

KAPP - TRASFORMATORI

GISBERT KAPP



TRASFORMATORI

A CORRENTE

ALTERNATA MONOFASE E TRIFASE



L. 10

GISBERT KAPP

TRASFORMATORI

A CORRENTE

ALTERNATA MONOFASE E TRIFASE

TEORIA, COSTRUZIONE ED APPLICAZIONE DEI MEDESIMI
con 165 figure

TRADUZIONE ITALIANA SULLA SECONDA EDIZIONE TEDESCA

PER CURA DEGLI INGEGNERI

RICCARDO LUZZATI e UGO RUSSI

della Casa **GANZ E COMP.** di Budapest.



TORINO

UNIONE TIPOGRAFICO-EDITRICE

(Già Ditta Pomba e C.)

1901

REVUE DE LA

PROPRIETÀ LETTERARIA

REVUE DE LA

PREFAZIONE

ALLA SECONDA EDIZIONE TEDESCA



L'ORDINAMENTO generale del libro è rimasto identico a quello della prima edizione; sono stati però aggiunti due nuovi capitoli e gli altri sono stati ampliati in modo che l'opera è stata ingrandita di più del 40 %. Le curve rappresentanti le perdite nel ferro sono state sostituite da altre corrispondenti ai migliori materiali che si possono ottenere attualmente. Così pure vi sono date delle curve separate per le perdite dovute all'isteresi ed alle correnti parassite. La teoria dell'aumento di temperatura di corpi riscaldati elettricamente è stata aggiunta al terzo capitolo come complemento dei risultati sperimentali. Completamente nuovo è pure il calcolo *a priori* della caduta induttiva di tensione ed il concetto dell'eccitazione trasportata. Quest'ultimo non è assolutamente indispensabile per la ricerca delle condizioni di lavoro di un trasformatore; l'ho però voluto considerare in questo libro, perchè esso costituisce il legame logico fra i soliti diagrammi di lavoro dei trasformatori ed il diagramma circolare ideato dal Heyland per i motori asineroni.

È nuovo pure il concetto dei rocchetti equivalenti, riportato al capitolo decimo, per mezzo del quale riesce molto facilitata la trattazione dei problemi relativi alla combinazione di trasformatori e circuiti. In merito alle scariche attraverso l'isolamento dei cavi elettrici, mi sono in parte servito di un articolo su tale argomento apparso sull'*Elektrotechnische Zeitschrift* verso la fine dello scorso anno.

Berlino, Aprile 1900.

GISEBERT KAPP.

I TRASFORMATORI ELETTRICI

CAPITOLO PRIMO

Natura dei trasformatori. — Dispersione magnetica. — Disposizione dei rocchetti. — Determinazione della formola fondamentale.

Natura dei trasformatori. — Quando in un rocchetto si modifica il numero di linee di forza N che lo attraversano, viene in esso indotta una f. e. m. proporzionale al grado della variazione in rapporto al tempo in cui la variazione avvenne $\left(\frac{dN}{dt}\right)$ ed al numero n di spire. Se viceversa si fa attraversare un rocchetto da una corrente, questa produce un campo di linee di forza, il cui numero è proporzionale, entro certi limiti, al

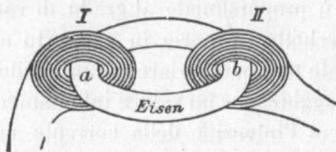


Fig. 1.

prodotto dell'intensità della corrente per il numero di spire del rocchetto, cioè alle ampère-spire. Modificando la corrente cambia pure il numero delle linee di forza; se adunque si dispongono due rocchetti in modo che le linee di forza prodotte nell'uno da una corrente di intensità variabile attraversino completamente o parzialmente l'altro rocchetto, in quest'ultimo verrà indotta una f. e. m. Una simile disposizione è rappresentata nella figura 1. Intorno ad un anello di ferro sono avvolti i due rocchetti I e II. Se si fa attraversare il rocchetto I da una corrente, si formerà un campo di linee di forza, che si trova in parte nell'anello di ferro ed in parte nell'aria, che circonda il rocchetto I. Il campo avrà quindi la sua massima intensità nell'interno del rocchetto I, cioè in a , mentre nell'interno del rocchetto II, cioè in b , l'intensità del campo sarà minima. L'anello di ferro agisce in certo qual modo come un conduttore delle linee di forza, inquantochè esso produce il concatenamento dei due rocchetti a mezzo di un campo magnetico comune. Un tale concatenamento ha luogo anche senza intermediario dell'anello di ferro, se i rocchetti sono disposti oppor-

tunamente nello spazio. Così con le disposizioni indicate, anche senza l'impiego dell'anello di ferro una parte del campo prodotto dalla corrente nel rocchetto I attraverserebbe il rocchetto II; la sua intensità però sarebbe molto piccola. Anche disponendo i rocchetti l'uno sull'altro, il campo attraverserebbe il rocchetto II e la sua intensità sarebbe maggiore che nel caso precedente, tuttavia non eguaglierebbe quella che si ha impiegando l'anello di ferro. Se però, senza impiegare del ferro, si dispongono i rocchetti in modo che l'asse del rocchetto I giaccia nello stesso piano di quello del rocchetto II o viceversa, nessuna delle linee di forza prodotte dalla corrente in I attraverserà il rocchetto II, ed una variazione dell'intensità del campo non potrà produrre alcuna f. e. m. L'impiego del ferro quale mezzo di concatenamento non è quindi assolutamente necessario, esso offre però il vantaggio, che in primo luogo l'azione induttrice dell'un rocchetto sull'altro viene notevolmente rinforzata, ed in secondo luogo, che quest'azione non dipende in così alto grado dalla posizione reciproca dei due rocchetti. Un tale apparecchio costituito da due rocchetti con un nucleo comune in ferro chiamasi *trasformatore a corrente alternata*.

Abbiamo visto che la f. e. m. indotta nel rocchetto II, chiamato anche rocchetto secondario, è proporzionale al grado di variazione dell'intensità della corrente nel rocchetto primario in rapporto al tempo. Poichè ora l'intensità della corrente non può variare sempre nello stesso senso (perchè allora essa dovrebbe raggiungere un valore infinitamente grande), si devono alternare periodi in cui l'intensità della corrente cresce con periodi in cui essa diminuisce. Se quindi per intensità della corrente crescente nel rocchetto secondario si produce una f. e. m. in una determinata direzione, quando l'intensità diminuisce la f. e. m. deve avere direzione opposta; e vediamo quindi, che le variazioni dell'intensità della corrente primaria, anche se la direzione di questa non viene modificata, producono alternativamente f. e. m. positive e negative nel rocchetto secondario. Questa tensione alternata produce quindi in un filo che congiunga le estremità del rocchetto una corrente alternata. Noi possiamo dunque trasformare una corrente continua pulsativa in corrente alternata, non mai in corrente continua. Invece di una corrente continua pulsativa possiamo però anche mandare nel rocchetto primario una corrente alternata modificandola in un'altra corrente alternata, la cui tensione dipende da quella della corrente primaria e dal rapporto tra il numero delle spire dei due rocchetti.

Dispersione magnetica. — Prima di entrare maggiormente nel calcolo della tensione, vogliamo considerare il modo di comportarsi del campo in rapporto ai due rocchetti. Poichè le linee di forza non corrono esclu-

sivamente nel ferro, ma anche nell'aria, non tutte le linee che attraversano il rocchetto I in *a* attraversano pure il rocchetto II in *b*, e la differenza sarà tanto maggiore quanto più sono distanti i rocchetti tra loro e quanto maggiore è la resistenza che oppone il ferro dell'anello al passaggio delle linee di forza (che in seguito chiameremo flusso di forza). Per effetto di questa resistenza alcune linee di forza che in *a* scorrono nel ferro verranno spinte fuori da esso da ambe le parti del punto *a* e si chiuderanno nell'aria, cioè esternamente al rocchetto II. Queste linee di forza che si disperdono nell'aria (da ciò l'espressione dispersione magnetica), non contribuiscono affatto alla formazione di una f. e. m. in II quando si modifichi il flusso di forza per variazione della corrente in I o per effetto di una corrente alternata che attraversi il rocchetto I. Quanto maggiore è la dispersione magnetica dell'apparecchio e tanto minore è la f. e. m.

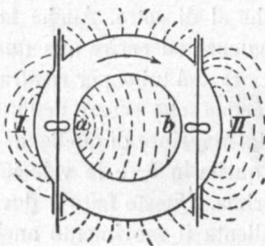


Fig. 2.

indotta nel rocchetto II. Per poter ora stabilire le condizioni che determinano la dispersione magnetica, supponiamo che in I scorra una corrente continua ed in II non scorra alcuna corrente, ovvero una corrente continua, diretta però in modo, che contrasti il campo prodotto dal rocchetto I. Il rocchetto I produce adunque un flusso di linee di forza in una determinata direzione attraverso l'anello di ferro. Se il rocchetto II non è percorso da corrente, il flusso di forza non ha da vincere che la resistenza magnetica del ferro e quindi relativamente poche delle linee di forza che attraversano il rocchetto I in *a* abbandoneranno il ferro per scorrere attraverso l'aria. Se però il rocchetto II è percorso anche da corrente, esso deve formare un flusso di forza di direzione contraria che si oppone quindi a quello prodotto dal rocchetto I e di conseguenza si avrà una dispersione maggiore di linee di forza che esciranno dal ferro per chiudersi attraverso l'aria.

Questo fenomeno si può chiarire facilmente per analogia con un fenomeno idraulico. Immaginatoci un tubo annulare fatto di materia porosa (fig. 2) ripieno d'acqua ed immerso nell'acqua. A mezzo di un mulinello I venga mantenuta l'acqua in continua circolazione nel tubo

in direzione della freccia. Il molinello deve produrre una differenza di pressione che serve a vincere la resistenza d'attrito. Al di sopra del molinello I si ha adunque una pressione maggiore che al disotto e perciò sortirà dell'acqua dai pori della metà superiore del tubo per rientrare dai pori della metà inferiore, come è rappresentato nella figura dalle linee punteggiate. La velocità dell'acqua nell'interno del tubo deve essere quindi maggiore in a che in b . Se il tubo è largo, la pressione necessaria a vincere la resistenza d'attrito non è grande e quindi la dispersione dell'acqua attraverso i pori, come pure la differenza di velocità tra a e b , sono piccole. Supponiamo ora d'aver in b un secondo molinello II perfettamente libero di girare; esso verrà messo in movimento dall'acqua senza che si aumenti per questo la dispersione. Se però diminuiamo la libertà di movimento del molinello II ricavando lavoro dal suo albero, esso opporrà tosto una resistenza al movimento dell'acqua ed al di sopra di b si avrà una pressione maggiore che al di sotto. Anche la differenza di pressione in a aumenterà di conseguenza ed escirà una quantità maggiore d'acqua dai pori della parte superiore del tubo per rientrare da quelli della parte inferiore. La quantità d'acqua che scorre nell'unità di tempo in a deve quindi essere notevolmente maggiore di quella in b , cioè la velocità in a deve essere maggiore di quella in b , e la velocità di rotazione del molinello II sarà minore di prima. Questo fatto è dovuto a due cause, e cioè primo, perchè il carico rallenta il movimento anche mantenendo costante la velocità dell'acqua, e, secondo, perchè la velocità dell'acqua è diminuita per effetto della dispersione. Per diminuire la perdita di velocità causata dalla seconda delle ragioni suddette si può disporre il molinello II il più possibile vicino al molinello motore I. Supponiamo quindi disposto in luogo del tubo poroso il nostro anello di ferro, che costituisce per le linee di forza un canale a pareti porose, al posto del molinello I il rocchetto primario I ed al posto del molinello II il rocchetto secondario II, e risulta facilmente come il flusso di forza che attraversa questi rocchetti corrisponda alla velocità dell'acqua nel tubo, e come esso debba divenire minore in b quanto maggiore è l'intensità della corrente in II.

La disposizione rappresentata nella figura 1 è quindi poco opportuna per un trasformatore, perchè essa risponde molto imperfettamente allo scopo di produrre, cioè, nel rocchetto secondario, una corrente di grande intensità ed una tensione possibilmente elevata. A questa meta ci avviciniamo maggiormente disponendo i rocchetti su tutta la superficie dell'anello in modo che ciascun rocchetto ricopra completamente una metà dell'anello (fig. 3). Come si vede facilmente, con questa disposizione la pressione magnetica che cerca di far uscire dall'anello di ferro le linee di forza, non ha più il suo valore massimo su tutta la metà dell'anello, ma essa ha questo valore solamente nei punti c e d e va diminuendo

ai due lati di questi punti riducendosi a zero in a e b . Il campo di dispersione è quindi quantitativamente minore, e sia per la suddivisione di esso, sia per quella degli avvolgimenti riesce di molto diminuita la sua azione nociva in confronto di quella corrispondente alla disposizione rappresentata in figura 1.

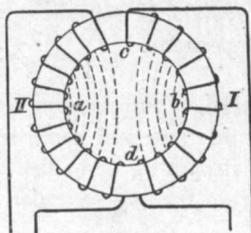


Fig. 3.

Si può rappresentare in via approssimativa graficamente la disposizione del campo di dispersione nell'interno dell'anello, quando si pensi che la pressione magnetica in un punto qualunque è proporzionale al numero delle ampère-spire che si possono contare fino a quel punto. Supponiamo ora che le due metà dell'anello sieno avvolte egualmente e che la direzione della corrente sia tale, che la pressione nel quadrante superiore di sinistra sia diretta dal ferro all'aria e nel quadrante inferiore di sinistra abbia la direzione opposta, cioè dall'aria al ferro. La stessa disposizione ha allora

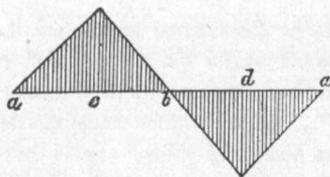


Fig. 4.

luogo nei due quadranti di destra. Supponiamo ora l'anello tagliato in a e sviluppato secondo una retta, allora il diagramma della pressione magnetica che produce la dispersione avrebbe la forma rappresentata dalla figura 4. Le ordinate positive rappresentano una pressione dal ferro all'aria, cioè un polo nord, e le ordinate negative un polo sud. Nella figura 3 sono state segnate con tratti punteggiati le linee di forza che attraversano l'aria nell'interno dell'anello; oltre a queste si hanno naturalmente linee di dispersione anche all'esterno dell'anello. Se facciamo l'ipotesi, con una approssimazione grossolana, che la resistenza magnetica sia la stessa lungo ogni percorso delle linee di forza, cioè che il numero di linee di

forza uscenti o entranti nell'unità di superficie dell'anello sia proporzionale alla pressione magnetica nel punto considerato, la dispersione totale sarebbe rappresentata dalla superficie tratteggiata nella figura 4. L'ipotesi fatta però è assolutamente falsa; siccome tuttavia pel momento non si tratta che di una considerazione superficiale, non è necessario fare uno studio più minuzioso sul modo di variare della resistenza magnetica e possiamo senz'altro supporre che la superficie tratteggiata della figura 4 rappresenti il campo di dispersione.

Disposizione dei rocchetti. — Supponiamo ora l'avvolgimento disposto in modo, che in luogo di due rocchetti semicircolari si abbiano sei rocchetti, ciascuno dei quali ricopra un sesto dell'anello e che ciascun rocchetto primario sia compreso fra due secondari (fig. 5): si verrà così a

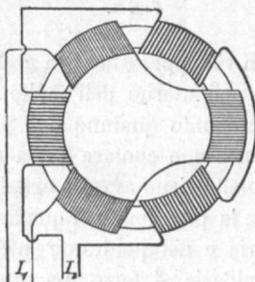


Fig. 5.

diminuire notevolmente la dispersione magnetica. La massima pressione magnetica viene a trovarsi anche qui nei punti di contatto dei rocchetti primari con quelli secondari; siccome però il numero di spire di ciascun rocchetto è ridotto a $\frac{1}{3}$, anche il valore massimo della pressione magnetica sarà ridotto ad un terzo del valore che si aveva prima. Anche la superficie attraverso la quale possono uscire le linee di dispersione è ridotta ad $\frac{1}{3}$, il totale campo di dispersione importa quindi $\frac{1}{3} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{9}$ del valore che aveva prima. Così se avessimo suddiviso ciascun avvolgimento in quattro invece che in tre parti è facile vedere come il campo di dispersione risulterebbe $\frac{1}{16}$ di quello corrispondente alla disposizione della figura 3. È quindi possibile, a mezzo di una sufficiente suddivisione degli avvolgimenti, diminuire fino ad un qualsivoglia valore il campo di dispersione, e lo si potrebbe anche evitare completamente, spingendo la suddivisione tanto oltre da avere gli avvolgimenti primario e secondario l'uno dentro l'altro. Ciò riesce però impossibile causa l'isolamento che si deve mantenere fra i due circuiti, e non è neppure necessario per scopi pratici, perchè l'esperienza ha dimostrato, che con una suddivisione

tale che ad ogni rocchetto corrispondano solo alcune centinaia di ampèrespire effettive, la dispersione riesce assolutamente trascurabile.

Naturalmente non è necessario, che il nucleo di ferro abbia la forma di un anello circolare, ma può venire formato secondo una qualunque figura chiusa. Così per esempio si potrebbe costruire la parte che riunisce magneticamente i due rocchetti in forma di un telaio rettangolare (fig. 6) disponendo i rocchetti sui lati più lunghi del telaio. La disposizione segnata a sinistra corrisponde a quella della figura 3, abbiamo cioè solamente un rocchetto primario ed uno secondario, in questa disposizione la dispersione sarebbe molto forte. Nella disposizione rappresentata dalla figura di destra si hanno cinque rocchetti primari e cinque secondari e quindi la dispersione sarebbe ridotta alla 25^a parte circa di quella precedente.

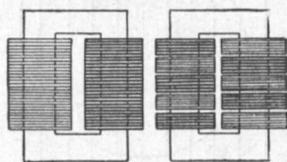


Fig. 6.

Finalmente in luogo di disporre i rocchetti l'uno vicino all'altro si possono porre l'uno dentro l'altro e ridurre in tal modo la dispersione ad un valore piccolissimo. Quest'ultima disposizione è molto usata, perchè essa permette di isolare molto bene i rocchetti tra di loro.

Determinazione della formola fondamentale. — Abbiamo già ricordato al principio di questo capitolo che la f. e. m. indotta in un rocchetto è proporzionale al numero n di spire ed al grado di variazione che subisce il flusso di forza N che attraversa il rocchetto in rapporto al tempo.

Sarà cioè $E = n \frac{dN}{dt}$, e quindi per poter calcolare la f. e. m. che agisce in ciascun istante, dobbiamo conoscere la relazione che passa fra il flusso di forza N ed il tempo t . Ora il flusso di forza N viene prodotto dalla azione magnetica del rocchetto primario, e, se la magnetizzazione si mantiene entro i limiti per i quali la permeabilità può ritenersi costante, N varierà proporzionalmente all'intensità della corrente primaria. Supponiamo ora, che il rocchetto secondario sia aperto, cioè che in esso non scorra alcuna corrente. Nei trasformatori l'induzione non può venire tenuta molto alta in considerazione del riscaldamento e del rendimento, e possiamo quindi ritenere, che la permeabilità rimanga costante e che l'intensità N del campo sia proporzionale alla corrente primaria. Effettivamente si hanno diverse azioni secondarie che modificano questo rapporto; per il momento

però non vogliamo prenderle in considerazione. Supporremo anche che la corrente eccitatrice (primaria) del trasformatore venga fornita da una macchina nella quale l'andamento della f. e. m. possa rappresentarsi con una curva sinusoidale. Quantunque ambedue queste ipotesi in generale non sieno corrispondenti al vero, le equazioni dedotte da queste premesse, come dimostreremo in seguito, sono tuttavia usabili in pratica.

Immaginiamoci ora una spira di superficie s attraversata da un flusso di forza variabile periodicamente tra i valori $+N$ e $-N$, di modo che il valore massimo dell'induzione è $B = N : s$. Il tempo necessario al compimento di un intero ciclo, cioè da $+N$ al successivo $+N$ passando pel

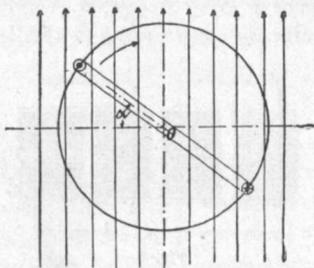


Fig. 7.

valore massimo negativo $-N$ si chiama durata di un periodo e lo indicheremo con T ed il numero di periodi al secondo dicesi frequenza e la segneremo con ω , di modo che $T = \frac{1}{\omega}$. Poichè la f. e. m. dipende esclusivamente dalla variazione del campo e non dalla direzione delle linee di forza, possiamo immaginare il campo variabile sostituito da un campo costante ed omogeneo, rotante ω volte al secondo intorno ad un asse posto nel piano della spira e normale alle linee di forza. Ovvero possiamo supporre il campo costante ed omogeneo, la cui induzione è B , fisso nello spazio e la spira rotante intorno ad un asse giacente nel suo piano e normale alle linee di forza; anche in questo caso la f. e. m. rimane la stessa che se la spira stesse ferma ed il campo variasse secondo la legge sinusoidale. Rappresenti in figura 7 O l'asse di rotazione ed α l'angolo, che il piano della spira fa con l'orizzontale dopo trascorso il tempo t . Se le linee di forza del campo sono verticali e dirette verso l'alto e la spira ruota nel senso degli indici dell'orologio, nel filo superiore della spira verrà indotta una f. e. m. diretta verso l'osservatore e nel filo inferiore una f. e. m. diretta in senso opposto. Queste direzioni sono rappresentate nella figura rispettivamente con un punto e con una croce; essi indicano rispettivamente la punta e le penne di una freccia diretta nel senso della f. e. m. o della corrente. Se una corrente è diretta verso l'osservatore esso vede

quindi la punta della freccia, se la corrente si allontana dall'osservatore esso vede le penne.

Se ω è la velocità angolare della spira, sarà $\alpha = \omega t$; e poichè la spira compie ∞ giri al secondo, avremo $\omega = 2\pi \infty$ ed $\alpha = 2\pi \infty t$. Il flusso di forza che attraversa la spira in questo istante è $N \cos \alpha$ ed il suo grado di variazione $-\frac{dN \cos \alpha}{dt} = N \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt}$.

