con modeste correnti si possono ottenere effetti magnetici notevoli. Per le linee magnetiche, quindi per il flusso magnetico i materiali magnetici sono come i buoni conduttori per la corrente che, con modeste tensioni, consentono l'instaurarsi di notevoli intensità : potremo dire allora che sono degli ottimi "conduttori magnetici". Da qui la possibilità di costruire "circuiti magnetici" che, analogamente ai circuiti elettrici, stabiliscono il percorso delle linee di forza. La fig. 10.7 mostra un circuito magnetico evidenziando l'analogia con il circuito elettrico.

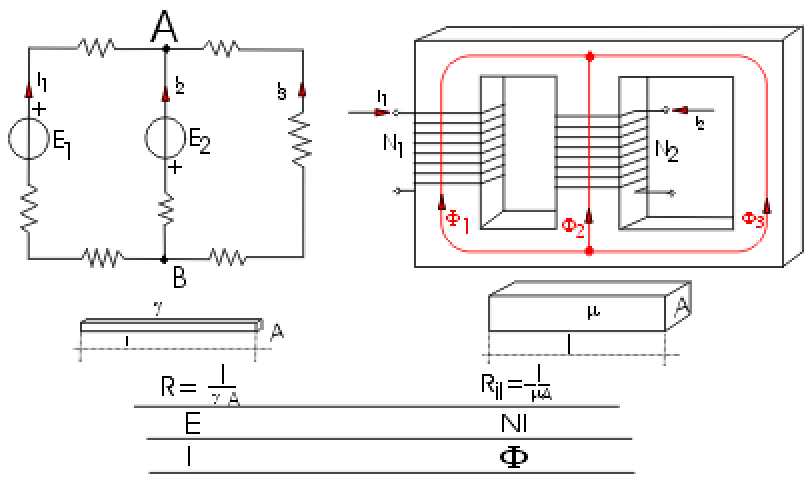


fig. 10. 7

Come un conduttore elettrico ha una resistenza elettrica, cosìil conduttore magnetico ha una resistenza magnetica (Riluttanza); le fem E corrispondono alla fmm NI, le intensità di corrente ai flussi, e si chiama tensione magnetica il prodotto di una riluttanza per il flusso: è la legge di Ohm magnetica.

La differenza sta nella maggiore complessità dei circuiti elettrici e nel comportamento della permeabilità magnetica: mentre per i conduttori la conduttività è praticamente costante, la permeabilità è fortemente dipendente dal campo impresso. Nell'impiego dei materiali magnetici è indispensabile il ricorso alle curve di magnetizzazione B,H. La fig. 10.8 ne mostra tipici esempi.

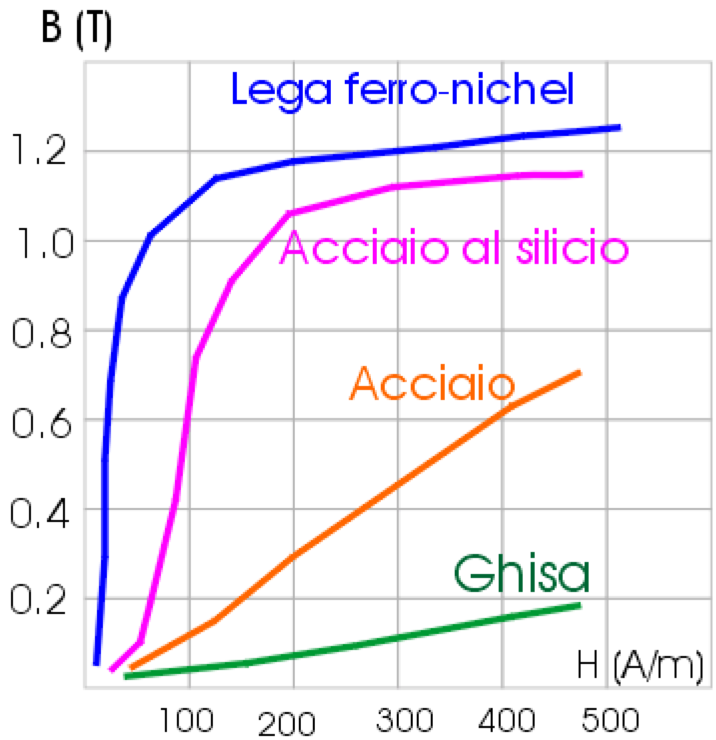


fig. 10. 8

Energia magnetica

Una struttura che produce un campo magnetico è un contenitore di energia magnetica.

