

ATTI
DELLA
REALE ACCADEMIA NAZIONALE
DEI LINCEI

ANNO CCCXXI
1924

SERIE QUINTA

RENDICONTI

Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali.

VOLUME XXXIII.

1° SEMESTRE.



ROMA

TIPOGRAFIA DELLA R. ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
PROPRIETÀ DEL DOTT. PIO BEFANI

1924

Fisica. — *Su l'energia potenziale dei circuiti magnetici che comprendono materiali imperfettamente polarizzabili.* Nota del Corrispondente L. LOMBARDI ⁽¹⁾.

In una recente Nota dell'ing. G. H. Perrin ⁽²⁾ sono discusse le condizioni per ottenere da una calamita permanente, col minimo volume di materiale, ed entro uno spazio prestabilito, un campo magnetico, di determinata intensità, ossia una determinata quantità di lavoro di polarizzazione esterna. La condizione si ricava tenendo presente che, in assenza di qualsiasi forza magnetomotrice, deve annullarsi la circuitazione del campo magnetico e d'altronde il flusso di induzione si deve conservare costante, onde, se si considera un circuito della forma più semplice, costituito per es. da un toro di materiale magnetico, solcato in direzione radiale da un breve interferro di spessore costante, e se si prescinde dallo sparpagliamento esterno delle linee di induzione, detti H ed h i valori della forza magnetica e B e b quelli della induzione negli spazi occupati dal materiale magnetico e dall'aria, L ed l le lunghezze, S ed s le sezioni rispettive, deve risultare:

$$H B L S = - h b l s = - h^2 l s.$$

Il 2° membro misura, a meno del divisore 8π , il lavoro potenziale che compete allo spazio d'aria, e che si può denominare *energia di polarizzazione esterna*. Affinchè essa si consegua col minimo volume di sostanza magnetica, deve risultare massimo il prodotto $H B$, e quindi:

$$\frac{B}{H} = - \frac{dB}{dH}.$$

Poichè la intensità del campo, a cui è soggetto il materiale in questa condizione, nasce unicamente dalle masse magnetiche libere, le quali a loro volta, se la magnetizzazione è uniforme, si manifestano solo su le facce terminali con una densità uguale alla intensità di magnetizzazione, questa deve assumere un valore finale I_r per cui, nel punto corrispondente del 2° qua-

⁽¹⁾ Presentata nella seduta del 3 febbraio 1924.

⁽²⁾ Revue Générale de l'Electricité, 15 dicembre 1923.

drante del ciclo di isteresi (fig. 1) che si estende fra il punto di ordinata I_r su l'asse delle ordinate e quello di ascissa $-H_c$ su quello delle ascisse, la tangente alla curva e la congiungente del punto con l'origine formino

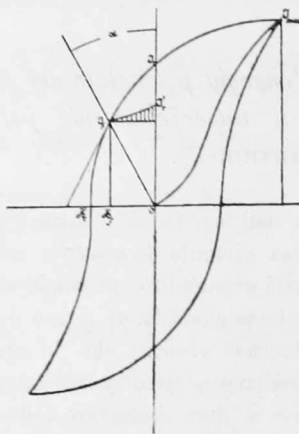


FIG. 1.

con l'asse delle ascisse un angolo eguale. Se quel tratto di ciclo si confondesse con una linea retta, dovrebbe risultare:

$$I_r = \frac{1}{2} I_r ; \quad H_r = -\frac{1}{2} H_c .$$

Attribuendo alla forza demagnetizzante un valore medio costante in tutta la estensione del nucleo, ciò che non vale a rigore se non per gli ellissoidi uniformemente magnetizzati, la intensità del campo dipende da quella stessa di magnetizzazione, oltre che dal fattore detto comunemente di smagnetizzazione N , che è strettamente subordinato allo spessore dell'interferro, ed al rapporto fra le dimensioni del nucleo; questo rapporto pertanto deve a sua volta prestabilirsi in modo opportuno, perchè sia verificata quella condizione di minimo volume, tenendo conto della qualità del materiale, da cui dipende il rapporto $\frac{I_r}{H_c}$.