Ora $\frac{d\alpha}{dt} = 2\pi \infty$ e quindi il valore attuale della f. e. m. indotta è:

$$E = 2\pi \infty N \sin \alpha.$$

Questo vale per una spira; se si hanno n spire messe in serie tra loro, il valore di E sarà n volte maggiore. Per un rocchetto di n spire abbiamo quindi:

$$E = 2\pi \infty N n \sin \alpha,$$

in unità del sistema assoluto. Per ottenere la f. e. m. espressa in volt, dobbiamo moltiplicare quest'espressione per 10^{-8} . Se il rocchetto è orizzontale, e quindi normale alle linee di forza, il flusso di forza che attraversa la spira diviene un massimo e la f. e. m. è uguale a zero. Quando invece il rocchetto è verticale, cioè parallelo alle linee di forza, il flusso di forza che lo attraversa è nullo e la f. e. m. indotta ha il suo valore massimo, e cioè:

$$E = 2\pi \infty N n 10^{-8}.$$

Il valore attuale della f. e. m. è quindi:

$$E_t = E \sin \alpha, \quad (1)$$

dove E rappresenta il suo valore massimo; il valore attuale del flusso di forza o dell'intensità del campo è invece:

$$N_t = N \cos \alpha.$$

Fra l'intensità del campo e la f. e. m. ha quindi luogo uno spostamento di fase, la cui durata corrisponde ad un quarto di periodo. Se supponiamo le estremità del rocchetto congiunte a mezzo di una lampadina la cui resistenza è W , questa sarebbe attraversata da una corrente la cui intensità massima è $I = \frac{E}{W}$ e la cui intensità attuale è $I_t = I \sin \alpha$. Come è noto, la resistenza del filamento di carbone varia con la temperatura, cioè con l'intensità della corrente, tuttavia siccome quest'ultima è soggetta a variazioni molto rapide, che la temperatura del filamento di carbone in causa della massa di esso non può seguire, possiamo supporre W costante. Immaginiamo ora la stessa lampada alimentata con una corrente continua, in modo da avere la stessa intensità luminosa, allora il lavoro consumato nei due casi (cioè trasformato in calore) deve essere il medesimo. La cor-

rente alternata produce allora lo stesso effetto della corrente continua e possiamo quindi determinare il valore effettivo della corrente alternata paragonandola ad una corrente continua. Poichè $I_t = I \sin \alpha$, possiamo rappresentare il valore attuale della corrente alternata in un diagramma vettoriale, mediante la proiezione di un vettore rotante con la velocità angolare $\omega = 2\pi \nu$ ed avente una lunghezza tale, che in una certa scala rappresenti il valore massimo I dell'intensità della corrente. Per determinare ora il lavoro fornito dalla corrente durante un giro del vettore (cioè nel tempo T) immaginiamo segnato il vettore in un certo numero di posizioni, distanti tra loro di un piccolo intervallo di tempo Δt , determiniamo le proiezioni dei vettori ed eseguiamone i quadrati, il lavoro sarà allora rappresentato dalla somma $\sum I_t^2 W \Delta t$, dove $I_t = I \sin \alpha$. Se supponiamo questa operazione eseguita due volte avremo naturalmente il doppio del

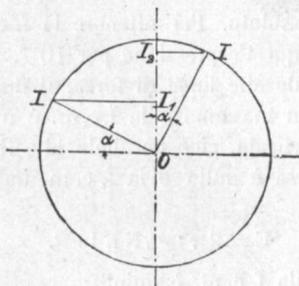


Fig. 8.

lavoro. Nel fare questa somma raggruppiamo i vettori a coppie sommando dapprima tra loro i vettori corrispondenti spostati tra loro di 90° . Ciascun membro della serie avrà quindi la forma seguente (vedi figura 8):

$$W (I^2 \sin^2 \alpha + I^2 \cos^2 \alpha) \Delta t = W I^2 \Delta t.$$

Poichè ora anche gli altri membri della serie hanno lo stesso valore, la somma sarà data dall'espressione $m W I^2 \Delta t$, dove m rappresenta il numero dei termini componenti la serie ed è quindi eguale a $T : \Delta t$. Avremo quindi come espressione del lavoro A :

$$A = \frac{W I^2 T}{2}.$$

Poichè questo lavoro viene fornito durante il tempo T , l'effetto ossia la potenza motrice sarà data da

$$P = \frac{W I^2}{2}.$$

Secondo la nostra premessa l'effetto di questa corrente alternata avente l'intensità massima I deve essere eguale all'effetto di una corrente continua di intensità i . Allora i rappresenterà il valore effettivo dell'intensità della corrente alternata ed il rapporto tra il valore effettivo i e quello massimo I è dato dalla relazione

$$\frac{W I^2}{2} = W i^2$$

$$i = \frac{I}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2)$$

Naturalmente questa relazione non vale che quando l'intensità della corrente è una funzione sinusoidale del tempo. Se l'intensità della corrente varia secondo una legge diversa, il rapporto fra il suo valore massimo ed il suo valore effettivo non sarà dato più da $\sqrt{2}$ ma da un coefficiente diverso dipendente dalla forma della curva della corrente. In generale, se I rappresenta il valore attuale dell'intensità della corrente, si ha:

$$A = \int_0^T I^2 W dt = T W i^2,$$

e quindi:

$$i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} \dots \dots \dots (3)$$

L'intensità effettiva della corrente è quindi data dalla radice quadrata della media dei quadrati delle intensità della corrente. Eguali considerazioni valgono per la tensione ai morsetti della lampada ed in generale per le forze elettromotrici. Poichè in tutti gli istrumenti per corrente alternata (voltometri a filo caldo, voltometri elettrostatici, istrumenti dinamometrici) l'azione è proporzionale al quadrato della tensione, la tensione effettiva indicata dall'istrumento è data dalla radice quadrata della media dei quadrati delle tensioni, cioè:

$$e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt} \dots \dots \dots (4)$$

Se la tensione varia rispetto al tempo in modo che essa possa essere rappresentata da una senoide, nella quale le ascisse indicano i tempi e le ordinate le tensioni, e se E è la tensione massima, la tensione effettiva e sarà data da:

$$e = \frac{E}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (5)$$

Abbiamo già trovato, che la f. e. m. massima indotta in un rocchetto di n spire è

$$E = 2\pi \sim N n 10^{-8} \text{ volt,}$$

dove \sim indica la frequenza ed N il numero massimo di linee di forza che attraversano il rocchetto. Da quest'ultima equazione e dalla (5) ricaviamo il valore della f. e. m.:

$$e = \frac{2\pi \sim}{\sqrt{2}} N n 10^{-8}$$

$$e = 4,44 \sim N n 10^{-8} \dots \dots \dots (6)$$

Questa è l'equazione fondamentale, che serve a calcolare la f. e. m. effettiva nei rocchetti di un trasformatore. In questa formula si suppone che tanto l'intensità della corrente quanto la tensione seguano la legge sinusoidale, l'equazione corrispondente ad altre forme di curve verrà data in seguito. L'equazione (6) dà la f. e. m. che si produce nel rocchetto primario quando si ponga in luogo di n il numero delle spire primarie. Questo numero verrà di qui innanzi indicato con n_1 , mentre con n_2 indicheremo il numero delle spire del rocchetto secondario.

Le f. e. m. indotte nei due rocchetti saranno allora:

$$e_1 = 4,44 \sim N n_1 10^{-8}$$

$$e_2 = 4,44 \sim N n_2 10^{-8},$$

dove supponiamo che l'intensità del campo sia la medesima pei due rocchetti, cioè che non si abbia dispersione magnetica; l'azione di quest'ultima verrà considerata più tardi.

Per l'uso pratico di queste formole conviene esprimere il flusso di forza non in unità del sistema assoluto, ma in unità 10^6 volte maggiori (milioni di linee di forza). Con questa premessa le formole di sopra acquistano la seguente forma:

$$e_1 = 4,44 \frac{\sim}{100} N n_1 \left. \vphantom{\frac{\sim}{100}} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

$$e_2 = 4,44 \frac{\sim}{100} N n_2 \left. \vphantom{\frac{\sim}{100}} \right\}$$

Poichè dal rocchetto primario si ricava lavoro, la direzione di e_1 deve essere in generale opposta a quella della corrente. La corrente del rocchetto secondario invece fornisce energia, e la direzione di e_2 è quindi in generale la stessa di quella della corrente secondaria. L'energia assorbita o fornita non può tuttavia ottenersi senz'altro moltiplicando tra loro tensione ed intensità della corrente, perchè nella maggior parte dei casi ha luogo uno spostamento di fase, cioè l'intensità della corrente raggiunge

il suo valore massimo in un istante diverso da quello in cui è massima la tensione, e corrente e tensione passano per lo zero in istanti diversi. Nel rocchetto primario quindi il prodotto dei valori momentanei della corrente e f. e. m. non è sempre negativo, ma in certi istanti diviene pure positivo. Analogamente questo prodotto nel rocchetto secondario non è sempre positivo, ma in certi istanti anche negativo. Il lavoro fornito effettivamente durante un periodo è quindi sempre minore di $T e_1 i_1$ e rispettivamente $T e_2 i_2$.

La determinazione del lavoro effettivo, e rispettivamente dell'energia effettiva di una corrente alternata, è spiegata meglio al Capitolo IV.

CAPITOLO II.

Perdite nei trasformatori. — Influenza della curva della tensione sulla perdita per isteresi. — Importanza della forma del nucleo e dei rocchetti per le perdite d'energia. — Trasformatori a nucleo ed a mantello.

Perdite nei trasformatori. — Le perdite che hanno luogo nei trasformatori sono di varia natura. Abbiamo in primo luogo la perdita dovuta alla resistenza ohmica nei rocchetti, cioè la così detta perdita ohmica. Il calcolo di questa perdita è semplice e non richiede maggiori spiegazioni. Oltreciò possono aver luogo perdite nei conduttori o nelle altre parti metalliche del trasformatore per effetto di correnti parassite. Il calcolo di queste perdite è molto difficile ed in parte impossibile; d'altro canto però è molto facile con una costruzione opportuna di ridurre queste perdite ad una quantità così piccola, che esse possono essere trascurate senza notevole errore. Finalmente dobbiamo considerare le perdite che si hanno nella parte in ferro del trasformatore, le quali sono dovute a due cause, e cioè all'isteresi ed alle correnti parassite.

Se l'induzione del ferro percorre un ciclo completo da $+B$ a $-B$ passando per 0 , e poi nuovamente a $+B$ passando per il valore 0 , una certa quantità di lavoro viene trasformata in calore e questa quantità di lavoro è dipendente dalla qualità del ferro e dall'induzione ed è direttamente proporzionale al peso del ferro ed alla frequenza. In questo fenomeno è indifferente che la curva che rappresenta l'induzione in funzione del tempo sia una sinusoide o no. Se in ogni mezzo periodo l'induzione raggiunge solamente un massimo, il lavoro d'isteresi dipende esclusivamente da questo massimo, qualunque sia la via percorsa per raggiungerlo. Secondo lo *Steinmetz* il lavoro d'isteresi in ogni periodo e per unità di peso del ferro è dato da un'espressione della forma

$$A = h B^{1.6},$$

dove h è un coefficiente che dipende dalla qualità del ferro e dall'unità di peso scelta.

L'induzione variabile nel ferro produce nella massa dello stesso delle f. e. m. che danno origine alla formazione di correnti parassite. Supponiamo che la sezione del nucleo sia rettangolare e che i lati dello stesso abbiano le dimensioni a e δ , di modo che a sia la larghezza e δ lo spessore del nucleo. Supponiamo che la larghezza sia costante e lo spessore δ sia

variabile. È chiaro che la f. e. m. avrà un massimo alla periferia esterna del rettangolo e sarà proporzionale al numero totale di linee di forza, cioè ad $a \delta B$. Per un determinato valore di B adunque la f. e. m. alla superficie esterna del nucleo in ferro è quindi proporzionale ad $a \delta$, e lo stesso può dirsi delle f. e. m. minori, che si producono nella massa interna del metallo. Le intensità delle correnti sono inversamente proporzionali alle resistenze, cioè quanto maggiore è δ per la stessa larghezza a , tanto minore sarà la resistenza e quindi più intensa la corrente. Aumentando lo spessore δ adunque aumentano proporzionalmente le f. e. m. che producono le correnti parassite, mentre le intensità di queste ultime sono proporzionali al quadrato dello spessore δ . L'energia consumata in questo fenomeno è quindi proporzionale al cubo di δ . Nei nuclei a sezione circolare la f. e. m. è proporzionale al quadrato del diametro e la resistenza è da esso indipendente, la intensità della corrente cresce quindi col quadrato del diametro ed il lavoro consumato con la sua quarta potenza. Per diminuire quindi al massimo questa perdita non si impiegano nuclei compatti, ma questi vengono formati da lamierini o da fili: nel primo caso la perdita è proporzionale alla terza potenza dello spessore delle lamiere e nel secondo caso alla quarta potenza del diametro dei fili. Poichè ora nelle lamiere il peso è proporzionale allo spessore e nei nuclei cilindrici al quadrato del diametro, l'energia perduta per le correnti parassite è proporzionale al quadrato dello spessore delle lamiere e rispettivamente al quadrato del diametro dei fili. Nuclei di fili di ferro sono poco usati. Impiegando le lamiere e scegliendo opportunamente lo spessore di queste si può ridurre la perdita per unità di peso ad $\frac{1}{4}$ fino ad $\frac{1}{9}$. Impiegando lamiere ancora più sottili si potrebbe quindi ridurre la perdita piccola quanto si vuole, non è possibile però spingersi tant'oltre in questo senso, perchè in tal modo si aumenta grandemente il costo del trasformatore e va perduto troppo spazio per l'isolamento delle lamiere tra loro. Ci si accontenta quindi di spingere la suddivisione del ferro tant'oltre, che la perdita dovuta alle correnti parassite, se pure non sparisce completamente, divenga però molto piccola. La pratica ha dimostrato che uno spessore delle lamiere di 0,35 a 0,5 millimetri può venire convenientemente usato. Le lamiere più sottili vengono impiegate per alte frequenze fino al valore 100 cca., quelle più grosse per frequenze più basse di circa 50 periodi. Per frequenze molto basse e debole sollecitazione magnetica del ferro, possono venir usate anche lamiere di spessore maggiore ai 0,5 mm. Per chiarire meglio fino a che punto ci si può spingere in questo senso vogliamo dare un esempio. Supponiamo che si sia praticamente dimostrato come con una frequenza $\omega = 50$ ed un'induzione $B = 4000$ si possano convenientemente usare lamiere dello spessore di 0,5 mm. Si debba ora costruire un trasformatore in cui sia $\omega = 20$ e $B = 5000$ e si voglia stabilire

quale è lo spessore massimo da potersi dare alle lamiere, perchè la perdita dovuta alle correnti parassite per chilogramma di ferro sia eguale a quella che si aveva nel caso precedente. Nel caso precedente la f. e. m. che produceva le correnti parassite era proporzionale al prodotto $B \omega = 200.000$, impiegando lamiere d'egual spessore essa sarebbe ora proporzionale al prodotto $B \omega = 100.000$, avrebbe cioè un valore metà del precedente. Usando adunque lamiere di eguale spessore nei due trasformatori, la perdita in quello a frequenza minore sarebbe la quarta parte di quella che si ha nell'altro; possiamo quindi aumentare lo spessore delle lamiere e precisamente di tanto che il rapporto fra i quadrati degli spessori delle lamiere sia eguale a 4, cioè possiamo raddoppiare lo spessore nel secondo trasformatore impiegando quindi lamiere di 1 mm. di spessore.

La relazione esistente fra la perdita per effetto delle correnti parassite, la frequenza, lo spessore delle lamiere e l'induzione, può essere rappresentata da una semplice formola. Abbiamo già visto come tale perdita, quando essa sia riferita all'unità di peso, sia proporzionale al quadrato dello spessore delle lamiere; l'espressione della perdita deve quindi contenere come fattore il quadrato dello spessore delle lamiere. Inoltre è chiaro, che le f. e. m. che producono correnti parassite in tutti i punti del nucleo, devono essere proporzionali al prodotto ωB e le perdite di energia al quadrato di quel prodotto; $(\omega B)^2$ sarà quindi un secondo fattore dell'espressione cercata. L'unica grandezza da determinare è ora un coefficiente che sia dipendente dalla conduttività elettrica del materiale. Quanto più grande è questo coefficiente e tanto maggiori sono le correnti parassite e quindi le perdite corrispondenti ad una determinata f. e. m. Facendo l'ipotesi permessa praticamente, che lo spessore delle lamiere sia trascurabile in confronto alla loro larghezza, si può trovare il coefficiente con un calcolo certo alquanto penoso. Pel ferro, la cui resistenza elettrica è circa $7 \frac{1}{2}$ volte quella del rame puro, il coefficiente è 0,16, quando si esprima la perdita per 1 kg. di ferro in watt, lo spessore delle lamiere in mm., la frequenza in unità di 100 e l'induzione in unità di 1000. Per l'uso pratico conviene scegliere il coefficiente alquanto maggiore per la seguente ragione. La lunghezza del cammino percorso dalle linee di forza varia nello stesso nucleo; corrispondentemente anche l'induzione non è esattamente costante in tutta la sezione del nucleo, ma è alquanto maggiore del valore di B medio contenuto nella formola ove le linee di forza sono più corte, ed alquanto minore ove le linee di forza sono più lunghe. Poichè ora la perdita dovuta alle correnti parassite è funzione del quadrato di B, un'irregolarità di B porta un aumento nella perdita complessiva, e per tener conto di questa circostanza è opportuno scegliere il coefficiente alquanto maggiore di quello che risulta dal calcolo, e cioè 0,19 in luogo di 0,16.

La formola è quindi

$$P_w = 0,19 \left(\Delta \frac{\omega}{100} \frac{B}{1000} \right)^2 \dots \dots \dots (8)$$

dove P_w rappresenta l'energia perduta per le correnti parassite, espressa in watt per ogni kg. di lamiera, Δ lo spessore della lamiera in mm., ω la frequenza e B l'induzione.

Per l'uso pratico è conveniente rappresentare la formola 8, con una curva come si vede nella figura 9. La linea P_w è tracciata per una lamiera

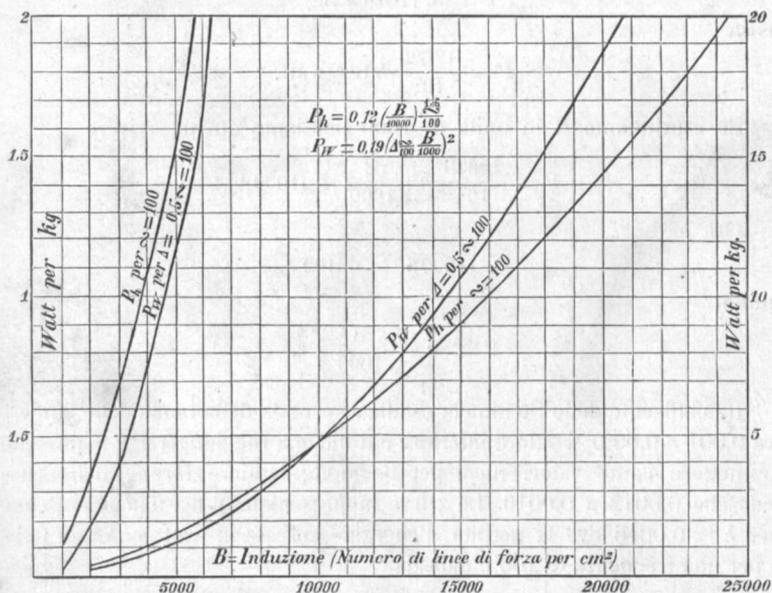


Fig. 9.

dello spessore di 0,5 mm. ed una frequenza eguale a 100. Le ascisse rappresentano l'induzione e le ordinate la perdita per kg. di ferro. Per spessori di lamiere diversi o per differenti frequenze le ordinate vanno moltiplicate per il coefficiente

$$\left(\frac{\Delta \omega}{50} \right)^2$$

per ottenere i valori esatti. La figura 9 contiene inoltre curve che rappresentano la perdita per isteresi. La formola dello Steinmetz indicata a pagina 14, dà di solito la perdita di lavoro espressa in erg, riferita ad 1 cm³ di ferro. Per scopi pratici è tuttavia più conveniente trasformare la formola in modo, che essa si riferisca alla perdita d'energia per una

determinata frequenza, p. es. $\omega = 100$, ed al kg. come unità di peso, anzichè al cm^3 come unità di volume. Se h è il coefficiente di Steinmetz per cm^3 ed erg, il lavoro perduto in un secondo, cioè l'energia espressa in erg-secondi è data da

$$P = 100 h B^{1.6}$$

per un cm^3 di ferro. Il peso specifico delle lamiere è 7,9, quindi un kg. di ferro contiene $1000 : 7,9 = 126,2 \text{ cm}^3$. L'energia che va perduta per ogni kg. di ferro è quindi in erg-secondi

$$P = 12620 h B^{1.6}$$

ossia

$$P = \frac{12620}{10^7} h B^{1.6} \text{ watt.}$$

Se esprimiamo B in unità di 1000 possiamo anche scrivere

$$P = \frac{12620}{10^7} h \left(\frac{B}{1000} \right)^{1.6} (1000)^{1.6}.$$

Ora è

$$(1000)^{1.6} = 63100$$

quindi

$$P = 80 h \left(\frac{B}{1000} \right)^{1.6}.$$

Il coefficiente dello Steinmetz oscilla a seconda della bontà delle lamiere fra 0,001 e 0,002. Il valore inferiore è difficile a raggiungersi, e si possono ammettere come valori medi per le buone lamiere fornite dalle case tedesche 0,0012 a 0,0016. Le curve rappresentate in fig. 9 sono costruite per $h = 0,0015$ ove la perdita d'energia espressa in watt per kg. di ferro e per una frequenza di 100 è data da

$$P = 0,12 \left(\frac{B}{1000} \right)^{1.6}.$$

Per una frequenza ω diversa da 100 la perdita sarà

$$P = 0,12 \frac{\omega}{100} \left(\frac{B}{1000} \right)^{1.6}.$$

Influenza della curva della tensione sulla perdita per isteresi. —

La forma della curva della f. e. m. non ha azione solamente sul rapporto fra il suo valore massimo e quello effettivo, ma anche sulla perdita di energia per isteresi. Supponiamo dapprima, che l'induzione in ogni semi-periodo abbia solamente un massimo, allora la perdita dovuta all'isteresi riesce determinata da questo valore massimo e dalla frequenza; e cioè per tale perdita non ha importanza la forma della curva che rappresenta N

in funzione del tempo ma solamente il suo punto più alto. Ora possiamo immaginare varie forme di curve, che raggiungono lo stesso massimo e che possono essere molto diverse nel loro andamento, esse sono equivalenti in riguardo alla perdita per isteresi non però per la f. e. m. indotta. Sarà da preferirsi quella curva, per la quale, a parità di valore massimo dell'induzione N , è maggiore la f. e. m. effettiva. Ma l'induzione e quindi anche il suo valore massimo sono dipendenti dalla curva della f. e. m., e possiamo supporre il problema posto in questi termini: Sieno dati parecchi alternatori aventi la stessa f. e. m. effettiva, nei quali però le curve della f. e. m. abbiano forme diverse, e si debba scegliere quella forma, per la quale N , e quindi la perdita totale nel ferro, è minima.

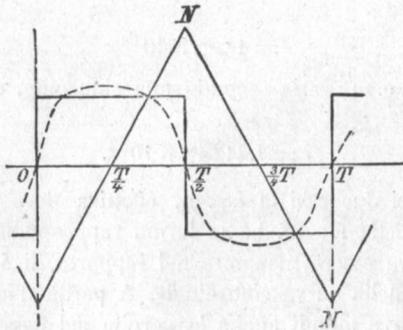


Fig. 10.

Per risolvere questo problema dobbiamo considerare varie forme della curva della f. e. m. Come punto di partenza per la ricerca conviene scegliere la curva sinusoidale ed esaminare quale azione abbia una variazione di detta curva nell'uno o nell'altro senso tanto sul rapporto tra la f. e. m. effettiva e quella massima quanto sul valore massimo dell'induzione. La curva sinusoidale può venire modificata in due sensi, essa può cioè venire schiacciata o raddrizzata, cioè aguzzata. Se spingiamo lo schiacciamento fino al limite teorico (praticamente impossibile) otteniamo una spezzata formata da tratti verticali ed orizzontali. I tratti verticali rappresentano il passaggio istantaneo da $-E$ a $+E$, di modo che la lunghezza dei tratti orizzontali è uguale alla durata di un mezzo periodo. Una simile curva si potrebbe approssimativamente avere coll'inversione di una f. e. m. di corrente continua. Con un alternatore è più difficile ottenere tale curva anche solo approssimativamente e possiamo considerarla quindi come il caso limite praticamente non raggiungibile della sinusoide schiacciata. In questo caso si ha:

$$e = E$$

e giacchè E è costante, anche $\frac{dN}{dt}$ deve essere costante, cioè la curva dell'induzione sarà rappresentata da una linea a zig-zag, le cui punte cadono esattamente in corrispondenza ai tratti verticali della curva della f. e. m. (fig. 10).

Dalla figura si ricava immediatamente essere

$$\frac{dN}{dt} = \frac{4N}{T}$$

e poichè per una spira si ha

$$E = \frac{dN}{dt} \text{ ed } e = E$$

avremo

$$e = 4 \sim N 10^{-8} \quad \dots \quad (9)$$

Se invece la f. e. m. varia secondo una senoide, dalla formola 6, si ricava

$$e = 4,44 \sim N 10^{-8}.$$

Se adunque nei due casi la f. e. m. effettiva deve essere la stessa, quando la curva della f. e. m. ha la forma rappresentata in figura 10 il flusso di forza deve essere maggiore nel rapporto di 4,44 a 4 di quello che si ha nel caso della curva sinusoidale. A parità d'induzione adunque il volume del ferro e quindi anche la perdita del ferro è maggiore dell'11 % circa. Ora, come è stato detto, la forma della curva rappresentata in figura 10 è un caso limite, che non può venir raggiunto con un alternatore comune. La curva si allontana generalmente dalla forma ad angoli retti prendendo la forma rappresentata dalla linea punteggiata. La perdita nel ferro non aumenterà quindi dell'11 % risultante dal calcolo teorico, ma di una quantità alquanto minore. Questa considerazione dimostra che una f. e. m. a curva schiacciata è poco conveniente per trasformatori producendo un aumento nella perdita del ferro.