Se L ne è il coefficiente di autoinduzione (in henry) ed I la corrente (in A), l'energia magnetica (in joule) è $\mathbf{W_m=0,5*L*I^2}$. L'energia è contenuta nel campo e se B è l'induzione in un punto (in tesla) e m la permeabilità del mezzo, si può definire una energia specifica (in J/m^3): $\mathbf{w_m=0,5*B^2/m}$

Le equazioni di Maxwell

Il comportamento dei campi elettrici e magnetici è descritto da quattro leggi note come equazioni di Maxwell. Nel 1873, Maxwell eliminò un'incongruenza insita nel teorema di Ampere, introducendo il concetto di corrente di spostamento, che portò a sviluppi teorici e tecnici fino ad allora impensabili.

La prima equazione è il teorema di Gauss, che lega il campo elettrico alla sua causa, la carica elettrica: *Il flusso elettrostatico F_D del vettore D (campo elettrico, moltiplicato per la costante dielettrica del mezzo), attraverso una superficie chiusa, coincide con la carica elettrica presente nel volume delimitato dalla superficie.*

Le linee del campo elettrico iniziano nelle cariche positive, sorgenti del campo e finiscono nelle negative, pozzi del campo.

$$\mathbf{F_D=Q} \quad 10.\ 16$$

La seconda afferma *che il flusso del vettore induzione magnetica F $_B$ attraverso una superficie chiusa è sempre nullo.* B è un vettore solenoidale: le linee magnetiche sono chiuse, non hanno un inizio ed una fine, non esistono monopoli magnetici.

$$\mathbf{F_B=0} \quad 10.\ 17$$

La terza equazione è la legge di Faraday-Lenz*: la circuitazione del vettore campo elettrico è uguale alla velocità di variazione, cambiata di segno, del flusso magnetico che attraversa una qualunque superficie individuata dalla linea di calcolo della circuitazione e corrisponde alla f.e.m indotta E*

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad 10.\ 18$$

Infine la quarta legge corrisponde al teorema della circuitazione magnetica di Ampere, generalizzato da Maxwell con la correzione introdotta con il concetto di corrente di spostamento. Il teorema di Ampere affermava che la circuitazione di H era legata all'intensità di corrente di conduzione intercettata da una superficie arbitraria avente come contorno la linea di calcolo. La legge presentava un difetto quando il filo percorso da corrente era interrotto da un condensatore. In questo caso, scegliendo una superficie che avesse come contorno la linea che abbracciava il conduttore ma che passava tra le armature del condensatore, la corrente di conduzione era nulla ma non la circuitazione. Maxwell osservò che la superficie non intercettava alcuna corrente di conduzione ma intercettava le linee del campo elettrico esistente tra le armature del condensatore variabile anche con una corrente costante per il crescere della carica sulle armature del condensatore. Introdusse allora nella formula di Ampere il termine correttivo.

$$I_S = \frac{d\Phi_D}{dt} \quad 10.\ 19$$

che chiamò *corrente di spostamento*, dove F_D è il flusso del campo elettrico nel condensatore moltiplicato per la costante dielettrica.

Arrivò cosìalla formulazione della legge.

La circuitazione di H (C_H), è uguale alla somma della corrente di conduzione che attraversa la linea e della corrente di spostamento.

$$\mathbf{C_H = I + I_S} \quad 10.\ 20$$

La corrente di spostamento I_S tra le armature del condensatore ha lo stesso verso della corrente di conduzione che arriva alle armature: è, come dire, la continuazione della corrente di conduzione con altri mezzi.