Ora nella Nota dell'ing. Perrin non è cenno del lavoro, necessario per portare il materiale magnetico dallo stato neutro a quella condizione finale, nè della parte che in esso rimane immagazzinata allo stato potenziale, in forma di energia interna di polarizzazione.

Sebbene la determinazione di queste non abbia grande importanza pratica, per quanto riguarda le calamite artificiali, le quali sogliono allestirsi e stabilizzarsi con procedimenti assai complicati, la questione non sembra priva

di interesse dal punto di vista teorico, e trova applicazione in altri problemi tecnici.

Il lavoro necessario per la polarizzazione di un circuito magnetico si calcola in base a la teoria dello spostamento, e, nel caso della calamita considerata, partendo dallo stato neutro, risulta:

$$A = \frac{1}{4\pi} \left[L S \int_0^{B_f} H dB + l s \int_0^{h_f} h dh \right].$$

Poichè per definizione, posto eguale ad 1 il coefficiente della legge di Coulomb:

$$B = H + 4\pi I$$

risulta:

$$A = \frac{1}{8\pi} \left[L S H_f^2 + l s h_f^2 \right] + L S \int_0^{I_f} H dI.$$

Quest'ultimo termine rappresenta il vero lavoro di magnetizzazione del nucleo metallico, il quale in massima parte viene dissipato in forma termica, in quanto si deve alla parte irreversibile del fenomeno, rappresentata da quella parte dell'area di isteresi, che si comprende fra la linea di prima magnetizzazione $O I_{max}$, la linea di ritorno $I_{max} I_f$, l'asse delle ordinate, e la parallela all'asse delle ascisse tracciata per il punto I_f . In verità, se si compensasse H_f con un campo positivo gradualmente crescente, fino ad annullare quello interno risultante, si descriverebbe una nuova e diversa porzione di ciclo $I_f I_f'$, lungo la quale, essendo la forza risultante negativa, e positiva la variazione di I , una piccola parte del lavoro precedente, rappresentata dall'area tratteggiata, potrebbe ricuperarsi.

Il primo e il secondo termine misurano l'energia, inerente al campo di forza magnetica, immagazzinata nella parte metallica e in quella esterna del circuito magnetico in forma reversibile, la quale nel suo complesso rappresenta la parte più importante dell'energia potenziale del sistema, e se si ritiene per semplicità, come è lecito almeno in via di approssimazione, subordinatamente alle fatte restrizioni:

$$H_f = -N I_f ; \quad h_f = (4\pi - N) I_f \quad (1)$$

per l'annullarsi della circuitazione dev'essere:

$$N = 4\pi \frac{l}{L + l}.$$

(1) Questa ultima espressione si deduce dalla eguaglianza della induzione nell'aria e nel nucleo metallico, supponendo costante la sezione del circuito.

Se l'interferro è molto piccolo, può ritenersi:

$$N = 4\pi \frac{l}{L} ; \quad h_f = 4\pi I_f ;$$

ed in tale condizione il lavoro di polarizzazione interna sta a quello esterno nel rapporto $\frac{l}{L}$.

Nelle calamite artificiali a breve interferro la energia potenziale si può ritenere adunque in massima parte accumulata nello spazio d'aria compreso fra le facce polari.

Tale energia si deve intendere conferita al sistema a spese di un lavoro elettrico equivalente, quando la magnetizzazione è prodotta mediante una spirale percorsa da corrente, mentre resta inalterata la configurazione geometrica del sistema, e la ricuperazione parziale di essa si può ottenere in quanto ogni diminuzione di flusso genera nel circuito elettrico concatenato una f. e. m., la quale si oppone alla variazione della corrente.

L'energia stessa può d'altronde essere anche conferita e ricuperata in forma meccanica, se ad arte si varia la grossezza dell'interferro mediante il movimento relativo dei nuclei magnetici, sotto l'azione o il contrasto di forze motrici o resistenti esterne.