Consideriamo ora l'altro caso, cioè di una curva della f. e. m. molto appuntita. A priori non si può ammettere, che la forma a zig-zag od a triangoli costituisca il limite di tale curva. Vi sono macchine nelle quali la curva della f. e. m. è costituita da una serie di triangoli i cui lati sono incurvati verso l'interno, dove cioè la sommità della curva è molto appuntita ed E è molto grande in confronto ad e . La ricerca matematica per tali curve della f. e. m. è difficile ad eseguirsi e sarebbe inutile per lo scopo attuale, in quanto si tratta solamente di stabilire in generale, se una curva appuntita della f. e. m. è più favorevole o meno della senoide in rapporto alla perdita del ferro dei trasformatori. Se troveremo che la forma a triangoli è più favorevole della sinusoidale, dovremo senz'altro

concludere, che la forma derivata da quella a triangoli deve essere ancora più favorevole.

Sia E in figura 11 la curva della f. e. m. e determiniamo anzitutto la curva dell'induzione. Poichè per una spira si ha in unità del sistema assoluto

$$E_t = \frac{dN}{dt}$$

la curva cercata deve soddisfare alla condizione, che la tangente trigonometrica in un suo punto a qualunque di ascissa t , deve essere eguale

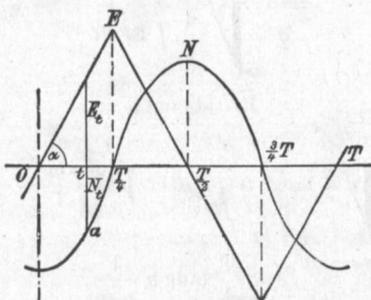


Fig. 11.

all'ordinata della curva della f. e. m. passante per quel punto a . Avremo cioè:

$$E_t = t \operatorname{tang} \alpha = - \frac{dN_t}{dt}$$

da cui

$$N_t = - \int t \operatorname{tang} \alpha dt + \operatorname{Cost.}$$

$$N_t = \operatorname{Cost.} - \frac{1}{2} t^2 \operatorname{tang} \alpha.$$

Si può determinare la costante considerando che per $t = 0$ deve essere $N_t = N$, quindi

$$N_t = N - \frac{1}{2} t^2 \operatorname{tang} \alpha,$$

che è l'equazione d'una parabola. Poichè ora $E = \frac{T}{4} \operatorname{tang} \alpha$, avremo

$$N_t = N - \frac{1}{2} t^2 \frac{4E}{T}.$$

Per $t = \frac{T}{4}$ deve essere $N_t = 0$, quindi

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{4} \right)^2 \frac{4E}{T},$$

cioè $\frac{TE}{8} = N$ in unità assolute, ed essendo $\frac{1}{T} = \infty$

$$E = 8 \infty N 10^{-8} \text{ volt.}$$

Nella curva a triangoli adunque, a parità di flusso di forza, la f. e. m. massima è esattamente il doppio di quella che si ha con la curva a rettangoli. Ora però, non si tratta del valore massimo della f. e. m., ma di quello effettivo; quest'ultimo può venir determinato per un quarto di periodo nel seguente modo:

$$e = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} E_t^2 dt}$$

$$E_t = t \operatorname{tang} \alpha$$

$$e = \sqrt{\frac{4 \operatorname{tang}^2 \alpha}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} t^2 dt} = \sqrt{\frac{4 \operatorname{tang}^2 \alpha}{T} \frac{1}{3} \frac{T^3}{64}}$$

$$e = \frac{T}{4} \operatorname{tang} \alpha \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$e = \frac{E}{\sqrt{3}} \text{ ed } E = e \sqrt{3}.$$

Ponendo questo valore di E nell'equazione di sopra si ottiene

$$e = 4,62 \infty N 10^{-8} \dots \dots \dots (10)$$

Il coefficiente è alquanto maggiore di quello che si ha per la curva sinusoidale ed in questo caso è quindi sufficiente un'intensità minore del campo N, ed a parità di induzione meno ferro per produrre la medesima f. e. m. effettiva. Riassumendo le equazioni 6, 9 e 10 si può esprimere il valore effettivo della f. e. m. indotta in un rocchetto di n spire con la relazione

$$e = k \infty N n 10^{-8},$$

dove k è un coefficiente, che dipende dalla forma della curva della f. e. m. e che prende perciò il nome di coefficiente di forma. Esso ha i seguenti valori:

1. La curva della f. e. m. è formata da una serie di rettangoli $k = 4,00$.
2. " " " " è una sinusoide $k = 4,44$.
3. " " " " è formata da una serie di triangoli $k = 4,62$.

Supponiamo ora di inserire successivamente lo stesso trasformatore su tre condutture nelle quali ha luogo la stessa f. e. m. effettiva, ma la forma

della curva della tensione corrisponde rispettivamente alle condizioni 1, 2 e 3, l'induzione B sarà diversa nei tre casi e precisamente essa sarà massima nella condizione indicata con 1 e minima in quella indicata con 3.

Se scegliamo la curva sinusoidale come unità, allo scopo di confrontare tra loro i tre casi, risulta che

con la forma a rettangoli l'induzione è 1,11,
 e con la forma a triangoli l'induzione è 0,96.

In rapporto alla perdita nel ferro dei trasformatori si ha quindi un vantaggio, se pure non rilevante, l'usare quelle macchine nelle quali la curva della tensione si avvicina alla forma a triangoli. Ad ogni modo si deve evitare la forma schiacciata.

Influenza della forma dei nuclei e dei rocchetti sulle perdite. —

Poichè la perdita nel ferro è proporzionale al peso del ferro, si deve tenere quest'ultimo possibilmente piccolo. Nello studiare la disposizione della carcassa del trasformatore si trova un limite a questa tendenza nel fatto, che è necessaria una certa sezione del nucleo per dar passaggio alle linee di forza, e che è necessaria una certa lunghezza per potervi disporre i rocchetti. Contemporaneamente la lunghezza delle singole spire deve essere possibilmente ridotta in causa del riscaldamento. Queste condizioni in parte sono in contrasto fra di loro e non possono quindi essere intieramente osservate.

La costruzione migliore deve corrispondere ad una fusione di queste diverse condizioni e non si può quindi ottenere, che determinando passo a passo l'influenza delle variazioni nelle dimensioni e nei rapporti d'avvolgimento, modificando la costruzione fino a tanto che appaia impossibile un ulteriore miglioramento.

La forma della sezione del nucleo ha una speciale importanza in riguardo alla lunghezza delle spire e quindi sulla resistenza dei rocchetti. Così per esempio una sezione rettangolare è meno opportuna della quadrata, perchè a parità di superficie racchiusa colla sezione rettangolare è necessario più filo che con quella quadrata. Parimenti, in generale, la sezione circolare è più conveniente di quella quadrata. Può però avvenire, che per ragioni costruttive non si possa scegliere il diametro del cerchio maggiore del lato del quadrato, allora a parità di dimensioni lineari il nucleo a sezione quadrata conterrà $\frac{4}{\pi}$ volte più ferro di quello a sezione circolare ed è quindi più conveniente, come risulta dal seguente ragionamento. Sia r il raggio del cerchio (e quindi $2r$ il lato del quadrato), δ lo spessore dello strato isolante che ricopre il nucleo e d lo spessore dell'avvolgimento. A parità d'induzione le f. e. m. stanno fra loro come

πr^2 a $4r^2$. La lunghezza media d'una spira col nucleo a sezione circolare è $\pi(2[r + \delta] + d)$ e col nucleo a sezione quadrata $8(r + \delta) + \pi d$. La f. e. m. generata nell'unità di lunghezza di filo è quindi nei due casi proporzionale a $\pi r^2 : \pi(2[r + \delta] + d)$ e $4r^2 : (8[r + \delta] + \pi d)$ ed il rapporto tra questi valori è

$$\frac{2(r + \delta) + d}{2(r + \delta) + \frac{\pi}{4}d} > 1;$$

cioè la f. e. m. indotta per ogni metro di filo è maggiore nel nucleo a sezione quadrata che in quello a sezione circolare, e la differenza è tanto maggiore, quanto più grosso è l'avvolgimento. La spiegazione di questa apparente contraddizione sta semplicemente in ciò che il trasformatore col nucleo a sezione quadrata contiene più ferro e possiede quindi una maggiore capacità. Ora l'utilizzazione del materiale è sempre migliore in un apparecchio più grande che in uno più piccolo.

Le carcasse dei trasformatori, come fu già detto, per evitare le perdite per correnti parassite, devono essere composte di lamiera o fili di ferro. Impiegando fili che non richiedono uno speciale isolamento, il 78 all'80 % dello spazio viene occupato effettivamente dal ferro; fili di ferro però vengono oggi raramente usati. Usando le lamiere è necessario isolare le lamiere l'una dall'altra, e l'isolamento può essere fatto con un rivestimento di gommalacca, con uno strato di ossido o con interposizione di fogli di carta. L'ultimo metodo accennato è quello più sicuro; secondo questo va perduto il 10 al 15 % dello spazio, di modo che in media l'87 $\frac{1}{2}$ % dello spazio è occupato effettivamente dal ferro. Usando le lamiere adunque lo spazio interno dei rocchetti viene meglio utilizzato che impiegando i fili di ferro, ed è per questa ragione e per la più facile costituzione meccanica, che attualmente la maggior parte dei nuclei dei trasformatori vengono fatti di lamiera.

Trasformatori a nucleo ed a mantello. — Come è stato detto da principio, l'azione dei trasformatori si basa sul concatenamento di due circuiti isolati tra loro a mezzo di un flusso magnetico di linee di forza. Questo concatenamento può essere ottenuto in moltissimi modi. Una delle forme più semplici assegnate alla carcassa del trasformatore è rappresentata in figura 6. Essa è formata da un telaio rettangolare i cui lati maggiori costituiscono i nuclei dei rocchetti. Quando un trasformatore è disposto in tal modo esso dicesi a *nucleo*; esso è caratterizzato dal fatto, che la maggior parte del ferro trovasi alla parte interna dei rocchetti, ossia la superficie dei rocchetti è esposta ovunque all'azione refrigerante dell'aria.

Noi possiamo ora anche supporre invertita la posizione reciproca del ferro e del rame. Noi possiamo cioè supporre, che il telaio rettangolare

della figura 6 sia formato dai rocchetti in questo caso sovrapposti, e che i due lati maggiori del rettangolo sieno ricoperti, in certo qual modo, da un mantello di ferro infilandovi una serie di dischi di ferro. Un tale trasformatore dicesi *a mantello* e viene caratterizzato dal fatto che i rocchetti rimangono in parte immersi nel ferro.

Nei trasformatori a nucleo si ha un peso relativamente piccolo di ferro ed è pure piccola la lunghezza media delle spire dei rocchetti; all'opposto il numero delle spire (in causa della piccola sezione del nucleo) è relativamente grande, ed il peso del rame, ad onta della breve lunghezza media delle spire, è considerevole. La lunghezza del percorso delle linee di forza è grande ed è quindi notevole il numero delle ampère-spire necessarie per la magnetizzazione. D'altro canto essi offrono il vantaggio della facile posa e dell'accessibilità dei rocchetti.

Nei trasformatori a mantello si ha un breve percorso nel circuito magnetico e si ottiene quindi la magnetizzazione con poche ampère-spire; i rocchetti contengono poche spire e richiedono quindi, ad onta della lunghezza considerevole delle spire, in generale meno filo del tipo a nucleo. All'opposto, la parte in ferro diviene molto più pesante, i rocchetti immersi nel ferro si possono difficilmente raffreddare e sono solamente in parte accessibili.

Onde farci un'idea dell'influenza di queste diverse disposizioni, vogliamo trattare dapprima la questione con un esempio. A tal uopo supponiamo, che i diversi tipi sieno calcolati tutti per la medesima capacità; sia cioè costante il prodotto dell'intensità della corrente per la tensione. Per semplicità riteniamo, che tanto la densità della corrente nei conduttori, quanto l'intensità stessa della corrente si mantengano costanti; allora i trasformatore andranno tutti avvolti con lo stesso filo ed il numero delle spire sarà direttamente proporzionale allo spazio da esse occupato. Quanto maggiore è questo spazio, e tanto maggiore può essere il numero delle spire di ciascun rocchetto e quindi altrettanto minore riescirà l'intensità N del campo. Supponiamo infine, che l'induzione B sia la medesima in tutti i casi, allora la sezione del nucleo varia in ragione inversa del numero delle spire, cioè dello spazio destinato all'avvolgimento. Come base del confronto servono il peso del ferro e la lunghezza del filo.

Il trasformatore a (figura 12) possiede un nucleo di 400 cm^2 di sezione (compreso lo spazio necessario all'isolamento delle lamie che lo compongono) ed uno spazio di 60 cm^2 per l'avvolgimento. Il peso del ferro è di 200 kg . e la lunghezza media di una spira di 119 cm . Per il rocchetto primario, che è composto di 100 spire, si impiegheranno 119 m . di filo. Vogliamo ora ridurre la sezione del ferro ad un quarto del suo valore riducendo la sua lunghezza da 40 cm . a 10 soltanto. Allora, per avere ancora la stessa tensione, dobbiamo impiegare un numero quadruplo

di spire; lo spazio per l'avvolgimento deve avere quindi una sezione di $4 \times 60 = 240 \text{ cm}^2$. Tale modificazione ci conduce al tipo *b*. In questo ultimo la lunghezza media delle spire è di 78 cm., siccome però sono necessarie 400 spire, la lunghezza di filo da impiegarsi è divenuta maggiore; essa importa 312 m., quindi press'a poco tre volte più di prima. Viceversa il peso del ferro è divenuto di 73 kg., e cioè circa un terzo di quello del tipo *a*. Il tipo *a* sarà quindi da preferirsi quando il ferro è

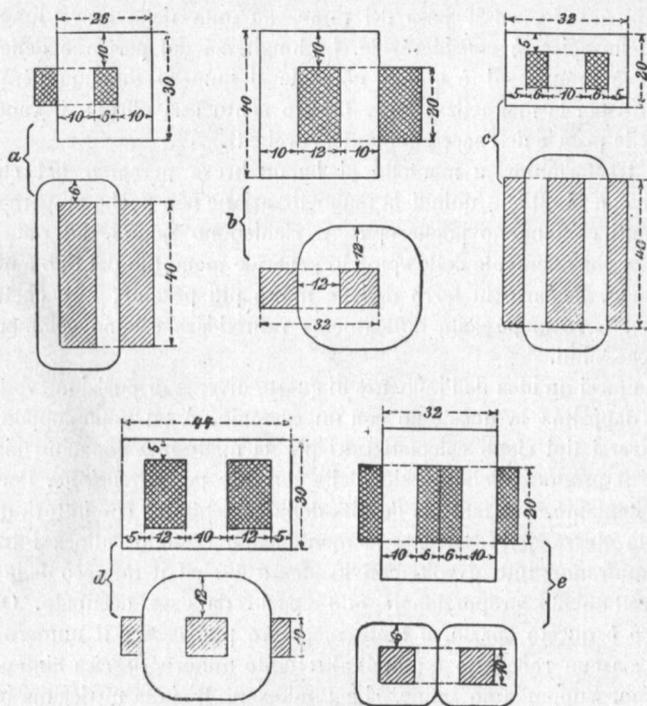


Fig. 12.

buono ed a buon prezzo mentre il rame è caro, e viceversa si sceglierà il tipo *b* quando il ferro è cattivo e caro ed è basso il costo del rame. Ambedue i tipi di costruzione possono tuttavia essere notevolmente migliorati. Possiamo, ad esempio, modificare la costruzione *a* in modo da coprire col ferro ambedue i lati del rocchetto, ottenendo così un trasformatore a mantello, ne risulta il tipo *c*. Il flusso di forza si divide in tal caso in due parti e per la parte esterna del ferro è sufficiente una sezione metà di quella del nucleo. La lunghezza del filo è, come nel tipo *a*, di 119 m., il peso del ferro invece è ridotto a 112 kg. Il tipo *c*, nel quale

è sufficiente una piccola quantità di rame, con un peso non eccessivo di ferro, rappresenta la forma di trasformatore a mantello maggiormente usata in America ed in Inghilterra.

Modificando in modo analogo il tipo *b* si arriva al tipo *d*, che appartiene effettivamente ai trasformatori a mantello, senza offrire però il vantaggio di un piccolo peso in rame. La lunghezza del rame è, come precedentemente, di 312 m., il peso del ferro è ridotto invece a 59 kg. Questa costruzione va usata solamente quando non è necessario un risparmio nel rame e non è invece possibile di avere del ferro di buona qualità. Essa venne perciò usata in Europa nei primi tempi, prima cioè che si producessero le lamiere per trasformatori coi laminatoi. Oggi invece che si possono avere facilmente lamiere della migliore qualità non è necessario di risparmiare molto nel ferro; è quindi meglio di modificare il tipo *b* in modo da ottenere un risparmio nel rame, il che si raggiunge facilmente dividendo l'avvolgimento sulle due branche più lunghe del nucleo. Si ottiene così il tipo *e* che costituisce un vero trasformatore a nucleo (vedi figura 6). La lunghezza media delle spire è, in causa dello spessore minore dell'avvolgimento, notevolmente minore di quella in *b*. La lunghezza del filo di rame importa 236 m. ed il peso del ferro 73 kg. Questo tipo è molto usato in Inghilterra ed in Germania.

Onde meglio confrontare questi risultati riuniamoli in una tabella:

Tipo	Peso del ferro	Lunghezza del filo di rame
<i>a</i>	kg. 210	m. 119
<i>b</i>	„ 73	„ 312
<i>c</i>	„ 112	„ 119
<i>d</i>	„ 59	„ 312
<i>e</i>	„ 73	„ 236

In tutti questi tipi il circuito magnetico è completamente chiuso, cioè le linee di forza attraversano esclusivamente il ferro; si ha inoltre un tipo di trasformatore nel quale il flusso di forza percorre solamente in parte il ferro mentre nella parte rimanente del percorso attraversa l'aria. Questi sono i cosiddetti trasformatori a riccio che vennero costruiti da *Swinburne* allo scopo di ridurre ad un minimo la perdita dovuta all'isteresi. A tal uopo *Swinburne* avvolse i rocchetti su di un nucleo di fili di ferro (fig. 13a) prolungando le estremità di detti fili e piegandoli in forma emisferica, di modo che il trasformatore presenta alle due estremità l'aspetto del dorso di un riccio. Le linee di forza si chiudono allora nell'aria, come è rappresentato con le linee punteggiate. La perdita per isteresi resta quindi limitata al nucleo effettivo del trasformatore, mentre nel mantello d'aria non ha luogo alcuna perdita. Questa costruzione però in pratica non si è dimostrata conveniente. Se ora consideriamo due di tali trasformatori

(figura 13 *b*) posti l'uno di fianco all'altro e riunite le estremità in modo da costituire un circuito chiuso di ferro, si ottiene il tipo comune di trasformatore a nucleo. La perdita per isteresi nel trasformatore così ottenuto non può essere che di poco maggiore di quella di due trasformatori a riccio (e l'aumento di perdita è dovuto alla maggiore lunghezza dei fili corrispondenti all'unione dei due nuclei tra loro), di modo che già per questa ragione il tipo a riccio non può portare un notevole risparmio nella perdita per isteresi. D'altro canto si ha un leggero aumento in queste perdite, perchè, in causa della forte dispersione, l'induzione nel centro del

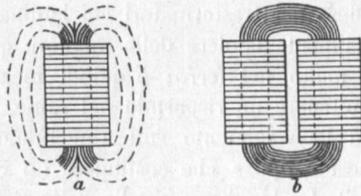


Fig. 13.

nucleo è maggiore che alle estremità. La f. e. m. è proporzionale all'induzione media, mentre la perdita per isteresi è proporzionale alla $V^{1.6}$ del valore medio di $B^{1.6}$. È chiaro che la perdita deve essere maggiore in un nucleo ad induzione irregolare, che in uno ad induzione regolare. Oltre di ciò il trasformatore a riccio ha l'inconveniente che a vuoto richiede una corrente eccezionalmente intensa. Mentre i tipi rappresentati in figura 12 a vuoto richiedono una corrente primaria la cui intensità corrisponde ad una piccola percentuale della corrente a pieno carico, il trasformatore a riccio (fig. 13 *a*) richiede fino al 60 % della totale corrente d'esercizio e non può quindi venir usato nella distribuzione di forza da stazioni centrali. Per uno scopo speciale il trasformatore a riccio si presta convenientemente e cioè come rocchetto d'induzione; in questo caso la sua proprietà di lasciar passare una corrente di grande intensità con una piccola tensione è molto utile. Per tutti gli altri scopi si sono mostrati come i più convenienti in pratica i tipi *c* ed *e*.

CAPITOLO III.

Forme in uso. — Costruzione della carcassa. — Proporzioni della carcassa.
 — Riscaldamento dei trasformatori. — Risultati dell'esperienza. —
 Teoria del riscaldamento. — Influenza delle dimensioni lineari. —
 Formola per calcolare approssimativamente la capacità.

Forme in uso. — I trasformatori usati comunemente si possono dividere in due grandi gruppi, e cioè trasformatori a mantello e trasformatori a nucleo.

Quelli del primo gruppo hanno la forma schizzata in figura 14. I rocchetti (P primario ed S secondario) sono allungati e disposti l'uno nell'altro o l'uno sull'altro, e la carcassa è formata da lamierini. Quest'ultima

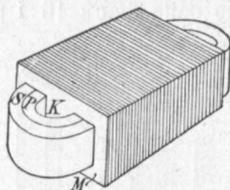


Fig. 14.

è costruita in modo che essa ricopre la maggior parte dei rocchetti, per cui non rimangono libere che le due estremità semicircolari. Si costruisce anche un tipo derivato da questo, nel quale cioè i rocchetti sono circolari ed il ferro è diviso in segmenti e circonda i rocchetti completamente; esso non offre però speciali vantaggi. Le lamiere sono dotate ciascuna di due finestre, per cui, dopo riunite, esse presentano due canali nei quali vanno infilati i rocchetti; effettivamente vengono dapprima eseguiti i rocchetti e poi vengono su di essi disposte le lamiere. Le varie disposizioni che si possono adottare a questo scopo sono riferite qui appresso. I segmenti centrali K delle lamiere formano il vero nucleo, mentre le parti M in forma di telaio costituiscono il cosiddetto mantello.

La carcassa dei trasformatori a nucleo consiste di un telaio di forma rettangolare (vedi figura 15), composto di lamiere, i cui lati più lunghi K costituiscono i nuclei, mentre i lati più corti formano i gioghi J. La sezione

dei nuclei è generalmente quadrata, può essere però anche rettangolare. Nel trasformatore rappresentato dalla figura il piano delle lamiere è parallelo a quello del telaio; vi sono però anche costruzioni nelle quali le superfici delle lamiere sono normali ad un piano passante per gli assi dei due rocchetti. Il telaio ha allora spigoli arrotondati ed è formato da

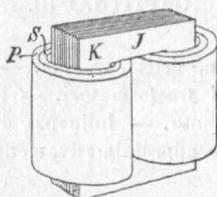


Fig. 15.

striscie di lamiera piegate. I rocchetti (P primario ed S secondario) possono essere formati a strati oppure sono disposti l'uno nell'altro.

Per correnti trifasi si possono usare o tre singoli trasformatore, cioè uno per ciascuna fase, oppure si possono disporre i rocchetti su di una carcassa comune. Le figure 16, 17 e 18 rappresentano tre delle forme in uso. Nel tipo rappresentato dalla figura 16 i gioghi J sono formati da

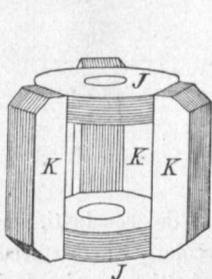


Fig. 16.