Onde elettromagnetiche

Le 4 leggi sono state espresse in forma integrale, riguardante un volume finito, ma possono essere espresse in forma puntuale, cioè come proprietà del punto, co equazioni che ricorrono ai concetti di rotore e divergenza. Non è questa la sede per i dettagli matematici ma è il caso di ricordare che proprio la loro manipolazione matematica mostrava l'esistenza di campi elettrici e magnetici, l'uno causa dell'altro, che soddisfacevano alle equazioni con la struttura di una equazione d'onda che si propagava alla velocità

$$u = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad 10.\ 21$$

Il valore corrispondeva sorprendentemente alla velocità della luce che, nel vuoto, assume il valore di circa 300000 km/s per cui si comprese che la luce altro non era che un ben preciso insieme di onde elettromagnetiche. Il campo elettromagnetico è un contenitore di energia elettrostatica e magnetica e le onde elettromagnetiche si proposero come mezzo per trasmettere energia a qualsiasi distanza senza supporto materiale: Hertz, Marconi, e Tesla tradussero in pratica l'idea, e per noi è diventato un fatto quasi scontato.

La possibilità di trasmettere energia è intrinseca alle stesse definizioni di campo elettrico **K** e campo magnetico **H**. Il modulo del loro prodotto esterno ha le dimensioni fisiche di una potenza per unità di volume $[W][M]^{-3}$, e definisce il vettore di *Poynting*

$$\mathbf{P = K x H}, \quad 10.\ 22$$

il cui flusso attraverso una superficie chiusa rappresenta la variazione del contenuto energetico del campo elettromagnetico totale interno alla superficie.

Nella fig. 10.9 sono mostrati i vettori istantanei di campo elettrico e magnetico sinusoidali di pulsazione w e sono riportate alcune formule che descrivono le modalità della propagazione.

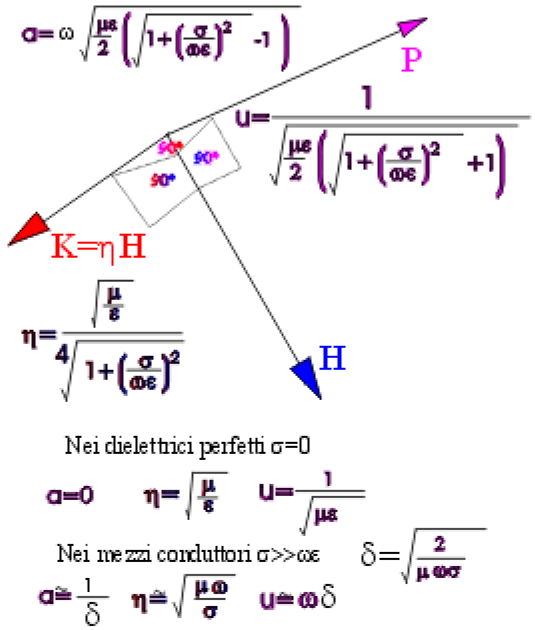


fig. 10. 9

K ed H sono perpendicolari tra loro ed alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica, indicata dal vettore di Poynting **P**; s,m, e sono, rispettivamente, conduttività , permeabilità e costante dielettrica del mezzo. La velocità di propagazione dell'onda è u, la lunghezza d'onda l=2pu/w . Il rapporto h=K/H è detto *impedenza intrinseca* del mezzo. Le ampiezze di K ed H si attenuano nella direzione di propagazione secondo il fattore $e^{-x/d}$, dove x è la distanza dal punto iniziale considerato, e d è chiamato *profondità di penetrazione:* in pratica dopo *5* d, li si può ritenere nulli. Nei dielettrici perfetti, quindi nel vuoto, s=0 per cui l'attenuazione, **a,** è nulla quindi d infinita (a = 1/d): le onde elettromagnetiche, alla velocità della luce, raggiungono qualsiasi distanza.

Nel rame (s=5.8·10^7 S/m con m=m0) si ha invece d=0,066/f ^{½}. Alla frequenza di 50 Hz d=0,00933 m = 9,33 mm; a 100 MHz d=6,61 mm, quindi dopo 33 mm il campo elettromagnetico si è praticamente annullato.

Conclusioni

L'articolo chiude il corso di base di Elettrotecnica che Electroportal.net ha proposto per "Gie" con un riepilogo dei concetti di un ramo della fisica che ha caratterizzato la tecnica industriale del XX secolo, che propone all'impiantista elettrico una riflessione su di essi al fine di arricchire il suo lavoro, di una soddisfazione intellettuale che, spesso, egli si rammarica di non aver saputo cogliere durante lo studio scolastico.