Se p. es. si concepisce il circuito magnetico primieramente chiuso nel ferro, in forma di due semianelli perfettamente combacianti, si che non si sviluppi alcuna massa libera alle superficie di contatto, la magnetizzazione I_r potrà essere prodotta con la sola spesa del lavoro d'isteresi $O I_{max} I_r$. Se ora mediante una sollecitazione esterna si discostano i due nuclei, vincendo l'attrazione interna $2\pi I^2 s$ lungo uno spazio complessivo l , il lavoro speso viene in parte impiegato a costituire la energia esterna di polarizzazione, che nello stato finale assume la espressione sopra calcolata; e in parte a smagnetizzare i nuclei dalla intensità I_r alla I_f . Se si potesse ritenere la forza demagnetizzante uniforme, e semplicemente misurata da $-NI$, quest'ultima parte verrebbe data da:

$$-NLS \int_{I_r}^{I_f} I dI = \frac{1}{2} NLS (I_r^2 - I_f^2).$$

Ragguagliando per semplicità il fattore smagnetizzante N al valore $4\pi \frac{l}{L}$, e ricordando che il campo nell'interferro equivale per approssimazione nello stato finale a $4\pi I_f$, la somma di quel due lavori viene approssimativamente misurata da $2\pi l s I_f^2$, ed in massima è appunto bilanciata dal lavoro meccanico speso, se si prescinde dalla piccola quantità supplementare, immagazzinata in forma potenziale nel nucleo metallico, e se si trascura la graduale diminuzione della forza attrattiva lungo l'intervallo dello spo-

stamento. Attesochè il lavoro per la variazione del momento magnetico del nucleo non può essere recuperato se non in parte, ogni modificazione ciclica dell'interferro contribuisce alla dissipazione di una parte dell'energia potenziale di polarizzazione, e, in assenza di una forza magnetomotrice applicata dall'esterno, vale a diminuire il momento residuo finale, onde si concepisce la possibilità di provocare la smagnetizzazione graduale del ferro con semplici procedimenti meccanici.

Il ragionamento si estende ora senza difficoltà ai circuiti, sottoposti all'azione di una forza magnetomotrice, tenendo conto della nuova distribuzione del campo, che assume una circuitazione finita, e del lavoro necessario per conferire ai diversi mezzi la loro polarizzazione attuale. Se si prescinde dal caso di saturazioni molto forti, il lavoro di polarizzazione del ferro risulta in gran parte consumato per isteresi, onde la massima parte dell'energia potenziale compete ancora agli spazi d'aria, ed essa può assumere entità considerevoli nelle grandi calamite moderne, impiegate per la cernita e il sollevamento dei materiali ferrosi, e nelle macchine dinamo elettriche, nelle quali si sviluppano fra le estremità polari di grande superficie campi di notevole intensità. Con valori della induzione dell'ordine di 5000 e 10000 unità lo sforzo tra le superficie magnetiche affacciate si ragguaglia ad 1 e 4 kg. per cmq. e per nuclei di parecchi demq. di superficie può raggiungere centinaia e migliaia di kg.

Nelle dinamo, munite di interferri notevoli, l'energia di polarizzazione si valuta adunque a decine e centinaia di kilogrammetri, e, se si libera improvvisamente, nell'atto per es. di un corto circuito, che riduca notevolmente il flusso, essa può originare correnti e fenomeni di riscaldamento pericolosi. Sotto questo riguardo le moderne generatrici asincrone, munite di interferri piccolissimi, si comportano vantaggiosamente di fronte alle macchine comuni. In queste ogni dissimmetria degli interferri, fra nuclei polari egualmente eccitati, produce d'altronde una corrispondente dissimmetria dei campi e delle sollecitazioni magnetiche, lo squilibrio delle quali può originare gravi sforzi sull'asse, onde nel calcolo delle parti meccaniche assume una particolare importanza la considerazione delle possibili eccentricità.

A loro volta le calamite, che siamo abituati a considerare come permanenti, non si possono ritenere veramente tali, se non si mantengano in condizioni magnetiche invariate, sottraendole all'azione di campi interni ed esterni perturbatori.