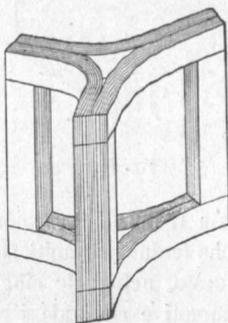


Fig. 17.

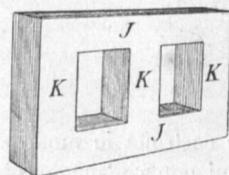


Fig. 18.

dischi ed i nuclei K sono posti a 120° tra loro. Le estremità dei nuclei, come lo mostra la figura, sono assottigliate e vengono compresse contro i gioghi a mezzo di apposite piastre in ghisa. I rocchetti, che per rendere più chiara la figura sono ommessi, vanno infilati, come nella figura 15, sui nuclei. La forma rappresentata in figura 17 si distingue dalla precedente per la forma dei gioghi e per il fatto che le superfici di separazione delle lamiere sono parallele nei nuclei e nei gioghi. Le lamiere dei gioghi vengono tenute unite a mezzo di pezzi speciali in forma di guance che

riuniscono la prima all'ultima lamiera. Per tenere assieme i nuclei, questi vengono provvisti di piastre di bronzo dotate di sporgenze che entrano in scanalature corrispondenti delle guance dei gioghi.

La costruzione rappresentata in figura 18 è un'estensione di quella della figura 15. I tre nuclei K hanno un giogo comune J e ciascun nucleo porta i rocchetti corrispondenti ad una fase.

Costruzione della carcassa. — Nelle figure 14, 15 e 18 le lamiere di cui è composta la carcassa sono disegnate come superfici completamente chiuse, si suppone, cioè, che il nucleo col giogo o col mantello sia formato da un'unica serie di lamiere. Una tale costruzione è anche possibile ed offre il vantaggio che il percorso delle linee di forza non subisce alcuna interruzione in causa di giunti; si ha però anche l'inconveniente di dover avvolgere i rocchetti fra nucleo e giogo, oppure fra nucleo e mantello. L'eseguire l'avvolgimento in tali condizioni offre serie difficoltà, in quanto il filo deve essere fatto passare, per ogni spira dell'avvolgimento, in tutta la sua lunghezza nello spazio sempre limitato per l'avvolgimento. Non si può quindi eseguire i rocchetti sul tornio e non sarebbe neppure possibile farli a mano quando va impiegato filo grosso e quindi rigido. Si avrebbe poi l'inconveniente, che eventuali difetti d'isolamento non potrebbero essere scoperti che a trasformatore completamente costruito, e la loro riparazione necessiterebbe un grande lavoro perfettamente inutile. Per queste ragioni è opportuno costruire il trasformatore in modo, che i rocchetti possano venire avvolti indipendentemente dal nucleo sul tornio, e possibilmente ogni singolo rocchetto separatamente. Allora possono venire facilmente avvolti e bene isolati fili di qualsiasi grossezza, ed i rocchetti così formati possono venir provati per il loro isolamento prima di essere usati nella composizione del trasformatore. Il nucleo viene quindi costruito nell'interno dei rocchetti; per rendere possibile tale costruzione è però necessario di interrompere, in ogni singola lamiera, il percorso delle linee di forza, e si tratta di eseguire questa interruzione in modo che essa non abbia nessuna od una piccola azione sul complesso delle lamiere. Questo scopo si può raggiungere sfalsando le giunzioni da una parte e dall'altra, in modo che da ambedue le parti dei giunti vengano a trovarsi lamiere non interrotte. Allora le linee di forza, anziché saltare la giunzione, possono passare nelle lamiere che stanno dalle due parti, e poichè la superficie di passaggio è enormemente più grande di quella di contatto nel giunto stesso, la resistenza magnetica di questo passaggio può essere senz'altro trascurata. Una carcassa così formata offre quindi effettivamente un percorso continuo alle linee di forza.

Vogliamo, a titolo d'esempio, ricordare alcune di queste costruzioni. Nel trasformatore *Westinghouse* le lamiere sono fatte di un unico pezzo,

ma sono tagliate obliquamente ai due lati dalla colonna centrale (fig. 19). Dopo che i rocchetti sono avvolti ed isolati, la carcassa viene in essi costruita, introducendovi le lamiera una alla volta. A tale scopo la colonna centrale di ciascuna lamiera viene infilata nei rocchetti ripiegando le due ali del giogo. Le due ali vengono quindi rimesse a posto e la seconda lamiera, disegnata più sotto, viene infilata dall'altra parte in modo analogo.

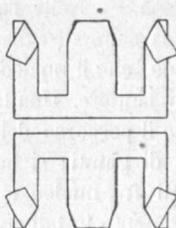


Fig. 19.

In questo modo le fenditure di una lamiera vengono ricoperte dalla parte continua delle lamiere vicine.

Nel trasformatore del *Ferranti* (fig. 20) il nucleo consiste in un fascio di lamiere in forma di striscie, che vengono dapprima infilate nei rocchetti. Le striscie vengono poi, l'una dopo l'altra, ripiegate alle due estremità dei rocchetti in modo da costituire il mantello. La loro lunghezza va calcolata

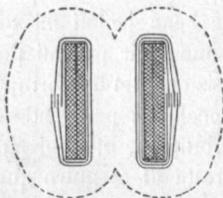


Fig. 20.

in modo, che nel punto di contatto fra le estremità delle striscie ripiegate ne rimanga una piccola parte sovrapposta, come è rappresentato nel disegno.

Nel trasformatore costruito dall'autore (fig. 15) tanto i nuclei quanto i gioghi sono costituiti da fasci di striscie diritte di lamiera, sfalsate in guisa da produrre una sovrapposizione ai quattro angoli della carcassa, come lo mostra la figura 21. Per rendere chiaro questo tipo di costruzione abbiamo rappresentato molto grande lo spessore delle lamiere. Le lamiere vengono tenute a posto a mezzo di bulloni isolati. Poichè tutte le lamiere

impiegate in questa costruzione hanno forma rettangolare, nel ritaglio delle lamiere non va perduto materiale di sorta.

Nella disposizione ideata dal *Crompton* le lamiere consistono in pezzi tagliati a L che vengono infilati alternativamente da una parte e dall'altra in modo, che le giunzioni di uno strato vengono ricoperte dalle parti intere

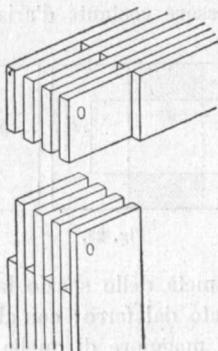


Fig. 21.

delle lamiere successive. Nel ritaglio di questi pezzi, in causa della forma singolare, ha luogo una certa perdita di materiale.

Nel ritaglio delle lamiere dei trasformatori del tipo Westinghouse (figura 19) va anche perduto il materiale corrispondente alle due finestre. Per evitare questa perdita, *Mordey* ha modificato tale costruzione in modo

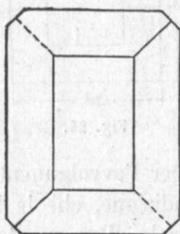


Fig. 22.

che il pezzo intermedio viene costituito dalla parte di mezzo ritagliata da ogni lamiera (figura 23). Da ogni lamiera risultano adunque due pezzi: il mantello rettangolare e la traversa da disporre normalmente ad esso, ossia il nucleo. Le lamiere che costituiscono il mantello vengono disposte esternamente, quelle del nucleo invece vengono infilate nei rocchetti. Secondo questa costruzione l'ampiezza dello spazio per l'avvolgimento

è dato dalla larghezza d del nucleo e non può essere scelto a piacere, come in quello rappresentato in figura 19; perchè come risulta dalla figura, l'altezza di ciascuna finestra è d e la larghezza $\frac{d}{2}$. Ne segue, che le dimensioni esterne del mantello risultano $3d$ e $2d$. Contatto fra nucleo e mantello ha luogo solamente nelle parti tratteggiate, in tutte le altre parti rimane uno spessore costante d'aria fra le lamiera successive.

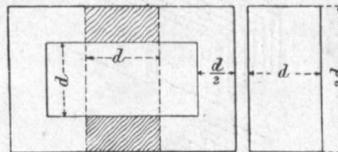


Fig. 23.

Ne viene, che soltanto la metà dello spazio lasciato libero dai rocchetti viene effettivamente occupato dal ferro; con altre parole, la lunghezza di ciascuna spira deve essere maggiore di quella che risulta con la disposizione della figura 19, dove l'intero spazio è occupato dal ferro. Per evitare questo inconveniente, *Mordey* taglia le lamiera ancora secondo la figura 24, senza alcuna perdita di materiale. Il quadrato interno serve a costituire il nucleo, mentre i due pezzi esterni servono a comporre il mantello. Si impiegano quindi cinque pezzi per due strati di lamiera.

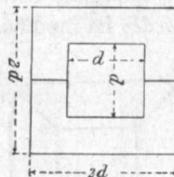


Fig. 24.

La dipendenza dello spazio per l'avvolgimento dalla larghezza del nucleo è una conseguenza della condizione, che le lamiera devono essere ritagliate senza perdita di materiale. Per quanto i rapporti risultanti fra la larghezza del nucleo, l'altezza e la larghezza dello spazio per l'avvolgimento siano in generale soddisfacenti, pure può essere necessario, per ragioni costruttive, di modificare questi rapporti. In questi casi si deve tener calcolo, nel ritaglio delle lamiera, di un certo spreco di materiale. Questo però è trascurabile se si mantiene, per la composizione delle lamiera, la disposizione data dal *Mordey*.

Nelle costruzioni fin qui ricordate si è mantenuto il principio di un ricoprimento delle singole lamiera nei giunti, col quale è resa piccolissima

la resistenza magnetica; si può tuttavia deviare da questo principio producendo le giunzioni tra nucleo e giogo o tra nucleo e mantello con gli spigoli delle lamiere. Secondo la disposizione della figura 16 queste giunzioni sono indispensabili, secondo quelle delle figure 15 e 18 si possono evitare le giunzioni tra gli spigoli; queste vengono però generalmente usate perchè in tal modo riesce più comoda la costruzione dell'apparecchio. Infatti si può comporre tutte le parti della carcassa prima d'infilarvi i rocchetti ed anche il ricambio di un rocchetto, per riparazione del trasformatore, può farsi senza separare le lamiere l'una dall'altra per poi rimetterle a posto. Questa disposizione ha tuttavia lo svantaggio, che nei giunti si verifica una notevole resistenza magnetica, in conseguenza della quale il trasformatore richiede più corrente per la propria magnetizzazione, che nel caso dei giunti a ricoprimento.

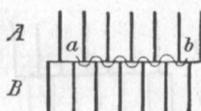


Fig. 25.

Dell'influenza delle giunzioni fra gli spigoli sulla corrente di magnetizzazione tratteremo nel prossimo capitolo. Per ora aggiungeremo soltanto, che la resistenza dipende dalla distanza delle parti in ferro, non è però sempre possibile di ridurre questa distanza a zero perchè allora, nelle superfici di contatto, si formerebbero correnti parassite che produrrebbero perdite di lavoro e riscaldamento. Quando i piani delle lamiere nei giunti sono normali tra loro, come in figura 16, è chiaro che un contatto fra gli spigoli delle lamiere dà luogo a circuiti chiusi che sono tolti all'azione diretta del flusso di linee di forza oscillante attraverso al giunto. Le correnti che ne derivano sono quindi molto intense e provocano non solo una perdita di lavoro, ma indeboliscono pure il campo, cioè aumentano la dispersione magnetica. Per evitare questi inconvenienti bisogna impedire il contatto degli spigoli delle lamiere incrociate interponendovi uno strato isolante.

Se gli spigoli delle lamiere non sono incrociati, ma paralleli tra loro, si producono pure correnti parassite, ma in minori proporzioni. Nella figura 25 è rappresentata una tale giunzione senza interposizione di materia isolante, ed in cui le lamiere sono state disegnate di spessore notevolmente ingrandito. Gli strati isolanti fra le lamiere sono rappresentati dalle linee più marcate. Per quanto lo spessore di tutte le lamiere sia il medesimo (od almeno dovrebbe esserlo), non ci si può tuttavia aspettare che, nei giunti, lamiere e strati isolanti si corrispondano esattamente, ma si dovrà

tener conto, che in alcune parti del giunto si verificherà uno spostamento della parte A sulla parte B. Se ora la figura rappresenta appunto uno di questi punti, è chiaro, che fra le lamiere *a* e *b* ha luogo un contatto metallico e che quindi fra le lamiere deve prodursi una corrente parassita rappresentata dalla linea ondulata. Per tagliare la via a questa corrente dobbiamo disporre nel giunto uno strato di materia isolante (carta o *presspahn*), vedi figura 26. In queste considerazioni abbiamo supposto che in seguito ad una lavorazione molto accurata abbia luogo un effettivo contatto delle superfici in tutta la loro ampiezza; questo fatto però non è probabile in pezzi composti di sottili lamiere. Vi saranno sempre punti in cui il contatto è migliore ed altri in cui esso è peggiore, per cui il pericolo di un riscaldamento nelle superfici di contatto e della conseguente perdita di energia non è grande. Per questa ragione molti fabbricanti

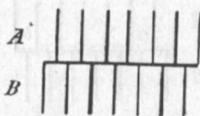


Fig. 26.

omettono l'interposizione dello strato isolante nei giunti a lamiere parallele, quest'ommissione non è invece possibile nei giunti fra lamiere incrociate. Poichè nelle giunzioni fra gli spigoli è necessaria l'interposizione di uno strato isolante, o se questo può essere evitato lo è solamente perchè il contatto non è perfetto, si vede che in ogni caso le giunzioni fra gli spigoli portano una resistenza suppletoria nel percorso delle linee di forza.

Proporzioni della carcassa. — La bontà della costruzione dipende in gran parte dal rapporto che esiste tra le diverse dimensioni della carcassa. Così se ad esempio nel tipo della figura 15 facciamo i nuclei molto corti, siamo costretti, per ottenere lo spazio necessario all'avvolgimento, tenere lunghi i gioghi I. Allora verrà naturalmente ingrandita la lunghezza media delle spire e quindi anche il peso in rame, la costruzione risultante è pertanto poco conveniente. Se viceversa si fanno molto lunghi e sottili i nuclei, diviene lungo il percorso magnetico ed il trasformatore richiede una intensa corrente a vuoto, sarà quindi bene ingrossare i nuclei; anche in questo senso però non bisogna spingersi troppo, perchè allora aumenta eccessivamente il peso del ferro e di conseguenza la perdita per isteresi. Non è possibile di stabilire dati precisi per le condizioni più favorevoli, queste vanno determinate di volta in volta con costruzioni di prova, nelle quali va tenuto conto del rendimento ottenuto a carico medio e massimo,

dei prezzi del ferro e del rame, ecc. Per avere tuttavia un punto di partenza per le prove, si possono scegliere i rapporti indicati nella figura 27. In questa si suppone che il nucleo abbia una sezione quadrata ove, se la unione fra giogo e nuclei è fatta a mezzo di incastri, gli angoli del quadrato possono essere smussati, diminuendo in tal modo alquanto la lunghezza media delle spire. È opportuno indicare tutte le dimensioni in

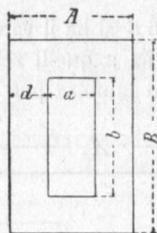


Fig. 27.

millimetri riferendole alla lunghezza d del nucleo pure espresso in millimetri. Avremo allora:

$$\begin{aligned} a &= 10 + 1,2 d \\ b &= 100 + 2,6 d \\ A &= 10 + 3,2 d \\ B &= 100 + 4,6 d. \end{aligned}$$

Nei trasformatori a mantello a nuclei corti, del tipo della figura 14 e nei quali il ritaglio delle lamiere deve essere fatto in modo da non avere perdita di materiale, si ha secondo la fig. 28

$$\begin{aligned} a &= \frac{d}{2} & b &= d \\ A &= 3 d & B &= 2 d. \end{aligned}$$

Se però si tollera una piccola perdita di materiale, a può essere scelto a seconda del bisogno. Eseguendo le costruzioni secondo i rapporti seguenti si ha un piccolissimo spreco di materiale.

$$\begin{aligned} a &= 0,6 d & b &= d \\ A &= 3,2 d & B &= 2,2 d. \end{aligned}$$

oppure

$$\begin{aligned} a &= 0,7 d & b &= d \\ A &= 3,4 d & B &= 2,4 d. \end{aligned}$$

La larghezza della carcassa in senso normale al piano delle lamiere può variare da $2 d$ a $4 d$.

Nei trasformatori monofasi del tipo della figura 15 le spire sono suddivise su due branche; nei trasformatori trifasi del tipo della figura 18 invece le spire di ciascuna fase sono disposte su di un'unica branca. Per questa ragione è opportuno lasciare un po' più posto per l'avvolgimento, facendo

le branche più lunghe e più sottili. Si ottengono dimensioni convenienti scegliendo come larghezza delle finestre 1,3 ad 1,6 volte la larghezza dei nuclei e l'altezza delle finestre 4 a 6 volte la larghezza degli stessi nuclei. Utilizzando le indicazioni della figura 27, riferite opportunamente al nostro caso, si avrà quindi:

$$\begin{aligned} a &= 1,3 d \text{ a } 1,6 d \\ b &= 4 d \text{ a } 6 d. \end{aligned}$$

Facendo $a = 1,5 d$ e $b = 6 d$ si ha il vantaggio, che i pezzi corrispondenti ai gioghi risultano identici a quelli relativi ai nuclei, di modo che si possono impiegare le stesse lamiere per i nuclei e per i gioghi.

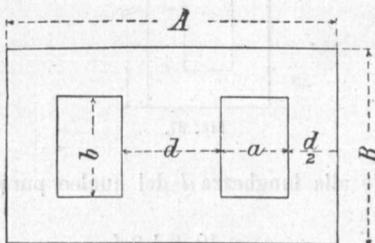


Fig. 28.

Come è stato di già ricordato i trasformatori trifasi possono essere costruiti in vari modi. I metodi più comunemente usati sono i seguenti:

- a) Impiego di tre trasformatori monofasi;
- b) con tre nuclei e con un giogo comune di forma circolare, figura 16;
- c) tre nuclei con giogo comune di forma triangolare, figura 17;
- d) tre nuclei con giogo comune dritto, figura 18.

Il primo naturalmente non è così conveniente come gli altri, perchè ciascun trasformatore non possiede che un terzo della capacità. Fra le altre tre costruzioni non hanno luogo differenze notevoli; *d*) ha il vantaggio della semplicità ed in *c*) il peso della carcassa è alquanto minore. La costruzione *b*) è anche abbastanza semplice, offre però l'inconveniente, che le superfici di divisione delle lamiere nel giogo e nei nuclei sono normali tra loro per cui si deve usare speciale cura per isolare le giunzioni tra gli spigoli delle lamiere. Lo stesso dicasi per una forma derivata dal tipo *b*) pel quale i nuclei non sono circolari, ma come è indicato in figura 29.

Riscaldamento dei trasformatori per effetto delle perdite di lavoro.

— Durante il funzionamento di un trasformatore, una parte del lavoro totale assorbito dal rocchetto primario viene trasformato in calore, che deve essere irradiato dalla superficie dell'apparecchio o esportato in altro

modo. Affinchè ora possa aver luogo irradiazione o sottrazione di calore, la temperatura dell'ambiente circostante deve essere inferiore a quella del trasformatore. Nel trasformatore ha luogo quindi un aumento di temperatura, tanto maggiore, quanto più piccola è la sua superficie in confronto al lavoro complessivo trasformato in calore. L'aumento di temperatura è quindi una funzione di $\theta = \frac{O}{P_v}$, dove O rappresenta la superficie e P_v

il lavoro perduto nel trasformatore. La natura di questa funzione deve stabilirsi a mezzo di prove su trasformatori già costruiti e dipende naturalmente dal tipo del trasformatore provato. In quei tipi nei quali l'aria esterna ha libero accesso ai rocchetti ed alle parti del nucleo, l'azione refrigerante è maggiore di quella che si ha nei rocchetti chiusi entro

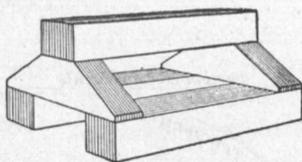


Fig. 29.

involucri. L'aumento di temperatura $T = f(\theta)$ sarà quindi maggiore nel secondo caso che nel primo. Se viene impiegato un involucro, la funzione varia a seconda che lo stesso contiene solamente aria o è riempito di un liquido isolante, come p. es. olio, perchè l'olio conduce il calore più facilmente dell'aria alle pareti.

L'impiego dell'olio come materiale di riempimento tra il trasformatore ed il suo involucro, ha pure il vantaggio che l'isolamento viene meglio assicurato, specialmente se il trasformatore va posto in opera all'aperto od in un luogo umido. Poichè il carico di un trasformatore in funzionamento regolare varia entro larghi limiti, varia pure la sua temperatura e quella dell'aria racchiusa nell'involucro del trasformatore. Si formano pertanto differenze di pressione nell'aria che producono una lenta uscita dell'aria interna e successivamente la penetrazione nell'interno dell'aria umida.

Così a poco a poco penetra l'umidità nell'interno del trasformatore e questa può col tempo guastare l'isolazione. Impiegando l'olio come materiale di riempimento si evita questo inconveniente. Avendo però l'olio un coefficiente di dilatazione piuttosto grande, non si deve riempire completamente l'involucro del trasformatore, oppure bisogna disporre un tubo di sfogo per cui, per effetto del riscaldamento, la pressione interna del liquido non possa salire in modo da far scoppiare l'involucro.

Il riscaldamento prodotto nell'interno del trasformatore dipende da tre cause: 1° dalla perdita nel ferro; 2° dalla resistenza ohmica dei rocchetti e 3° dalle correnti parassite che si producono nell'involucro o nelle altre parti metalliche dell'apparecchio. La perdita nel ferro dipende dall'induzione e dalla frequenza e non dal carico del trasformatore. Il calore sviluppatosi in causa di tale perdita è costante, per tensione e frequenza costanti. Il riscaldamento per resistenza ohmica si produce esclusivamente nei rocchetti e varia proporzionalmente al quadrato della potenza motrice. Il calore prodotto dalle correnti parassite può svilupparsi tanto nei rocchetti che nelle parti metalliche vicine, specialmente se la disposizione geometrica dei rocchetti è tale da produrre una notevole dispersione magnetica. È tuttavia sempre possibile, e per l'uso pratico anche nella maggior parte dei casi necessario, costruire il trasformatore

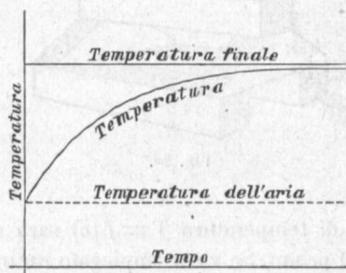


Fig. 30.

in modo che non si produca una notevole dispersione; in tal caso può trascurarsi il riscaldamento dovuto alle correnti parassite, essendo esso molto piccolo.

Rimane quindi da considerare esclusivamente la perdita nel ferro dovuta all'isteresi ed alle correnti parassite nelle lamiere e quella ohmica nei rocchetti. La perdita nel ferro può determinarsi inserendo un wattmetro nel circuito primario quando il trasformatore è scarico. La perdita ohmica può essere determinata anche a pieno carico dalla resistenza dei rocchetti e dall'intensità della corrente. Si può così determinare la perdita complessiva. Per trovare ora il corrispondente aumento di temperatura, si deve mantenere a pieno carico il trasformatore per un certo tempo, misurando di tratto in tratto la sua temperatura. Per eseguire queste misure è opportuno impiegare un termometro ad alcool anzichè uno a mercurio, perchè, se ha luogo dispersione magnetica, possono formarsi correnti parassite nel mercurio, che farebbero segnare una temperatura maggiore di quella effettiva. Riportando la temperatura in funzione del tempo si ottiene una curva (fig. 30), che sale dapprima

rapidamente per avvicinarsi poi lentamente ad un assintoto orizzontale. L'ordinata corrispondente a quest'assintoto dà la temperatura del trasformatore a regime. Ora questa temperatura di regime anche nei piccoli trasformatori viene raggiunta solamente dopo parecchie ore di esercizio, e nei grandi trasformatori ad alto rendimento solo dopo alcuni giorni; una tale esperienza quindi, per la necessità di impiegare una rilevante quantità di energia per lungo tempo, sarebbe molto costosa. Si può evitare tale inconveniente, mantenendo il trasformatore a vuoto anzichè a pieno carico e conducendovi elettricamente una quantità di energia corrispondente alla perdita che si ha a pieno carico. Se questa energia viene fornita sotto forma di una corrente alternata, la produzione di calore sarà limitata al ferro, perchè della piccola quantità di calore che si produce nei rocchetti per effetto della corrente a vuoto non è da tenersi calcolo.

L'esperienza fatta in questo modo non corrisponde quindi esattamente alle condizioni di funzionamento sotto carico, perchè in quest'ultimo caso si produce calore tanto nel ferro come nei rocchetti. Mandando ora invece una corrente continua nel rocchetto primaria, si può regolare la sua intensità in modo, che la perdita di energia corrisponda alla perdita totale a pieno carico, in tal caso però il calore si produrrà solamente nei rocchetti e non nel ferro; neppure questo metodo corrisponde quindi alla realtà. Combinando i due metodi si può riprodurre con sufficiente approssimazione le condizioni d'esercizio. Noi possiamo adunque riscaldare alternativamente ora il rocchetto primario facendovi passare una corrente continua, ed ora il ferro mandando una corrente alternata attraverso il rocchetto secondario. È opportuno impiegare la corrente alternata durante il giorno e quella continua durante la notte, perchè quest'ultima può essere fornita da una batteria di accumulatori che non richiede sorveglianza alcuna.

Un altro metodo di determinare il riscaldamento e che non dà adito ad obiezioni di sorta, è indicato al paragrafo intitolato: " Prova dei trasformatori ". Secondo questo metodo, i due trasformatori identici D e B sono inseriti in modo che ambedue lavorano a pieno carico, mentre il piccolo trasformatore C non deve fornire che l'energia perduta, cioè solo una piccola percentuale della potenza di ciascuno dei grandi trasformatori. Oltre di ciò per abbreviare la durata dell'esperienza si possono riscaldare previamente i grandi trasformatori in una stufa, che trovasi sempre a disposizione nelle fabbriche elettrotecniche.

Risultati dell'esperienza. — Io mi sono lungamente occupato di prove di riscaldamento dei trasformatori, e precisamente a diverse condizioni di carico, per determinare la dipendenza che esiste fra l'aumento

di temperatura e la superficie di raffreddamento per ogni watt di perdita. Queste prove vennero eseguite esclusivamente su trasformatori posti entro involucri in ghisa, con e senza riempimento d'olio. I risultati delle prove fatte sono rappresentati nelle due curve della figura 31.

Gli involucri erano disposti su pavimento in cemento in un grande locale coperto, di modo che l'aria aveva accesso da tutte le parti ed il calore poteva anche venir estratto dal terreno. All'aperto l'aumento di

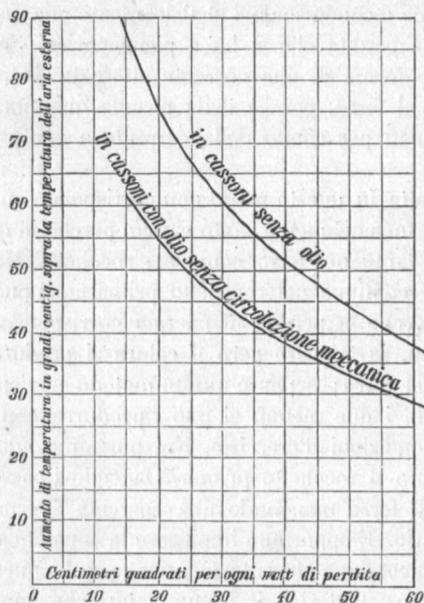


Fig. 31.

temperatura sarebbe stato alquanto minore, e nei locali ristretti alquanto maggiore di quello dato dalle curve qui rappresentate. Nel caso di riempimento con olio non venne impiegato alcun mezzo meccanico per mantenere il liquido in circolazione.

Nell'uso di queste curve per giudicare delle diverse costruzioni non si deve dimenticare che i valori qui indicati valgono solamente per la condizione di regime a pieno carico. Ora la maggior parte dei trasformatori, e specialmente quelli destinati all'illuminazione, sono bensì sempre in esercizio, ma non sempre a pieno carico. Di questa circostanza si può tener calcolo determinando la perdita per diversi periodi della giornata, stabilendo così un valore medio Pv che va posto nella formola $o = O : Pv$ in cui o rappresenta l'ascissa nella curva della temperatura.

Teoria del riscaldamento. — È interessante il seguire in via teorica il processo di riscaldamento di un trasformatore. I risultati di questa ricerca valgono naturalmente anche per altri corpi riscaldati per effetto di una corrente, così noi li utilizzeremo per rispondere alla domanda, se le valvole di sicurezza possono preservare i cavi alimentati da trasformatori dalle scariche attraverso il coibente. Una sottrazione di calore può aver luogo soltanto se la temperatura del corpo è superiore a quella del mezzo che lo circonda (nel caso dei trasformatori aria od'olio). La quantità di calore sottratta nell'unità di tempo può esser posta, con sufficiente approssimazione per il nostro scopo, proporzionale alla differenza di temperatura. La sottrazione di calore avviene effettivamente in due modi diversi, e cioè per irradiazione e per convezione, cioè per trasporto successivo di particelle. La prima di queste azioni cresce proporzionalmente alla differenza y di temperatura esistente tra il corpo ed il mezzo in cui esso si trova; la seconda invece cresce con maggiore rapidità, perchè la circolazione del mezzo diviene più viva per una maggiore differenza di temperatura, cioè il trasporto di calore a piccole particelle viene agevolato dallo strisciamento del mezzo sul corpo più caldo.

Se y è la differenza di temperatura, O la superficie riscaldata e P l'energia trasformata in calore espressa in watt, potremo porre

$$P = k O y,$$

dove k è un coefficiente, che cresce con y . Tuttavia per semplificare la trattazione matematica, è necessario supporre k costante, e dobbiamo quindi esaminare anzitutto se l'errore così introdotto sia molto grande. Ciò si può fare in base ai risultati dell'esperienza rappresentata in figura 31.

Poniamo

$$o = \frac{O}{P},$$

sarà quindi

$$1 = k o y.$$

Se ora k fosse assolutamente costante, le curve rappresentate in fig. 31 con una scelta opportuna delle scale sarebbero delle iperboli equilatera. Questo però non è il caso. La differenza non è trascurabile, come si può vedere tosto, calcolando il valore di k delle curve. Così, per esempio, per un trasformatore senza raffreddamento a mezzo d'olio si ha:

$o =$	60	40	20
$T =$	38	52	75
$k =$	0,00044	0,00048	0,00067

La differenza è specialmente notevole per grandi valori di y . Siccome tuttavia nei trasformatori viene ammesso raramente un aumento di temperatura maggiore di 60° o 65° C., e la differenza non è molto grande

entro a questi limiti, possiamo senza grave errore ammettere k come costante.

Ciò premesso, possiamo stabilire la seguente equazione di equilibrio del calore. Il calore formatosi nel tempo dx , espresso in unità di lavoro (volt-ampère-secondi) verrà utilizzato:

1° per innalzare la temperatura del corpo da y ad $y + dy$ gradi Celsius:

2° per ripristinare il calore $kOy dx$ esportato.

Se sono conosciuti i pesi G_k del rame e G_e del ferro, si può facilmente calcolare il calore necessario a produrre l'aumento di temperatura ed il corrispondente lavoro elettrico. Il calore specifico del ferro è 0,11 e quello del rame 0,093. La quantità di calore corrispondente all'aumento di temperatura dy è quindi:

$$(0,11 G_e + 0,093 G_k) dy.$$

Il lavoro corrispondente in watt-secondi è

$$4160 (0,11 G_e + 0,093 G_k) dy = c dy,$$

dove c è una costante, che può essere calcolata per ciascun trasformatore dell'equazione

$$c = 4160 (0,11 G_e + 0,093 G_k).$$

Per poter stabilire l'equazione d'equilibrio del calore è necessario esprimere anche il calore esportato in watt-secondi e l'energia perduta in watt. Avremo quindi

$$P dx - c dy - b y dx = 0,$$

dove

$$b = kO.$$

L'equazione d'equilibrio del calore può anche venir scritta nel modo seguente:

$$(P - by) dx - c dy = 0,$$

$$\left(y - \frac{P}{b}\right) dx + \frac{c}{b} dy = 0,$$

$$dx = -\frac{c}{b} \frac{dy}{\left(y - \frac{P}{b}\right)},$$

$$x = -\frac{c}{b} \log_{nat} \left(y - \frac{P}{b}\right) + C,$$

dove C rappresenta una costante d'integrazione.

All'inizio della prova si ha $x = 0$ ed $y = 0$; abbiamo quindi

$$0 = -\frac{c}{b} \log_{nat} \left(-\frac{P}{b}\right) + C.$$

Dalle due equazioni si ricava

$$x = -\frac{c}{b} \log_{nat} \left(\frac{y - \frac{P}{b}}{-\frac{P}{b}} \right),$$

$$x = -\frac{c}{b} \log_{nat} \left(1 - \frac{b}{P} y \right),$$

$$x = -\frac{c}{kO} \log_{nat} (1 - k o y).$$

Ovvero impiegando i logaritmi decimali

$$x = -\frac{2,3c}{kO} \log (1 - k o y) \quad (11)$$

La temperatura finale $y = T$ non verrà effettivamente raggiunta che dopo un tempo infinito. Essa è data da

$$T = \frac{1}{k o}.$$

Se tuttavia ci accontentiamo di un valore approssimato del 99 ‰ a quello della vera temperatura finale, cioè se tolleriamo un errore dell'1 ‰, il valore dell'espressione tra parentesi nella formola 11 diviene 0,01 ed il logaritmo -2 . Il tempo necessario adunque per raggiungere lo stato di regime in rapporto al riscaldamento è dato dalla formola

$$t = 4,6 \frac{c}{k O} \text{ secondi.}$$

Il fattore 4,6 è alquanto arbitrario; esso dipende dall'esattezza che si richiede nel valore della temperatura finale. Se cioè l'errore deve essere minore dell'1 ‰, il fattore diviene maggiore e viceversa.

Supponiamo pertanto di avere due trasformatori di eguale tipo, ma di diversa grandezza, in modo che le dimensioni lineari dell'uno sieno m volte quelle dell'altro. Poichè k è eguale pei due trasformatori, c varia con la terza ed O con la seconda potenza, il rapporto delle durate per cui i trasformatori raggiungono le loro temperature massime è dato da

$$\frac{t_2}{t_1} = m,$$

dove t_1 si riferisce al trasformatore minore e t_2 a quello m volte maggiore. Risulta quindi, che la temperatura massima viene raggiunta tanto più tardi, quanto più grande è il trasformatore. Il valore di questa temperatura dipende naturalmente dal rapporto $O/P = o$. Se T_1 è la temperatura del trasformatore piccolo e T_2 quella del trasformatore m volte maggiore, avremo a parità di sistema di raffreddamento (k è eguale nei due casi)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{o_1}{o_2}.$$

Ora è $O_2 = m^2 O_1$ ed a parità di sollecitazione del materiale $P_2 = m^3 P_1$ di modo che

$$\frac{O_2}{P_2} = \frac{O_1}{P_1} \frac{1}{m} \quad \text{ovvero} \quad \frac{o_1}{o_2} = m.$$

$$\frac{T_2}{T_1} = m.$$

Se adunque nei due trasformatori si ha lo stesso sistema di raffreddamento e viene ammessa la medesima sollecitazione nel ferro e la stessa densità di corrente nel rame, la temperatura finale del trasformatore maggiore è m volte quella del piccolo, ed il tempo richiesto per raggiungere tale temperatura è pure m volte maggiore. Affinchè la temperatura del trasformatore grande non superi quella del piccolo, deve essere evidentemente

$$k_1 o_1 = k_2 o_2$$

$$k_1 \frac{O_1}{P_1} = k_2 \frac{O_2}{P_2},$$

$$k_1 \frac{O_1}{P_1} = k_2 \frac{O_1 m^2}{P_2},$$

$$\frac{k_1}{P_1} = m^2 \frac{k_2}{P_2}.$$

A parità di sollecitazione del materiale $P_2 = m^3 P_1$, quindi

$$k_1 = \frac{k_2}{m}.$$

Cioè il sistema di raffreddamento usato per il trasformatore maggiore deve essere tale, che la quantità di calore sottratta dall'unità di superficie deve essere m volte maggiore del valore corrispondente per il trasformatore più piccolo. Questo può essere ottenuto mediante ventilazione, riempimento d'olio, circolazione meccanica dell'olio o raffreddamento di quest'ultimo con tubi refrigeranti. Se questi mezzi non sono sufficienti, non rimane altro per soddisfare la relazione

$$k_2 = \frac{k_1}{m^2} \frac{P_2}{P_1}$$

che fare $P_2 < m^3 P_1$, cioè tenere minore la sollecitazione del materiale nel trasformatore grande che in quello piccolo.

I risultati di queste considerazioni possono venir riassunti come segue:

A parità di sistema di raffreddamento ed a pari sollecitazione del materiale la temperatura finale è proporzionale alle dimensioni lineari.

Per avere eguale temperatura finale l'azione del sistema di raffreddamento deve crescere in proporzione alle dimensioni lineari, ovvero deve essere corrispondentemente diminuita la sollecitazione del materiale.

Il tempo necessario a raggiungere la temperatura finale cresce proporzionalmente alle dimensioni lineari e diminuisce coll'aumentare l'azione del sistema refrigerante.

Esempio. — Per un dato trasformatore al carico di 11 kilowatt sia $P = 333$, $O = 12000$, $o = 36$ e $k = 0,000515$, supposto che il trasformatore sia disposto entro un involucro privo d'olio. Dall'equazione

$$1 = k o T$$

ricaviamo l'aumento di temperatura

$$T = 54^{\circ} \text{C.}$$

Per determinare il tempo necessario a raggiungere questa temperatura dobbiamo dapprima calcolare c .

Si ha

$$c = 4160 (0,11 G_o + 0,093 G_k).$$

$$\text{Il peso del ferro sia } G_o = 179 \text{ kg.} \quad . \quad . \quad 0,11 \quad G_o = 19,7$$

$$\text{Il peso del rame sia } G_k = 111,5 \text{ kg.} \quad . \quad . \quad 0,093 \quad G_k = 10,3$$

30

$$c = 30 \times 4160 = 124.800$$

$$t = \frac{4,6 \times 124.800}{0,000515 \times 12.000} = 93.000 \text{ secondi} = 26 \text{ ore.}$$

Se ora poniamo il trasformatore nell'olio, caricandolo ancora con 11 kw., la temperatura finale (che naturalmente sarà più bassa) viene raggiunta più presto. L'azione refrigerante è divenuta naturalmente più energica per effetto dell'olio. Come si può rilevare dalla curva inferiore della figura 31, il valore di k è ora 0,00067. La temperatura finale importa 41°C. ed essa viene raggiunta in

$$26 \times \frac{515}{670} = 20 \text{ ore.}$$

Supponiamo ora di raddoppiare le dimensioni lineari del trasformatore senza migliorare il sistema di raffreddamento. Poichè in tal caso P acquista un valore otto volte maggiore, O diviene quadruplo e k è rimasto costante, t si sarà raddoppiato. Il trasformatore richiederà 40 ore per raggiungere la sua temperatura finale (o più esattamente il 99 % di essa). Quest'ultima importerebbe 82°C. ciò che non può tollerarsi. Per diminuirla dobbiamo migliorare il sistema di raffreddamento, ad esempio costruendo un serpentino e facendolo attraversare da acqua fredda oppure disponendo nell'interno canali di circolazione e nervature all'esterno dell'involucro. Supponiamo che in tal modo ci sia riuscito di portare la temperatura finale a 65°C. , allora il valore di k corrispondente a questo sistema di raffreddamento sarebbe

$$0,00067 \times \frac{82}{65} = 0,000845;$$

ed il tempo necessario a raggiungere la temperatura finale di 65° C. su quella esterna (cioè la temperatura effettiva di circa 80° C.) non sarebbe più di 40 ore, ma soltanto di

$$40 \times \frac{65}{82} = 31,6 \text{ ossia, arrotondando, } 32 \text{ ore.}$$

Come verrà indicato in seguito, a parità di sollecitazione del materiale, la capacità del trasformatore cresce con la quarta potenza delle dimensioni lineari. Il trasformatore più grande avrà quindi una capacità 16 volte maggiore di quello piccolo, cioè 166 kw. La perdita totale è 8 volte maggiore, cioè circa 2,7 kw. ovvero 1,64 % della capacità. Questo risultato favorevole è però solamente possibile nel caso che si riesca realmente a migliorare il raffreddamento in modo da non superare l'aumento di temperatura di 65 % C. Se non è possibile far ciò, è necessario diminuire la sollecitazione del materiale.

Naturalmente con ciò si diminuirà pure la capacità del trasformatore. Fin qui abbiamo considerato specialmente l'azione delle dimensioni lineari sul riscaldamento, il tempo necessario per raggiungerlo e solamente per incidenza abbiamo parlato della loro relazione con la capacità. Vogliamo trattare ora di quest'ultimo argomento un po' più da vicino.

Influenza delle dimensioni lineari. — La maggior parte delle macchine e degli apparecchi meccanici hanno la proprietà di essere tanto più convenienti per rendimento ed utilizzazione del materiale quanto maggiori sono le loro dimensioni, è quindi da aspettarsi che anche i grossi trasformatori debbano riescire più leggeri in rapporto alla capacità e debbano avere un rendimento migliore di quelli piccoli. Entro certi limiti avviene realmente così. Un trasformatore da 10 kw., ha certamente un peso minore di dieci volte quello di un trasformatore da 1 kw. ed il suo rendimento è anche migliore. Se però paragoniamo tra loro un trasformatore da 100 kw. con uno da 10 kw. non riesce così evidente il vantaggio del trasformatore maggiore; esso può anzi sparire completamente. La ragione di ciò sta nel fatto che il trasformatore maggiore, in causa della sua superficie di raffreddamento più piccola in rapporto al suo volume, non può venir caricato tanto quanto il piccolo trasformatore se la quantità di calore sottratta per unità di superficie deve rimanere la medesima. Ora, fino a tanto che il più piccolo dei due trasformatori da confrontare possiede dimensioni lineari così piccole, che la sua superficie di raffreddamento è molto abbondante in rapporto alla sua capacità, si può tollerare nel trasformatore maggiore un più forte riscaldamento e con l'aumento delle dimensioni lineari si otterrà un grande vantaggio; se però il trasformatore più piccolo ha dimensioni tali, che

raggiunge quasi il limite del riscaldamento massimo possibile, questo limite non deve essere superato neppure nel trasformatore maggiore, e l'aumento delle dimensioni lineari non offre più lo stesso vantaggio in rapporto all'utilizzazione del materiale anzi, in certe circostanze, può persino non offrirne alcuno.

Un esempio chiarirà meglio questo fatto. Supponiamo che il trasformatore più piccolo sia costruito per una capacità di 10 kw. e che presenti a pieno carico una perdita di 400 watt, divisi nel modo seguente: isteresi 200 watt; perdita ohmica 100 watt in ciascun circuito. La superficie totale di raffreddamento sia di 16000 cm², cioè di 40 cm² per watt, ciò che corrisponde ad un aumento di temperatura di 50° C. su quella dell'ambiente ad esercizio continuato. L'induzione nel ferro sia $B = 5000$. Aumentiamo ora del doppio le dimensioni lineari della carcassa. A parità di sollecitazione magnetica il flusso di forza diverrebbe quadruplo e per ottenere le medesime forze elettromotrici è sufficiente la quarta parte di ciascun rocchetto. All'opposto lo spazio per l'avvolgimento è divenuto quattro volte maggiore, e quindi ogni singolo filo col suo involucro isolante può occupare uno spazio 16 volte maggiore. Poichè ora non è necessario di ingrandire lo strato isolante nello stesso rapporto del filo, e potendo impiegare per il rocchetto ad alta tensione filo a sezione rettangolare anzichè circolare, ne viene che la sezione del filo stesso può essere portata ad un valore un po' maggiore di 16 volte quella precedente. Per semplicità non terremo conto per il momento di questa circostanza, osserveremo però, che il risultato teorico ottenuto per il trasformatore maggiore non è tanto favorevole come si verifica in realtà.

Consideriamo dapprima l'avvolgimento a bassa tensione. La lunghezza di ciascuna spira è raddoppiata, abbiamo però solamente un quarto delle spire. La lunghezza totale dell'avvolgimento è quindi ridotto alla metà. Se s'avesse impiegato lo stesso filo, la resistenza sarebbe adunque ridotta alla metà. Supponiamo che il trasformatore minore dia 100 ampère e 100 volt. Il calore dovuto alla resistenza importando l'1 % cioè 100 watt, corrisponderebbe ad una resistenza di 0,01 ohm. La resistenza del rocchetto secondario del trasformatore maggiore avvolto con lo stesso filo sarebbe di 0,005 ohm; siccome però il filo ha una sezione 16 volte superiore, la sua resistenza sarà $\frac{0,005}{16}$ ohm.

Se ora supponiamo che il filo sia egualmente sollecitato, l'intensità della corrente nel rocchetto secondario importerà 1600 ampère e la perdita di tensione sarà di 0,5 volt, pari cioè ad 1/2 %. Analogo ragionamento può farsi per il rocchetto ad alta tensione, di modo che la perdita ohmica corrisponderà all'1 % soltanto della totale capacità di 160 kw., cioè a 1600 watt. La perdita nel ferro è cresciuta di otto volte in con-

fronto al peso ed importa quindi pure 1600 watt. Nel trasformatore grande avremo quindi una perdita totale di 3200 watt ed una capacità di 160 kw. La perdita totale corrisponde dunque soltanto al 2 ‰, mentre nel piccolo trasformatore essa importava il 4 ‰. In questo rapporto il trasformatore grande è molto migliore di quello piccolo; non è però sempre possibile di utilizzare l'intera capacità con un tal rendimento perchè allora l'apparato si riscalderebbe eccessivamente. L'utilizzazione può ottenersi impiegando speciali disposizioni per raffreddare il trasformatore, ma per ora vogliamo prescindere da esse. Abbiamo supposto che il trasformatore più piccolo abbia una superficie refrigerante di 16000 cm², cioè 40 cm² per ogni watt di perdita ad esercizio continuato. L'aumento di temperatura in queste condizioni sarà di circa 50° C. Il trasformatore grande ha una superficie di raffreddamento quattro volte maggiore ed una perdita 8 volte maggiore, la sua superficie refrigerante non corrisponde quindi più a 40, ma solamente a 20 cm² per ogni watt di perdita, il che corrisponde ad un aumento di temperatura di 76° C. ad esercizio continuato. Un tale riscaldamento non può essere tollerato; per evitarlo abbiamo due mezzi, cioè: o possiamo riempire l'involucro del trasformatore di olio, con che si ottiene una migliore trasmissione del calore dal trasformatore alle pareti e l'aumento di temperatura viene così ridotto a soli 55° C., aumento ammissibile; ovvero possiamo produrre una ventilazione meccanica aumentando così l'azione refrigerante o finalmente, se non vogliamo impiegare alcuno di questi mezzi, dobbiamo diminuire di tanto il carico, che la perdita totale non superi i 1600 watt, nel qual caso la superficie di raffreddamento per ogni watt di perdita raggiunge il valore di 40 cm², come per il piccolo trasformatore.

Per paragonare i due trasformatori su di una stessa base, dobbiamo scegliere questo terzo mezzo e determinare di quanto va diminuito il carico perchè la perdita complessiva venga dimezzata. La perdita nel ferro era di 1600 watt quando l'induzione era $B = 5000$. Dalle curve della figura 9 troviamo, che per $\mathcal{C} = 50$ a ciascun kg. di ferro corrisponde una perdita di 1,08 watt. Per avere la metà di perdita dobbiamo cercare sulle curve quel punto pel quale la perdita per kg. di ferro non importa che 0,54 watt. Questo punto corrisponde a $B = 3350$. Per lavorare con questa induzione dobbiamo o diminuire la tensione od aumentare il numero delle spire. Se adunque non modifichiamo nulla dell'avvolgimento, non otterremo più 100 volt nel rocchetto secondario, ma solamente

$$100 \times \frac{3350}{5000} = 67 \text{ volt,}$$

con ciò però sarà ridotta alla metà la perdita nel ferro. Per ridurre alla metà anche la perdita ohmica $W J^2$, deve venir ridotto alla metà il qua-

drato dell'intensità della corrente, l'intensità della corrente stessa deve quindi essere diminuita nel rapporto di $\sqrt{2}$ a 1, per cui nel nostro caso avremo $1600 : \sqrt{2} = 1135$. La capacità del trasformatore non è quindi più di 160 kw., ma solamente di $67 \times 1135 = 76,5$ kw. In realtà la capacità riuscirà alquanto maggiore, perchè, come abbiamo già ricordato, il rapporto tra lo spazio occupato dal rame con quello perduto per la materia isolante è più conveniente nel trasformatore grande. Quanto importi questo vantaggio deve essere determinato per mezzo del disegno e del calcolo del trasformatore. Supponiamo di guadagnare in tal modo ancora 8 kw., allora il trasformatore grande fornirebbe ad esercizio prolungato 84 kw. ed il suo riscaldamento non sarebbe superiore a quello del piccolo trasformatore. La capacità è dunque aumentata nel trasformatore più grande a più di 8 volte quella del piccolo, e siccome il suo peso è divenuto pure otto volte maggiore, risulta che l'utilizzazione del materiale è circa la medesima nei due trasformatori, l'aumento delle dimensioni lineari non ha cioè portato nessun vantaggio. In rapporto al rendimento si ha tuttavia raggiunto un notevole vantaggio, perchè il trasformatore da 84 kw. non ha che una perdita di 1600 watt, cioè neppure del 2%, mentre la perdita del trasformatore da 10 kw. raggiunge il 4%. Il rendimento è salito cioè dal 96% al 98%.

La modificazione nelle dimensioni lineari riesce di ben maggior vantaggio per il trasformatore grande, se la sua capacità non è limitata dal rapporto tra la superficie refrigerante e la perdita in watt. Questo avviene, primo, quando il trasformatore piccolo è di dimensioni così piccole che la sua capacità non è limitata dal fatto del riscaldamento, ma solamente da quella di un buon rendimento; e secondo, quando per il grande trasformatore viene impiegato un mezzo artificiale di raffreddamento. Se l'azione refrigerante è sufficientemente energica, la capacità può venire aumentata in proporzione alla quarta potenza dell'aumento delle dimensioni lineari (quindi nel nostro esempio da 10 kw. a $10 \times 2^4 = 160$ kw.), mentre il peso non aumenta che in proporzione della terza potenza. L'impiego del materiale diviene quindi più conveniente, aumentando le dimensioni lineari; cioè, maggiori sono le dimensioni lineari e minore diviene il peso del trasformatore per kw. di capacità. La perdita percentuale d'energia è invece inversamente proporzionale alle dimensioni lineari.

Nell'utilizzazione del grande trasformatore possiamo tuttavia fare ancora un passo. Noi possiamo supporre di mantenere entro determinati limiti la temperatura anche per una maggiore capacità, impiegando mezzi speciali di raffreddamento (come circolazione meccanica d'olio, impiego di acqua fredda in un recipiente esterno). In tal caso potremo quindi aumentare ancor più la sollecitazione magnetica del ferro e la densità della corrente

nei rocchetti del grande trasformatore. Supponiamo di aumentare la tensione primaria in modo, che essa divenga $B = 7300$. La perdita nel ferro diverrà allora di 2,1 watt per kg. a 50 periodi ed essa salirà quindi da 1600 a

$$1600 \cdot \frac{2,1}{1,08} = 3100 \text{ watt.}$$

Così pure la tensione del rocchetto secondario da 100 volt diverrà

$$100 \cdot \frac{7300}{5000} = 146 \text{ volt.}$$

Se tolleriamo anche nel rame una perdita eguale a quella che si ha nel ferro, l'intensità della corrente aumenterà nel rapporto di

$$1 : \sqrt{\frac{3100}{1600}} = 1 : 1,39.$$

La capacità del trasformatore non è quindi più di 160 kw. ma di

$$\frac{146 \times 1600 \times 1,39}{1000} = 325 \text{ kw.}$$

con una perdita di 6200 watt. La perdita è quindi circa del 2% ed il rendimento è pure approssimativamente quello di prima. Aumentando cioè la sollecitazione del materiale abbiamo raddoppiato la capacità, senza diminuire per questo il rendimento. La capacità del nuovo trasformatore per unità di peso di materiale attivo è quadruplicata in confronto al trasformatore piccolo. Tuttavia la superficie refrigerante non è più di 40, ma di soli 10 cm² per ogni watt di perdita, ed un esercizio continuato non è possibile che impiegando mezzi speciali di circolazione o raffreddamento dell'olio.

Nei grandi trasformatori è sempre conveniente l'impiego di tali mezzi di raffreddamento, perchè il loro costo non può essere che piccolo in confronto al risparmio di materiale. Vengono effettivamente costruiti trasformatori fino 1000 kw. e più, dotandoli di un'energica ventilazione, di serpentini refrigeranti o di analoghe disposizioni. Queste considerazioni furono fatte nell'ipotesi, che il rapporto tra le dimensioni lineari dei due trasformatori sia di 1:2. Sarebbe stata evidentemente possibile la stessa considerazione per un rapporto qualsiasi 1: m . Venne scelto il rapporto numerico, perchè esso ha facilitato la considerazione stessa, possiamo però ora estendere i risultati al caso in cui l'aumento delle dimensioni lineari sia fatto in un rapporto m ; va però osservato che i risultati non sono matematicamente esatti, ma solo in linea approssimata. Ciò dipende in parte dal fatto, che come punto di partenza del paragone dobbiamo ammettere una determinata induzione per il trasformatore piccolo, la cui scelta naturalmente pesa sul calcolo; in parte dipende pure dall'abilità

del costruttore nel progettare il trasformatore, di questo fattore però non è possibile tenere nessun calcolo nelle formole. Il risultato della nostra considerazione non è quindi che una prima approssimazione, utile tuttavia per progetti di massima. Vogliamo perciò riunire i risultati così ottenuti in una tabella. Indichiamo con P la capacità e P_v la perdita totale del piccolo trasformatore, O la sua superficie refrigerante, o la superficie refrigerante per ogni watt di perdita (quindi $o = \frac{O}{P_v}$) ed m il rapporto tra le dimensioni lineari del piccolo e del grande trasformatore. Dobbiamo distinguere tre casi riguardanti il grande trasformatore:

I. La superficie refrigerante per watt è la stessa ed il riscaldamento nei due trasformatori è eguale a parità di sistema di raffreddamento;

II. La sollecitazione magnetica ed elettrica del materiale è la stessa. A parità di sistema di raffreddamento il riscaldamento è maggiore nel trasformatore più grande, o a parità di riscaldamento l'azione del sistema di raffreddamento deve essere più energica;

III. La sollecitazione del materiale nel grande trasformatore deve essere tanto maggiore del corrispondente valore pel piccolo trasformatore, che la superficie refrigerante per watt di perdita deve stare nel rapporto $1:m^2$ rispetto a quella del trasformatore normale. Naturalmente il trasformatore grande deve essere in tal caso provvisto di una speciale disposizione pel suo raffreddamento.

Indicazione delle grandezze	Trasformatore piccolo normale	Grande Trasformatore		
		I	II	III
Dimensione lineare	l	$l_1 = m l$	$m l$	$m l$
Peso	G	$G_1 = m^3 G$	$m^3 G$	$m^3 G$
Superficie refrigerante	O	$O_1 = m^2 O$	$m^2 O$	$m^2 O$
Capacità	P	$P_1 = m^3 P$	$m^4 P$	$m^5 P$
Perdita	P_v	$P_{v1} = m^2 P_v$	$m^3 P_v$	$m^4 P_v$
$O:P_v$	o	$o_1 = o$	$\frac{o}{m}$	$\frac{o}{m^2}$
Peso per chilowatt	g	$g_1 = g$	$\frac{g}{m}$	$\frac{g}{m^2}$
Rendimento	n	$n_1 =$	$\frac{m-1+n}{m}$	

Un esempio chiarirà meglio l'uso di questa tabella. Supponiamo di aver trovato per un trasformatore da 5 kw. una buona costruzione con un rendimento del 95 %. Consideriamo questo come il trasformatore normale e vogliamo costruirne un altro, ingrandendo le sue dimensioni,

della capacità di 15 kw. Per poter eseguire il disegno del nuovo trasformatore è necessario determinare anzitutto la grandezza delle dimensioni lineari.

Supponiamo che il trasformatore grande debba avere come quello piccolo ventilazione naturale. Nel piccolo trasformatore sia $o = 60$, il che corrisponde ad un aumento di temperatura di 38°C . Vogliamo permettere nel grande trasformatore un aumento di temperatura di 55°C ., risulterà $o_1 = 35$. Facciamo dapprima l'ipotesi di un'eguale sollecitazione del materiale e determiniamo m dalla relazione $m = \frac{o}{o_1} = 1,72$ (Il rubrica della tabella), come è prevedibile otterremo allora dimensioni troppo grandi e quindi un'eccessiva capacità, risulta infatti

$$P_1 = 5 \times 1,72^4 = 43 \text{ kw.}$$

Consideriamo ora il trasformatore da 43,5 kw. com'è normale e determiniamo dalla rubrica II le dimensioni del trasformatore da 15 kw. Avremo adunque $P = 43,5$ e $P_1 = 15$; quindi

$$m = \sqrt[4]{\frac{15}{43,5}} = 0,77.$$

La dimensione lineare del trasformatore da 5 kw. era l , quella del trasformatore da 43,5 kw. $1,72 l$, la dimensione del trasformatore da 15 kw. risulterà quindi $l_1 = l \times 1,72 \times 0,77 = 1,325 l$. Se adunque la grossezza del nucleo è di 100 mm., la dimensione analoga del trasformatore di 15 kw. deve essere di 133 mm.

Come controllo possiamo anche calcolare la grossezza del nucleo dalla rubrica I per pari raffreddamento, cioè per $o_1 = 60$. Avremo allora

$$P_1 = m^3 \times 5 = 15, \quad m = \sqrt[3]{3} = 1,44.$$

La grossezza del nucleo in tal caso importerebbe quindi 144 mm. anziché 133. La differenza dipende dal fatto, che la dimensione maggiore corrisponde ad un trasformatore in cui ad esercizio continuato si produce un aumento di temperatura di soli 38°C . in luogo dei 55°C . permessi. Per $o_1 = 60$, cioè quando il riscaldamento è minore, il peso del trasformatore importa 3 G; per $o = 35$, cioè quando il riscaldamento è di 55°C . il peso del trasformatore diviene $1,325^3 \text{ G} = 2,33 \text{ G}$. Tollerando quindi il maggiore riscaldamento possiamo diminuire il peso ed approssimativamente anche il costo del trasformatore da 15 kw. del

$$\frac{300 - 233}{300} \times 100 = 22,4 \%$$

La superficie refrigerante del trasformatore da 5 kw. era di 60 cm^2 per watt, in tutto quindi $O = 250 \times 60 = 15.000 \text{ cm}^2$. Nel trasformatore avente un nucleo di 133 mm. di grossezza abbiamo

$$O_1 = 15000 \times 1,33^2 = 26.500 \text{ cm}^2,$$

dove corrispondono 35 cm² per watt. Abbiamo quindi una perdita complessiva di $26.500 : 35 = 760$ watt, cioè circa il 5% della capacità totale. Se scegliamo invece il nucleo più grosso, avremo

$$P_{v1} = 1,44^2 \times 250 = 520 \text{ watt,}$$

cioè solamente il 3 $\frac{1}{2}$ % della capacità complessiva. Riuniamo ora in una tabella i valori così determinati. Per avere una base per paragonare i pesi tra loro, supponiamo, che il trasformatore da 5 kw. pesi 20 kg. per kw.

Indicazione delle grandezze	Trasformatore da		
	5 kw.	15 kw.	15 kw.
Groschezza del nucleo . . . mm.	100	133	144
Peso complessivo . . . kg.	100	233	300
Peso per chilowatt . . . kg.	20	15,6	20
Aumento di temperatura . ° C.	38	55	38
Rendimento . . . %	95	95	96,5

Il costruttore quindi nel fare il disegno deve decidere, se scegliere la grandezza maggiore o minore come dimensione del nucleo. Il scegliere una dimensione superiore ai 144 mm. ci condurrebbe ad un apparecchio troppo pesante, mentre una dimensione minore ai 133 mm. renderebbe necessario l'impiego di speciali disposizioni pel raffreddamento del trasformatore, il cui costo sarebbe notevole in confronto al costo dell'apparato stesso. La scelta va fatta quindi tra i limiti indicati nella tabella considerando le spese di costruzione ed il rendimento. Se si tratta di ottenere una costruzione leggera ed a buon prezzo, allora si impiegherà la dimensione minore; se invece si tratta di avere un elevato rendimento, si sceglierà la dimensione maggiore.

L'utilità pratica delle considerazioni fatte sull'importanza delle dimensioni lineari sta in ciò, che si offre un mezzo al costruttore per eseguire il disegno di un nuovo trasformatore senza bisogno di fare altre prove, quando si abbia il disegno di un buon trasformatore di altra grandezza.

Formole per calcolare approssimativamente le capacità. — Per trasformatori di piccola e media grandezza, senza speciali disposizioni refrigeranti, come è già stato indicato, a parità di frequenza la capacità è approssimativamente proporzionale al peso. Essa è quindi pure presso a poco proporzionale al volume del ferro. Nei piccoli trasformatori solamente una piccola parte del volume totale corrisponde ai nuclei, in quelli grandi una parte maggiore; la differenza però non è considerevole. Ne viene che anche il volume del nucleo offre approssimativamente una misura per la capacità dei rocchetti che circondano quel nucleo. Questa considerazione ci dà un mezzo comodo per determinare superficialmente la capacità di un trasformatore dal volume del nucleo. Avremo

$$\text{Capacità in chilovolt-ampère} = K \times \text{volume del nucleo in dm}^3,$$

ove K rappresenta un coefficiente dipendente dalla tensione, dalla frequenza, dall'aumento di temperatura, dal metodo di raffreddamento e dall'abilità del costruttore. Per tensioni fino 2000 volt, $\omega = 50$, e capacità fra 10 e 50 K. v. a., K varia fra 0,8 e 1,2, ove il valore minore vale per il limite inferiore di capacità e quello maggiore per il limite superiore, ed ove non venga usato un sistema artificiale di raffreddamento. Per frequenze maggiori anche il valore di K riesce maggiore.

CAPITOLO QUARTO

Potenza motrice di una corrente alternata. — Composizione di intensità di correnti e di tensioni. — Determinazione della corrente a vuoto. — Influenza delle commessure di giunzione.

Potenza motrice di una corrente alternata. — Per poter valutare la potenza motrice di un trasformatore, si deve innanzi tutto misurare l'energia che viene condotta al rocchetto primario e quella che si ricava dal rocchetto secondario. Noi dobbiamo adunque avere la possibilità di misurare la potenza sviluppata da una qualunque corrente alternata o

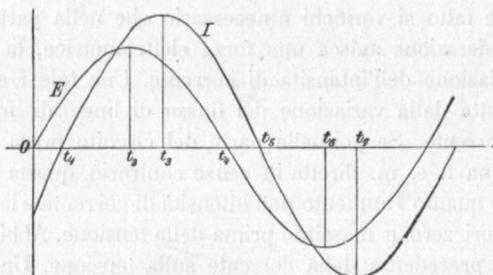


Fig. 32.

direttamente per mezzo di un apposito strumento o calcolarla indirettamente valendoci di altre speciali considerazioni. Anzitutto noi supponiamo che tanto la corrente quanto la tensione varino secondo la legge sinusoidale. Questo supposto è necessario per rendere facile e chiara la trattazione matematica di questo argomento. In verità questo accade solo di rado; ma noi vedremo più tardi che i metodi sviluppati colla sopraindicata condizione per la misura del lavoro possono anche essere applicati, se la corrente e la tensione non seguono affatto la legge sinusoidale, purchè sia uguale la loro frequenza.

La linea sinusoidale I nella figura 32 rappresenta l'intensità della corrente quale funzione del tempo e la linea E la tensione fra due punti di uno stesso circuito, ad esempio, tra i morsetti dei rocchetti primari di un trasformatore. Noi conteremo il tempo da sinistra verso destra. Al tempo O l'intensità di corrente è negativa (sotto l'asse delle ascisse) e la ten-

sione è 0. Al tempo t_1 l'intensità di corrente è 0 e la tensione ha un valore positivo. Al tempo t_2 la tensione raggiunge un valore massimo positivo. L'intensità di corrente raggiunge il suo valore positivo massimo alquanto più tardi, e più precisamente al tempo t_3 . In t_4 la tensione è discesa a 0, la intensità di corrente è ancora positiva, ma in discesa; essa diventa zero in t_5 , nel quale istante la tensione è già negativa. Siccome per il nostro supposto le due curve seguono ambidue una semplice legge sinusoidale, la distanza dei loro punti zero come pure quella fra il loro massimo deve essere uguale, il che significa, che le differenze dei tempi tra i punti corrispondenti devono essere uguali, vale a dire:

$$t_3 - t_2 = t_5 - t_4 = t_7 - t_6 \text{ ecc.}$$

Questo intervallo di tempo fra i valori corrispondenti della corrente e della tensione dicesi rispettivamente precedenza e ritardo. Nel nostro caso, dove la tensione raggiunge prima della corrente i valori zero e massimo, la corrente è in ritardo sulla tensione, o, si può anche dire, che la tensione precede la corrente.

Perchè tale fatto si verifichi è necessario che nella parte del circuito presa in considerazione agisca una forza elettromotrice, la quale si opponga alla variazione dell'intensità di corrente. Una tale f. e. m. viene ad esempio prodotta dalla variazione del flusso di linee di forze generata dalla stessa corrente. Se poi nella parte del circuito presa in considerazione agisce una f. e. m. diretta in senso contrario, questa favorirà tanto la diminuzione quanto l'aumento dell'intensità di corrente e la corrente raggiungerà i valori zero e massimo prima della tensione. Abbiamo adunque in questo caso precedenza della corrente sulla tensione. Una tale f. e. m. agente nella direzione della corrente, viene prodotta inserendo nel circuito un condensatore. Le armature del condensatore raggiungono la più intensa corrente positiva di carica nel momento in cui la tensione tra di esse è 0. Quando questa tensione ha raggiunto il suo valore massimo, non può continuare la carica, cioè la corrente di carica diventa zero. Coll'aumentare della tensione positiva si produce subito una corrente negativa o di scarica, la quale raggiunge il suo massimo quando la tensione è 0. Noi vediamo quindi che la corrente precede la tensione esistente fra le armature di un quarto di periodo. È infine possibile anche il caso in cui nella parte del circuito considerato oltre la tensione ai morsetti non agisca alcuna f. e. m., adunque che la corrente nè preceda nè ritardi. Questo caso si presenta quando il circuito possiede solo resistenze ohmiche, come ad esempio nelle lampade ad incandescenza che vengono alimentate dai morsetti secondari del trasformatore. Allora le due curve si incontrano sull'asse delle ascisse, ossia t_5 cade in t_4 , t_3 in t_2 ecc. Si può rappresentare l'andamento periodico dell'intensità e della tensione in un diagramma vettoriale.

Nella figura 33 il cerchio esterno serve ad indicare la misura dei tempi (così come il quadrante di un orologio) ed Ot sia una sfera d'orologio, che ruota nel senso della freccia con velocità angolare costante. Noi conteremo il tempo dall'istante in cui la sfera è orizzontale e precisamente quando si trova a sinistra. In quest'istante la tensione è zero.

Se ora si descrive un cerchio, il cui raggio rappresenti il valore massimo della tensione in una determinata scala, allora la proiezione della parte della sfera d'orologio (vettore della tensione) compresa nell'interno del cerchio ci dà il valore della tensione nella medesima scala. Adunque al tempo t la tensione è uguale ad OE_t , e noi considereremo la tensione come positiva se E_t si trova sopra, negativa se sotto al punto O .

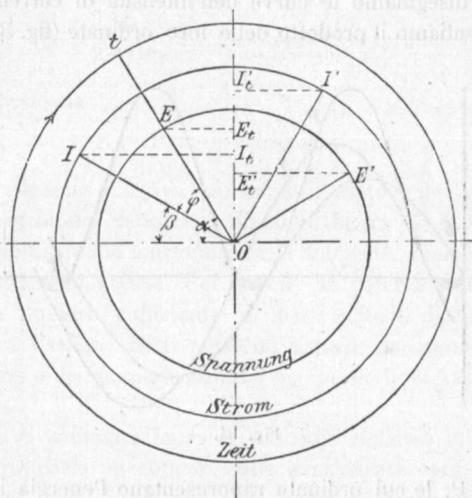


Fig. 33.

Spannung = tensione *Strom* = corrente *Zeit* = tempo

Nello stesso modo può essere rappresentata l'intensità di corrente; solamente si deve pensare portato indietro dell'angolo costante di ritardo $EOI = \varphi$ il corrispondente vettore OI della corrente. I due vettori ruotano nello stesso senso con uguale velocità e mantengono costante continuamente il loro rispettivo angolo di posizione φ . Supponiamo che il vettore OE dopo il tempo t faccia un angolo α coll'orizzontale, allora il vettore OI nello stesso istante farà coll'orizzontale l'angolo $\beta = \alpha - \varphi$. I valori istantanei della tensione e dell'intensità di corrente saranno quindi rispettivamente $E \sin \alpha$ ed $I \sin (\alpha - \varphi)$. Il valore istantaneo della potenza motrice è il prodotto di questi due valori

$$P = E I \sin \alpha \sin (\alpha - \varphi).$$

Supponiamo che i vettori facciano in un secondo ω giri, sicchè $\frac{1}{\omega} = T$ indichi la durata di un intero periodo e chiamiamo ω la velocità angolare; si avrà

$$\omega T = 2\pi$$

$$a = \omega t$$

$$da = \omega dt$$

$$da = 2\pi \omega dt.$$

Siccome il lavoro è il prodotto della potenza per il tempo, nell'istante dt avremo prodotto il lavoro

$$dA = P dt.$$

Se noi ora disegniamo le curve dell'intensità di corrente e della tensione e rappresentiamo il prodotto delle loro ordinate (fig. 34), ricaveremo

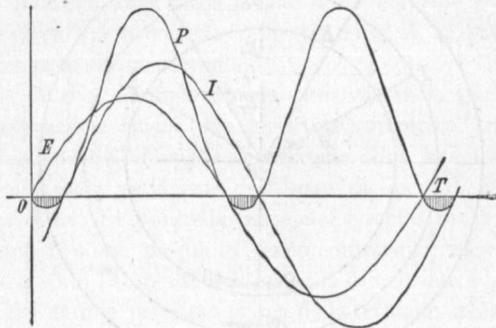


Fig. 34.

una terza curva P, le cui ordinate rappresentano l'energia istantanea e la cui superficie rappresenta il lavoro. Finchè questa curva giace sopra l'asse delle ascisse essa rappresenta valori positivi, ossia lavoro portato al circuito; le parti della curva poste sotto il detto asse rappresentano valori negativi, ossia lavoro che viene ricavato dal circuito. Se noi vogliamo determinare il lavoro fatto in un periodo intero, allora la misura della superficie deve essere estesa tra le ordinate $t = 0$ e $t = T$, dove le superfici poste sotto l'orizzontale sono da considerarsi come negative.

Il lavoro durante un intero periodo è adunque

$$A = \int_0^T P dt.$$

L'energia istantanea oscilla, come si vede dalla curva, tra un valore piccolo negativo ed uno grande positivo. Noi ora possiamo sostituire a questa potenza motrice variabile una costante (come se fosse prodotta da

una corrente continua), la quale nel tempo T produca lo stesso lavoro della corrente alternata; allora sarà evidentemente questa potenza media od effettiva data dal quoziente del lavoro di una corrente alternata durante un periodo e la durata di esso periodo

$$P = \frac{A}{T}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P dt.$$

Sostituendo in questa i valori sopraindicati, l'espressione può mettersi anche sotto la forma:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E I \sin \alpha \sin(\alpha - \varphi) d\alpha,$$

la cui integrazione da

$$P = \frac{1}{2} E I \cos \varphi.$$

Allo stesso risultato si arriva applicando il metodo geometrico *Blakesley* coll'uso del diagramma vettoriale. Siano in figura 33 E ed I le posizioni istantanee dei vettori della tensione e della intensità, ossia $E \sin \alpha$. $I \sin \beta$ la potenza motrice istantanea. Per trovare la potenza media dividiamo il cerchio in un numero sufficiente di parti uguali, disegniamo i vettori della corrente e tensione corrispondenti a quelle posizioni, determiniamo le loro proiezioni e dividiamo la somma dei prodotti di tali proiezioni per il loro numero.

Ora invece di sommare le varie posizioni secondo il loro ordine, noi possiamo raggrupparle in coppie, ossia considerare ogni coppia di posizioni distanti tra loro di 90° come un unico addendo della serie.

Naturalmente ogni posizione viene allora contata due volte e per aver il giusto valore dobbiamo dividere la somma totale per il doppio del numero di parti in cui è stato diviso il cerchio. Sia m questo numero, allora la potenza media sarà

$$P = \frac{1}{m} \sum (E I \sin \alpha \sin \beta),$$

dove il numero degli addendi è m . Se noi invece di posizioni semplici numeriamo le coniugate, si ha dalla figura 33

$$P = \frac{1}{2m} \sum (E I \sin \alpha \sin \beta + E I \cos \alpha \cos \beta),$$

dove pure il numero degli addendi è m .

L'espressione sotto il segno sommatorio ha però il valore

$$E I \cos(\alpha - \beta) = E I \cos \varphi$$

ed è indipendente dalle diverse posizioni ossia dai valori dell'angolo α e β . La somma dà adunque semplicemente $mEI \cos \varphi$, e questo valore sostituito nell'uguaglianza superiore dà

$$P = \frac{m}{2m} EI \cos \varphi$$

$$P = \frac{1}{2} EI \cos \varphi.$$

Dove E ed I sono i valori massimi della tensione e della intensità di corrente.

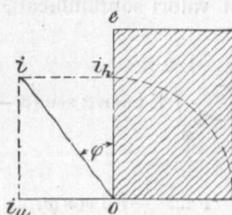


Fig. 35.

Se indichiamo con e ed i i valori effettivi, hanno luogo, come fu prima indicato, le relazioni $e = \frac{E}{\sqrt{2}}$, $i = \frac{I}{\sqrt{2}}$ e noi possiamo esprimere la potenza media come segue

$$P = e i \cos \varphi. \quad \dots \dots \dots (12)$$

In questa espressione φ è l'angolo di spostamento tra intensità e tensione. La potenza per una data intensità e tensione avrà un massimo, se il detto angolo è 0, se quindi la tensione coincide nella fase colla intensità. La potenza diventa zero se lo spostamento è di 90° .

Siccome la proiezione del vettore dell'intensità su quello della tensione è $i \cos \varphi$, noi possiamo rappresentare graficamente la potenza colla superficie di un rettangolo del quale un lato è la tensione effettiva e l'altro la proiezione del vettore effettivo dell'intensità su quello della tensione. Oppure proiettiamo il vettore della tensione su quello dell'intensità e costruiamo il rettangolo con questa proiezione e colla lunghezza del vettore dell'intensità. La superficie darà la potenza. Naturalmente bisogna prendere in considerazione per la determinazione della superficie la stessa scala, nella quale furono disegnati i vettori. Se ad esempio in ambidue 1 mm. rappresenta 1 ampère e rispettivamente 1 volt, allora ogni mm.^2 della superficie indica 1 watt. Se l'intensità viene rappresentata nella scala di 1 mm. per ampère e la tensione in quella di 1 mm. per 100 volt, allora ogni mm.^2 della superficie rappresenta la potenza di 100 watt. Nella figura 35 sia Oi l'intensità effettiva e Oe la tensione effettiva, la

quale precede la prima dell'angolo φ , allora la potenza sarà rappresentata dal rettangolo segnato con tratteggio. Questo ha l'uguale valore di una corrente i_h , la cui tensione è e , ma che non ha alcun spostamento di fase. Noi possiamo quindi immaginare la corrente reale Oi costituita da due componenti ad angolo retto; l'una Oi_h ha la stessa fase della tensione, e l'altra Oi_p ritarda rispetto la tensione di 90° . La componente i_h indica la parte di corrente che realmente fa un lavoro, mentre l'altra non sviluppa alcun lavoro. La seconda rappresenta il cosiddetto lavoro effettivo della corrente, mentre la prima rappresenta il lavoro apparente della stessa.

Composizione di intensità di correnti e di tensioni. — Noi abbiamo ora usato il noto parallelogrammo delle forze per la somma vettoriale di intensità di correnti; viene quindi naturale la domanda se questo procedimento possa applicarsi non solo nel caso ora considerato, ma anche in

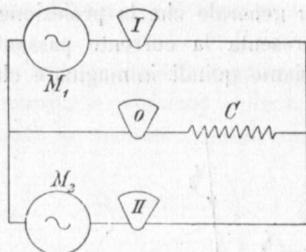


Fig. 36.

generale. Noi premettiamo naturalmente che abbiamo da fare con due correnti di forma sinusoidale e di uguale periodo, ma di fase e di intensità diversa. Supponiamo che queste due correnti siano generate da due macchine a corrente alternata $M_1 M_2$ (figura 36). Per la misura di ciascuna corrente servono gli amperometri I e II, mentre la corrente risultante viene segnata dall'amperometro O. Le due macchine siano accoppiate meccanicamente, sicchè le loro correnti abbiano ugual numero di periodi. Si tratta ora solo di determinare la corrente che scorre attraverso al conduttore C, che è segnata dallo strumento O, quando sieno date l'intensità di corrente ed i rispettivi spostamenti di fase di ciascuna corrente. Nel diagramma vettoriale (figura 37) siano I' e I'' i valori massimi delle correnti. Nel momento che corrisponde alla posizione dei vettori, rappresentata in figura, sieno Oi'' ed Oi' le correnti mandate nel conduttore C rispettivamente dalle macchine M_2 e M_1 . La corrente totale attraversante questo conduttore è la somma di queste due, ossia $Oi'' + Oi'$.

Costruiamo il parallelogrammo $O'I'I''$, allora riesce tosto manifesto che la distanza verticale tra i punti I ed I' è uguale all'altezza del punto I'' sopra l'orizzontale. La lunghezza del tratto Oi è dunque uguale alla somma di Oi'' e Oi' , vale a dire che la Oi è la corrente attraversante in questo momento il conduttore C . Questa lunghezza Oi è però la proiezione della

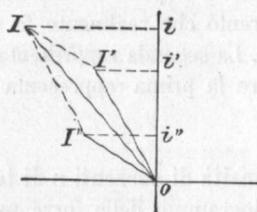


Fig. 37.

risultante OI , e siccome questa relazione vale per ogni posizione dei vettori, noi troviamo in generale che la proiezione della risultante delle correnti massime rappresenta la corrente passante in ogni istante nel conduttore C . Noi possiamo quindi immaginare che il conduttore C sia

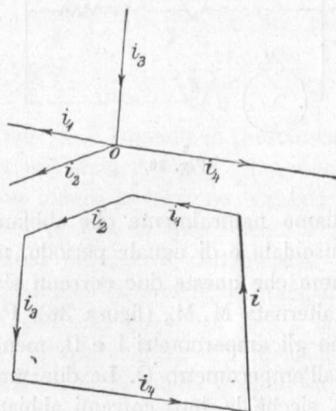


Fig. 38.

attraversato da una sola corrente, il cui valore massimo sia la risultante delle due correnti e la cui fase sia intermedia a quelle delle due correnti. Noi possiamo ora supporre rimpicciolite tutte le lunghezze del diagramma vettoriale nel rapporto di $1 : \sqrt{2}$. Per questo fatto non vengono cambiati nè gli angoli, nè i rapporti rispettivi delle grandezze; abbiamo però il valore effettivo della corrente risultante. È anche chiaro

che le stesse considerazioni possono essere estese a più di due correnti, rappresentando prima la risultante di due di esse, componendo questa colla terza corrente e così via. Non è poi necessario disegnare completamente i parallelogrammi, ma si possono sommare le correnti secondo il

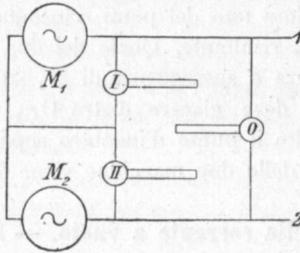


Fig. 39.

poligono funicolare. La linea di chiusura di detto poligono dà la risultante di tutte le correnti. Bisogna però tener presente sempre la direzione di ciascuna corrente.

Diamo ad esempio nella figura 38, rappresentate con i_1 a i_4 , le correnti in direzione, intensità e posizione, allora la somma, a mezzo del ponigono funicolare darà la risultante i in direzione, intensità e posizione.

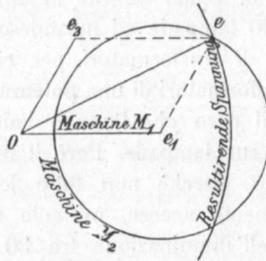


Fig. 40.

Resultirende-Spannung = tensione risultante
Maschine = macchina

Nello stesso modo possono essere sommate le forze elettromotrici. Immaginiamo due macchine a corrente alternata M_1 M_2 disposte in serie (figura 39) e le cui tensioni ai morsetti siano misurate dai voltmetri I e II. Se ora inseriamo tra i conduttori esterni 1 e 2 un voltmetro O, questo non segnerà la somma aritmetica delle letture I e II, ma la risultante, la cui grandezza assoluta non dipende solo dalle tensioni generate dalle due macchine, ma anche dallo spostamento di fase delle due tensioni. Quindi quanto sopra fu detto sulla composizione delle correnti può

essere esteso alla composizione delle tensioni. Ed è senz'altro chiaro che dalle letture dei tre voltometri possiamo stabilire lo spostamento di fase. Sia Oe_1 (figura 40) la tensione letta nell'istrumento I e descriviamo, facendo centro in e_1 , un cerchio, il cui raggio sia uguale alla tensione letta in II, di più un altro cerchio con centro in O e raggio uguale alla tensione risultante; allora uno dei punti d'incontro dei due cerchi deve essere l'estremità della risultante. Quale dei due punti sia da scegliersi dipende dalla precedenza o susseguenza di M_1 su M_2 . Se precede M_1 , allora il vettore di M_2 deve giacere dietro Oe_1 (ossia alla parte superiore) e va quindi scelto il punto d'incontro superiore. Lo spostamento di fase tra le tensioni delle due macchine viene dato dall'angolo $e_1 Oe_2$.

Determinazione della corrente a vuoto. — Più sopra vennero indicati i principi, sui quali si fonda la determinazione della potenza motrice di una corrente alternata. Verranno più tardi dati metodi pratici sulla sua misura esatta, come pure l'estensione di questi metodi a casi di corrente di forma non sinusoidale, ma irregolare. Quanto fu premesso ci basta per la determinazione della corrente a vuoto nei trasformatori e noi vogliamo prima di tutto trattare questo argomento, perchè esso è di molta importanza nella costruzione dei trasformatori, dovendosi badare anche la loro corrente a vuoto sia la più piccola possibile. Per chiarire questo, vogliamo dare un esempio. Siano inserite in una stazione generatrice a corrente alternata 100.000 lampade ad incandescenza di 50 watt ognuna e precisamente a mezzo di trasformatori per ciascun utente. Saranno adunque necessari dei trasformatori di una potenza totale di 5000 kilowatt, poichè può anche darsi il caso che l'uno o l'altro utente utilizzi nello stesso momento tutte le sue lampade. Però il macchinario non va calcolato per 5000 kilowatt, perchè non tutte le lampade del circuito vengono contemporaneamente accese, ma solo una parte, che varia a seconda del carattere dell'illuminazione tra 30 e 70 %. Scegliamo il 60 %, come valore medio approssimativo, ed allora otterremo quale potenza massima della centrale ai morsetti delle lampade 3000 kilowatt. Il carico di giorno è naturalmente minore e varia dal 3 % al 4 %. Scegliamo il 3,5 % quale valore medio, sicchè la potenza alle lampade durante il giorno sarebbe di 100 kilowatt. A quest'ultima bisogna ancora aggiungere la perdita nel ferro dei trasformatori, che può essere del 2 %. Sarebbe quindi necessario per il servizio diurno una macchina a corrente alternata di circa 200 kilowatt. In verità viene consumata una corrente maggiore di quella che corrisponde a detta potenza e la differenza è tanto più grande, quanto maggiore è la corrente a vuoto dei trasformatori. Per 10 % di corrente a vuoto solo la corrente necessaria alla magnetizzazione corrisponderebbe ad una potenza di 500 kilowatt; per

5 % una di 250 kilowatt. Per non porre in movimento durante il giorno una macchina così grande e perchè non vada perduta inutilmente in calore tanta corrente nei conduttori, è necessario rendere la corrente a vuoto dei trasformatori molto piccola.

La corrente a vuoto è quella che è necessaria per magnetizzare il nucleo in ferro fino al valore di B corrispondente alla tensione, e per compensare la perdita nel ferro. Possiamo calcolare questa corrente di magnetizzazione secondo la nota legge degli elettromagneti, se sono note le dimensioni del nucleo di ferro, la qualità del ferro ed il numero delle spire del rocchetto primario.

Sia l in figura 41 la lunghezza media del percorso delle linee di forza e μ la permeabilità del ferro, sicchè per n spire la forza magnetizzante

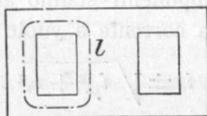


Fig. 41.

generata dalla corrente I_μ è $4 \pi n I_\mu : l$, se I_μ è dato in misure assolute. Se poniamo I_μ in ampère, allora la forza magnetizzante è $0,4 \pi n I_\mu : l$. L'induzione generata:

$$B = \mu \frac{0,4 \pi n I_\mu}{l}.$$

Quivi I_μ è naturalmente il valore massimo della corrente alternata. Ponendo il suo valore effettivo i_μ , (poichè $I_\mu = i_\mu \sqrt{2}$) sarà:

$$B = \mu \frac{0,4 \pi \sqrt{2} n i_\mu}{l}$$

$$B = \mu \frac{1,78 n i_\mu}{l},$$

da cui

$$i_\mu = \frac{Bl}{\mu n 1,78}.$$

Le variazioni del flusso magnetico generano nelle spire del rocchetto una f. e. m., la cui fase è spostata rispetto a quella della corrente di magnetizzazione di 90° precisi, come appare dalla seguente considerazione. Se la corrente raggiunge il suo massimo, B è anche un massimo, e quindi la f. e. m. è zero. Se la corrente scende a zero, la f. e. m. raggiunge il suo valore massimo.

Al massimo della corrente corrisponde adunque la f. e. m. zero ed al massimo della f. e. m. la intensità di corrente zero. Questa relazione non potrebbe sussistere se l'angolo φ in fig. 33 non fosse di 90° ; allora è $e i \cos \varphi = 0$.

La corrente propria di magnetizzazione non consuma quindi energia alcuna; il suo vettore è in figura 35 perpendicolare a quello della f. e. m. ed è in figura segnata con i_μ .

Però viene consumata energia in conseguenza della perdita nel ferro, e la corrente corrispondente deve coincidere per fase con quella della f. e. m. Essa è la i_h della figura 35.

Adunque la corrente totale a vuoto è la risultante di due componenti:

La corrente oziosa di magnetizzazione i_μ .

La corrente i_h dovuta alla perdita nel ferro.

Siccome queste due componenti stanno ad angolo retto fra di loro, come fu detto più sopra, la corrente a vuoto i_o è data dall'uguaglianza:

$$i_o = \sqrt{i_\mu^2 + i_h^2}$$

Per ricavare l'espressione della corrente magnetizzante-abbiamo supposto che la forza magnetizzante servisse da sola ed unicamente a trasportare il flusso magnetico attraverso al ferro, con altre parole abbiamo supposto che il percorso delle linee di forza non sia interrotto dall'aria o da altri materiali, adunque che la carcassa di ferro del trasformatore non abbia alcuna commessura trasversale. Ma fu già osservato che in varii tipi la carcassa non è costituita da un solo pezzo senza discontinuità con lamiere a labbra sovrapposte, ma per facilitare il montaggio è costituita da parecchie parti con superfici piane di giunzione. In queste superfici di giunzione il contatto, per le ragioni dette al capitolo III, può non essere perfetto e quindi il flusso di linee di forza incontra una certa resistenza.

Se δ è lo spessore totale di questi diversi strati (adunque $\frac{\delta}{2}$ o $\frac{\delta}{4}$ lo spessore di ciascuna commessura a seconda che queste sono in numero di 2 o 4) e B indica l'induzione esistente in queste superfici, allora, siccome per l'aria e la sostanza isolante $\mu = 1$, la forza magnetizzante necessaria a vincere la resistenza magnetica dell'aria è:

$$0,4 \pi n I : \delta$$

e le ampère-spire effettive impiegate sono:

$$n i = \frac{B \delta}{1,78}$$

La corrente di magnetizzazione è adunque data dalla formola:

$$i_\mu = \frac{B}{1,78 n} \left(\frac{l}{\mu} + \delta \right),$$

dove l e δ sono da porsi in centimetri, e si suppone che la superficie di giunzione sia uguale alla sezione del nucleo. Se il trasformatore invece ha un nucleo continuo (cioè senza commesure), allora $\delta = 0$ e la formola diventa:

$$i_{\mu} = \frac{Bl}{1,78 n \mu},$$

come si è detto più sopra.

Se dapprima consideriamo i trasformatori che non hanno commesure, dove quindi δ è zero, possiamo usare tale formola per calcolare μ in funzione di B e precisamente da esperienze sopra trasformatori già costrutti. Si fa lavorare il trasformatore col circuito secondario aperto e si determina l'intensità di corrente a vuoto e la perdita totale in watt, mentre nello stesso tempo si osservano la tensione primaria e la frequenza. Con queste osservazioni si determina coll'aiuto dei dati costruttivi supposti noti, l'induzione B e quella componente della corrente, che corrisponde alla perdita. Se P_v è la perdita d'energia a vuoto, che noi determiniamo a mezzo di un wattometro ed e è la tensione, sarà:

$$i_h = P_v : e.$$

Nei buoni ed anche mediocri trasformatori l'intensità di corrente a vuoto è così piccola, che il calore generato da essa nelle spire dei rochetti può venir trascurata. La perdita P_v è adunque causata esclusivamente dall'isteresi e dalle correnti parassite. Sia i_o la corrente misurata a vuoto, la corrente di magnetizzazione si determina dalla:

$$i_{\mu} = \sqrt{i_o^2 - i_h^2}$$

e si trova quindi

$$\mu = \frac{Bl}{1,78 n i_{\mu}}.$$

Ripetendo l'esperienza per varii valori della tensione primaria, si può in questo modo trovare una serie di valori corrispondenti di μ e B , e questi poi usarli per la determinazione della corrente a vuoto nei trasformatori da costruirsi.

La seguente tabella contiene una serie di valori corrispondenti di μ e B , che furono trovati nel modo detto più sopra. Il ferro adoperato in tali esperienze era diverso, in rapporto però alla perdita nel ferro stava entro limiti ammissibili. Dalle esperienze fatte risultò poi che la permeabilità non segna alcuna misura per la bontà del ferro e che la differenza di permeabilità per diverse qualità di ferro non è notevole. La seguente tabella dà valori medi:

B = 2000	3000	4000	5000	6000	7000
$\mu = 1300$	1720	2070	2330	2570	2780

Influenza delle commessure di giunzione. — Occorre ancora ricercare quale influenza abbiano le commessure di giunzione sulla corrente a vuoto. Sulla componente attiva naturalmente non ne ha alcuna, poichè questa dipende solo dalla perdita e non dalla resistenza magnetica. La componente oziosa viene molto influenzata dall'azione magnetica delle commessure. Ciò riesce evidente applicando la formola:

$$i_{\mu} = \frac{B}{1,78_n} \left(\frac{l}{\mu} + \delta \right)$$

ad alcuni esempi pratici. Nei trasformatori a nucleo del tipo in figure 15 e 16, per formare la carcassa in ferro in pezzi separati risultano quattro commessure. Lo spazio compreso fra gli orli delle lamiere in ogni commessura in un'ottima lavorazione non può essere minore di 0,25 fino a 0,3 mm. Si ha quindi per mm. 0,3 $\delta = 0,12$. La permeabilità è dell'ordine di grandezza di 2000. La lunghezza l del percorso magnetico dipende dalla grandezza del trasformatore. Nei piccoli trasformatori da 1 fino a 10 kilowatt oscilla fra i limiti di 70 a 160 cm. e per grandi trasformatori di circa 100 kilowatt essa è circa 300 cm. Prendiamo quale valore medio per i piccoli trasformatori 100 e per i grandi 250, si trova allora che il valore della frazione è fra i limiti di 0,05 e 0,15. L'espressione tra parentesi ha quindi il valore di 0,05 a 0,17 per i piccoli, di 0,15 a 0,27 per i grandi trasformatori. È questo un aumento di 240, vale a dire dell'80 %. L'azione di questo aumento può essere chiarita con un esempio pratico.

Sia in un trasformatore piccolo senza commessure la corrente di magnetizzazione $i_{\mu} = 4 \%$ e la corrente corrispondente alla perdita nel ferro sia $i_h = 3 \%$ della corrente totale. Allora la corrente a vuoto sarà:

$$i_o = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \%$$

della corrente totale. Continuiamo ora lo stesso trasformatore, ma con quattro commessure di giunzione. Allora i_h non cambia; i_{μ} è ora diventato 13,6 % e la corrente a vuoto $\sqrt{2^2 + 13,6^2} = 14 \%$. In un grande trasformatore senza commessure sia $i_h = 1,5 \%$ e $i_{\mu} = 2 \%$. Allora sarà $i_o = \sqrt{1,5^2 + 2^2} = 2,5 \%$. Se ora viene costruito lo stesso trasformatore con commessure, sarà $i_{\mu} = 3,6 \%$ ed

$$i_o = \sqrt{3,6^2 + 1,5^2} = 3,9 \%$$

Coll'uso delle commessure di giunzione è adunque cresciuta la corrente a vuoto nei piccoli trasformatori di circa tre volte e per i grandi di più di una volta e mezza.

Nei trasformatori a mantello i detti rapporti sono ancora più sfavorevoli, perchè la lunghezza del percorso magnetico l qui è solo circa un

terzo del corrispondente valore nei trasformatori a nucleo, e l'azione dannosa delle commessure è quindi maggiore. Non si costruiscono però più trasformatori a mantello con commessure di giunzione, ma le lamiere si pongono ad una ad una nei rocchetti secondo le disposizioni già indicate. Nei grandi trasformatori a nucleo le commessure sono ancora permesse specialmente se il trasformatore si trova la maggior parte del tempo sotto carico, perchè in questo caso la più grande o più piccola corrente di magnetizzazione è trascurabile di fronte alla corrente utilizzata. Per piccoli trasformatori, che vengono inseriti sulla rete di distribuzione di una città, occorre evitare ad ogni costo le dette commessure.



CAPITOLO QUINTO

Costruzione di un trasformatore. — Ripartizione più conveniente del peso del rame. — Costo del materiale attivo. — Ripartizione più conveniente della perdita. — Economia d'esercizio. — Dettagli di costruzione.

Costruzione di un trasformatore. — Per indicare ora l'uso pratico delle formole e regole date fino ad ora cercheremo di costruire un trasformatore. Scegliamo il tipo a nucleo e sia lo spessore del nucleo 125 mm. Le dimensioni dello spazio occupato dall'avvolgimento sono $a = 160$, $b = 450$ mm. Il trasformatore debba essere costruito per $\omega = 50$, e scegliamo per l'induzione il valore $B = 5000$. Le lamiere vengono mantenute unite fra di loro agli angoli a mezzo di bulloni isolati ed i rocchetti vengono avvolti sopra cilindri di cartone, muniti di opportune flange, e vengono infilati ad uno ad uno sul nucleo. Elettricamente è indifferente che alla parte esterna siano posti i rocchetti primari o quelli secondari; meccanicamente però quella scelta di posizione non è indifferente. Avviene spesso che dopo terminato il trasformatore si deve correggere alquanto il rapporto di trasformazione. Questo lo si fa molto comodamente aggiungendo o togliendo alcune spire del filo sottile, e per fare questo senza smontare il trasformatore stesso, è conveniente porre i rocchetti a bassa tensione internamente, quelli ad alta tensione esternamente.

Per risparmio di filo si smussino gli angoli del nucleo di 20 mm., ciò che si ottiene disponendo a gradini le lamiere poste alla parte esterna. Il nucleo viene poi mantenuto unito avvolgendogli attorno un forte nastro di cotone o di canapa. Lo spessore di questo avvolgimento sia di circa mm. 2. Se agli angoli si lascia uno spazio libero di 2 mm. per meglio infilare i rocchetti si ha dal disegno (fig. 42) che il diametro interno del cilindro di cartone interno è di 160 mm. Il suo spessore può essere di 5 mm., sicchè il diametro interno dei rocchetti secondari è di 170 mm. Lo spessore dell'avvolgimento e così pure la lunghezza media delle spire possono per ora essere solo date approssimativamente. I limiti di queste dimensioni sono i seguenti: Dalle dimensioni della carcassa si vede che la distanza tra i punti di mezzo dei rocchetti sulle due braccia è di $125 + 160 = 285$ mm. Quindi il diametro esterno dei rocchetti primari potrebbe essere al massimo 285 mm.; ma siccome i due rocchetti verrebbero a toccarsi, noi dobbiamo scegliere un diametro minore. Occorre lasciare spazio libero fra i due rocchetti, sia per piccole possibili irrego-

larità di costruzione, sia per lasciare libero passaggio all'aria od all'olio. Scegliamo uno spazio libero di 20 mm. allora il diametro esterno dei rocchetti primari sarebbe 265 mm. Fra le superfici interne del rocchetto secondario e quelle esterne del rocchetto primario si avrà quindi una distanza di $\frac{1}{2} (265 - 170) = 47,5$ mm. Questo spazio è occupato dallo spessore dell'avvolgimento secondario, dallo spazio tra quest'ultimo e la parte interna del cilindro di cartone primario, dallo spessore del cilindro e dallo spessore dell'avvolgimento primario. Per lo spazio libero poniamo 4 mm. e per lo spessore del cilindro di cartone dell'avvolgimento primario poniamo 5 mm. Restano adunque $47,5 - 9 = 38,5$ o in cifra tonda 38 mm. per lo spessore dell'avvolgimento di ambedue i rocchetti. Occorre però osservare che lo spessore dell'avvolgimento primario deve essere più

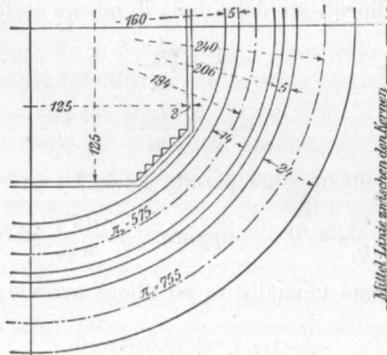


Fig. 42.

Mittel-Linie zwischen den Kernen = linea mediana tra i due rocchetti.

della metà perchè l'utilizzazione dello spazio a cagione del filo sottile non è tanto buona ed inoltre questo rocchetto ha il diametro più grande, la cui azione sulla resistenza ohmica deve essere compensata da una più grande sezione di filo. Come primo tentativo per la ripartizione dello spazio si può scegliere 60 % dello spazio totale per il rocchetto primario ed il 40 % per il rocchetto secondario.

Ripartizione più conveniente del rame tra i due rocchetti. — Lo spazio occupato dall'avvolgimento è limitato dalla forma della carcassa. Perciò per un dato trasformatore è da considerarsi costante il peso totale del rame nel circuito primario e secondario. La ripartizione di questo peso totale in ambedue i circuiti non è però dato in precedenza. Quanto più rame noi poniamo in uno dei circuiti, tanto meno spazio rimane per l'altro. Se noi adunque possiamo arricchire il primo circuito a sole spese dell'altro, è chiaro che vi deve essere una ripartizione del rame tra i due

circuiti, in cui la somma delle perdite ohmiche è un minimo; e questa quindi è la ripartizione giusta.

Il problema si può presentare nella sua forma generale nel seguente modo. È dato un volume totale v , le lunghezze di filo l_1 e l_2 nei due circuiti e le intensità di corrente i_1 e i_2 in essi. Si cercano le sezioni dei fili q_1 e q_2 rispettivamente la migliore ripartizione di v in due parti:

$$\begin{aligned}v_1 &= q_1 l_1 \\v_2 &= q_2 l_2\end{aligned}$$

in modo che la perdita totale:

$$P_v = w_1 i_1^2 + w_2 i_2^2$$

sia un minimo; dove w_1 e w_2 indicano le resistenze dei due circuiti. Se k è un coefficiente dipendente dalle unità di misura scelte, allora abbiamo:

$$\begin{aligned}w_1 &= k \frac{l_1}{q_1} \\w_2 &= k \frac{l_2}{q_2}\end{aligned}$$

La condizione della minima perdita totale P_v è:

$$\frac{d P_v}{d q_1} = 0 \quad \text{oppure} \quad \frac{d P_v}{d q_2} = 0.$$

Scegliamo la prima uguaglianza ed allora avremo:

$$\frac{d}{d q_1} (w_1 i_1^2 + w_2 i_2^2) = 0.$$

Siccome

$$q_2 = \frac{v - l_1 q_1}{l_2},$$

l'espressione

$$\frac{d}{d q_1} \left(\frac{l_1}{q_1} i_1^2 + \frac{l_2^2}{(v - q_1 l_1)^2} i_2^2 \right) = 0$$

dà il valore di q_1 , per cui la perdita totale riesce un minimo.

Ne consegue che:

$$\frac{i_1}{q_1} = \frac{i_2}{q_2}.$$

Se sono date le lunghezze del filo per ambidue i circuiti, allora la perdita totale prende il valore minimo, se sono uguali le densità di corrente. Per avvolgimento a dischi si farà uguale lo spessore radiale dei dischi primari e secondari in considerazione dell'utilizzazione completa dello spazio occupato dall'avvolgimento. I numeri delle spire n_1 n_2 si comportano come le tensioni e queste quasi come i valori reciproci delle

intensità di corrente. Facendo astrazione delle perdite (pure molto piccole) abbiamo per l'uguaglianza di potenza motrice nei due circuiti:

$$\begin{aligned} l_1 i_1 &= l_2 i_2 \\ k \frac{l_1}{q_1} i_1^2 &= k l_1 i_1 \frac{i_1}{q_1} \\ k \frac{l_1}{q_1} i_1^2 &= k l_2 i_2 \frac{i_1}{q_1} \\ k \frac{l_1}{q_1} i_1^2 &= k \frac{l_2}{q_2} i_2^2. \end{aligned}$$

Nel caso dell'avvolgimento a dischi la condizione di uguale densità di corrente indica anche uguaglianza di perdita nei due circuiti.

Nella trattazione superiore abbiamo supposto che le due lunghezze di filo siano date *a priori*. Questa premessa è lecita per avvolgimento a dischi, ma non per quello a cilindri. Quivi i rocchetti sono disposti uno dentro l'altro ed esiste quindi tra le lunghezze l_1 e l_2 una relazione, che dipende dalla ripartizione del peso del rame. Non è quindi ammissibile porre la condizione della perdita totale minima con la premessa che il rapporto l_1/l_2 sia dato in precedenza, ossia sia costante. Ma si può anche in questo caso determinare col calcolo la miglior ripartizione del rame, ed allora condizione per una minima totale perdita non è più l'uguale densità di corrente, ma l'uguale perdita.

Infatti chiamiamo b lo spessore disponibile per l'avvolgimento ed a lo spessore del secondario; allora lo spessore del primario sarà $b - a$. Il diametro interno del rocchetto secondario sia D . Allora la sua resistenza ohmica è proporzionale al numero di spire n_2 e la lunghezza media delle spire è $\pi(D + a)$. Essa è inversamente proporzionale alla sezione del filo, quindi per una data lunghezza del rocchetto la resistenza ohmica è inversamente proporzionale allo spessore dell'avvolgimento. Raggruppando tutte le grandezze costanti in un unico coefficiente k possiamo scrivere:

$$P_{v_2} = k n_2 \frac{D + a}{a} i_2^2,$$

dove P_{v_2} indica la perdita d'energia per calore nel rocchetto secondario.

Per il rocchetto primario si ha un'espressione analoga; solamente si deve moltiplicare il coefficiente k per il rapporto del numero di spire, affinchè la stessa espressione valga anche pel filo sottile. Si ha:

$$P_{v_1} = k n_1 \frac{D + a + b}{b - a} \cdot \frac{n_1}{n_2} i_1^2.$$

Siccome ora $n_1^2 i_1^2 = n_2^2 i_2^2$ si può anche scrivere:

$$P_{v_1} = k n_2 \frac{D + a + b}{b - a} i_2^2$$

e la perdita totale per calore è:

$$P_v = k n_2 i_2^2 \left(\frac{D+a}{a} + \frac{D+a+b}{b-a} \right).$$

Affinchè questa perdita diventi minima, si deve scegliere a in modo che l'espressione tra parentesi risulti un minimo. Se noi formiamo il primo quoziente differenziale e lo poniamo uguale a 0, avremo:

$$a^2 + aD - \frac{bD}{2} = 0,$$

da cui

$$a = -\frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} + \frac{bD}{2}}.$$

Se si uguagliano tra loro le due frazioni sotto il segno di parentesi si ottiene ancora l'espressione:

$$a^2 + aD - \frac{bD}{2} = 0$$

che dà la condizione per la minima perdita in calore.

È con ciò dimostrato che la migliore costruzione è quella nella quale le perdite per calore sono uguali nei due rocchetti. Se adunque la nostra prima premessa riguardo allo spessore dell'avvolgimento non dà questa uguaglianza, allora deve essere cambiata la ripartizione dello spazio destinata all'avvolgimento posto tra i due rocchetti. Di più si deve osservare che nei rocchetti cilindrici con piccolo spessore in senso radiale, come si ha nei trasformatori, la condizione dell'uguale perdita coincide quasi con quella dell'uguale densità di corrente, sicchè quest'ultima, perchè più semplice per il calcolo, si può adottare non solo per avvolgimento a dischi, ma anche per quello a cilindri.

Noi calcoliamo quindi anzitutto in base all'induzione ammessa $B = 5000$ e la frequenza $\omega = 50$ il numero delle spire e progettiamo l'avvolgimento. Troveremo che nel rocchetto primario ha luogo troppa perdita in calore, e nel secondario troppo poca. Per uguagliare le due quantità dobbiamo diminuire lo spessore dell'avvolgimento nel rocchetto secondario ed aumentare corrispondentemente quello del rocchetto primario. Non è qui il caso di svolgere tutto il calcolo, il risultato è il seguente:

Spessore d'avvolgimento più conveniente del rocchetto secondario 14 $\frac{m}{m}$
 » » » » » » primario 24 $\frac{m}{m}$

Si può quindi senz'altro disegnare i rocchetti e dal disegno si può ricavare esattamente la lunghezza media delle spire. Si ha:

$$\pi_2 = 0,575 \text{ m.} \quad \text{e} \quad \pi_1 = 0,775 \text{ m.}$$

Calcoliamo ora dapprima la perdita nel ferro facendo uso della curva in figura 9. Per una induzione di 5000, secondo tale curva, la perdita per isteresi è di 1,55, e per le correnti parassite 1,16 watt per kilogramma, per 100 periodi al secondo. Siccome il nostro trasformatore deve lavorare solo con 50 periodi, la perdita per isteresi è solo la metà e quella dovuta alle correnti parassite solo un quarto del valore corrispondente a $\omega = 100$. In ogni kilogramma del nucleo si avrà adunque 1,07 watt di perdita. La sezione del nucleo è, considerando la smussatura, 130 cm²; nei due gioghi, dove gli angoli non sono smussati, è di 136 cm². Le induzioni sono quindi nel nucleo e nel giogo rispettivamente 5000 e 4770. Si ricavano i pesi dal disegno e si ha:

2 nuclei	116,8 Kg., $B = 5000$	per 1,07 w.	Isteresi	125 w.
2 gioghi	61,2 » , $B = 4770$	» 0,95 »	»	58 »
Peso totale 178,0 Kg.		Perdita totale 183 w.		

La superficie totale di raffreddamento viene ora determinata dal disegno.

Il calcolo dà 12.000 cm². Supponiamo ora che la cassa del trasformatore non debba essere riempita di olio, e a pieno carico, a regime l'aumento di temperatura non debba superare i 60° centigradi. Noi abbiamo allora dalla curva della temperatura (fig. 31) per l'aria $\sigma = 31$ ed il carico va scelto in modo che la perdita totale non superi i $12.000 : 31 = 387$ watt. La perdita per calore nel rame in tutti i rocchetti è quindi di:

$$387 - 183 = 204 \text{ watt,}$$

e quindi per una giusta ripartizione tra i due avvolgimenti 102 watt per ciascuno.

Finalmente dobbiamo progettare l'avvolgimento. Va osservato che oltre alla perdita di tensione per resistenza ohmica si manifesta un'altra perdita per dispersione magnetica. Quest'ultima si può calcolare approssimativamente, come sarà detto in seguito. Nella costruzione scelta essa è molto piccola, e per carico con lampade ad incandescenza ha un valore minore dell'1 ‰. Se supponiamo quindi che la perdita ohmica nell'avvolgimento sia di circa l'1 $\frac{1}{2}$ ‰, la tensione secondaria ai morsetti tra esercizio a vuoto ed a pieno carico varierà del 2 $\frac{1}{2}$ ‰.

Siccome $N = 130 \times 5000 = 650.000$ e $\omega = 50$, dalla formola:

$$e_2 = 4,44 \omega n_2 N 10^{-8}$$

ricaviamo il numero delle spire n_2 . Questo deve essere manifestamente un numero intero e se noi facciamo simmetrica la disposizione dell'avvolgimento sulle due braccia (il che è desiderabile per bene utilizzare lo spazio), n_2 deve essere anche un numero pari. Il numero pari che soddisfa meglio la formola è:

$$n_2 = 70$$

ed e_2 diventa = 101,23 quando sia $B = 5000$.

Se ora non avesse luogo la caduta di potenziale nè per dispersione nè per perdita ohmica (come è il caso nell'esercizio a vuoto), il numero delle spire primarie andrebbe preso $2000 : 100 = 20$ volte più grande. Avremo allora $n_1 = 1400$. Allora la tensione ai morsetti secondari a vuoto e per 2000 volt di tensione primaria sarebbe esattamente di 100 volt, mentre a pieno carico diminuirebbe del $2\frac{1}{2}\%$, cioè importerebbe solo 97,5 volt. Volendo ottenere a pieno carico la tensione di 100 volt ai morsetti secondari, bisogna diminuire del $2\frac{1}{2}\%$ il rapporto di trasformazione. Il numero delle spire nell'avvolgimento primario deve adunque essere fatto minore del $2\frac{1}{2}\%$ ossia di 35 spire. Noi abbiamo allora:

$$n_1 = 1365.$$

A vuoto sarà adunque e_2 non più 101,23, ma 102,5 volt e l'induzione è aumentata nello stesso rapporto, cioè del $102,5 - 101,23 = 1,27\%$; in luogo di 5000 essa è quindi diventata 5063. Facendo questa correzione alla perdita nel ferro prima determinata, si trova che quest'ultima non è più di 183 ma di 189 watt.

Possiamo ora coll'aiuto del disegno determinare gli spessori dei fili che possono essere avvolti negli spazi per essi disponibili. L'altezza dei rocchetti va scelta in conformità all'altezza della finestra (nel nostro caso 45 cm.), e va tenuto conto ancora dello spazio occupato dalle flange e di un certo margine. Per questo scopo si può togliere circa $3\frac{1}{2}$ cm., sicchè i rocchetti stessi avranno una lunghezza effettiva di 41,5 cm. Ogni rocchetto secondario deve avere 35 spire. Se si volesse disporre quest'ultimo in un solo strato si verrebbe ad avvolgere il filo sotto angoli troppo acuti, il che darebbe una certa difficoltà. È meglio disporre l'avvolgimento secondario in due strati, l'uno composto di 18 l'altro di 17 spire. Ora, siccome nel passaggio dallo strato inferiore a quello superiore va perduto lo spazio di una spira, la larghezza del filo da avvolgersi deve essere non $\frac{1}{18}$, ma $\frac{1}{19}$ della lunghezza del rocchetto, cioè $41,5 : 19 = 21,8$ mm. Lo spessore del filo è già determinato dallo spessore dell'avvolgimento in 14 mm. Calcolando 0,5 mm. di copertura (adunque circa 1 mm. per filo), si trova che il filo nudo deve essere di 6 mm. di spessore e di 20,8 di larghezza. Però non è possibile disporre ciascuna spira con esattezza matematica l'una vicino all'altra, quindi scegliamo per larghezza 20 mm. Noi abbiamo quindi nei rocchetti secondari filo di sezione rettangolare 6×20 mm. = 120 mm² e di una lunghezza di $70 \times 0,575 = 40,5$ m., ossia coll'aumento di 0,5 mm. per la copertura 41 m. circa. La resistenza calcolata colla considerazione dell'aumento di temperatura è:

$$W_2 = \frac{0,02 l_2}{120} \text{ ossia } W_2 = 0,00682 \text{ ohm.}$$

Un calcolo analogo fatto per i rocchetti primari indica che occorre del filo rotondo di 3,1 mm. di diametro (coperto = 3,67 mm.). Si hanno

112 spire su di uno strato, ed in totale su ciascuna branca vi sono sei strati, e sono rispettivamente necessarie 10 ed 11 spire. La lunghezza delle spire è di 1030 m. e la resistenza a caldo è:

$$W_1 = 2,8 \text{ ohm.}$$

Noi possiamo ora determinare la perdita totale per diverse condizioni di carico, dove per $B = 5063$ si deve porre la perdita nel ferro uguale a 189 watt. Il risultato è dato dalla seguente tabella:

Carico, kilowatt	8	9	10	11	12	13	14	15
Corrente secondaria, ampère	80	90	100	110	120	130	140	150
» primaria, »	4,125	4,634	5,15	5,664	6,18	6,7	7,22	7,44
Perdita ohmica	91	115	143	172	205	241	278	321
Perdita nel ferro	189	189	189	189	189	189	189	189
Perdita totale	280	304	332	361	394	430	467	510
Perdita totale in %	3,5	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,4
Superficie di raffreddamento per watt	43	40	36	33	30	28	26	24
Aumento di temperatura nell'aria	48	52	55	57	61	63	66	68
Aumento di temperatura nell'olio	37	38	41	43	45	47	48	50

Se adunque il trasformatore, come fu supposto più sopra, non deve essere riempito d'olio, allora lo si potrà caricare al più fino a 12 kw. La perdita totale è in questo caso di 394 w. Devono quindi essere guidati 12.394 w. ed il rendimento è:

$$\eta = \frac{12000}{12394} = 97 \%$$

Col riempimento d'olio lo si può caricare fino a 15 kw. e si ottiene circa lo stesso rendimento; allora però l'aumento di temperatura è solo di 50° C.

Costo del materiale attivo. — Il solo rendimento non è però sufficiente per giudicare della bontà della costruzione. Noi dobbiamo considerare anche il peso ed il costo e precisamente riferite ad 1 Kw. di potenza motrice. Se si calcola a 95 centesimi il chilogramma di lamiera tagliata ed a L. 2,25 il chilogramma di filo di rame isolato, si ha:

Ferro	178 Kg.	a L. 0,95	. . . . .	L. 169,10
Rame	112 »	» » 2,25	. . . . .	» 252,00
Peso totale 290 Kg.		Costo totale L. 421,10		

Il peso ed il costo totale si riferiscono solo al materiale attivo, vale a dire al ferro ed al rame.

	Raffreddamento nell'aria	Raffreddamento nell'olio
Capacità, kilowatt . . .	12	15
Peso del materiale attivo		
per kilowatt	Kg. 24,2	Kg. 19,4
Costo del materiale attivo		
per kilowatt	L. 35	L. 28

Ripartizione più conveniente delle perdite. — Il trasformatore che lavora con raffreddamento ad olio rispetto alla sua capacità si dimostra più leggero e di minor costo di quello con raffreddamento ad aria. Oltre a ciò, è minore il suo aumento di temperatura. Però la perdita percentuale è più grande in quello ad olio, ossia del 3,4 % invece che del 3,3 %, per raffreddamento ad aria. Per un carico tra 10 e 14 kilowatt il rendimento è massimo. Al limite inferiore corrisponde una perdita nel ferro del 67 %, ed al superiore una perdita del 40 % della perdita totale. I numeri della tabella sono arrotondati; se si fa il calcolo con parecchi decimali, si trovano limiti più ristretti, la cui media è di circa il 50 % per la perdita nel ferro e del 50 % per la perdita in calore. È chiaro quindi che la migliore costruzione è quella per la quale le perdite nel ferro e nel rame sono uguali. Se questo è vero si dovrebbe poter rendere più grande il rendimento del trasformatore di 15 Kw. adoperando più ferro e meno rame. La perdita totale per 15 Kw. secondo la tabella di sopra è di 510 watt. Vogliamo ora cambiare l'avvolgimento in modo, che la perdita nel ferro sia circa la metà della perdita totale, adunque circa 255 watt. La perdita per Kg. di ferro per 50 periodi può essere ora in media di circa 1,43 watt.

Un semplice calcolo indica, che la perdita nel ferro di 255 watt viene raggiunta per $B = 6000$ nel nucleo e $B = 5750$ nei gioghi. Noi abbiamo:

2 nuclei	116,8 Kg.	$B = 6000$	per 1,5 w.	. . . . .	174 w.
2 gioghi	61,2 »	$B = 5750$	» 1,32 w.	. . . . .	81 w.
<hr/>					
Totale . .	178,0 Kg.		per 1,43 w.	. . . . .	255 w.

Per una induzione di 6000 sarà $N = 0,78$ e $n_2 = 58$. Su ciascuna branca avremo quindi 29 spire di filo per l'avvolgimento secondario in due strati di 15 e 14 spire. Il filo può avere le dimensioni seguenti: $24,5 \times 6$ mm. nudo, ossia $25,5 \times 7$ mm. ricoperto. La resistenza dell'avvolgimento secondario a caldo è di 0,0046 ohm.

Il numero delle spire primarie è $20,58 \left(\frac{100 - 2,5}{100} \right) = 1130$. Impiegando filo di mm. 3,5 (ricoperto mm. 4,2) ogni strato avrà 98 spire.

Su ciascuna branca vanno quindi avvolti cinque strati e 75 spire.

La resistenza a caldo è di 1,78 ohm. Il peso totale del rame è di 117 Kg. Per 15 Kw. di carico abbiamo le seguenti perdite:

Perdita ohmica nell'avvolgimento primario	106 w.
» » » secondario	103 w.
Perdita nel ferro	255 w.
	Totale 464 w.

La perdita totale è ora solo il 3,1 % della potenza e non più 3,4 come prima. — Contemporaneamente l'aumento di temperatura è diminuito di 2° C. Il miglioramento è una conseguenza della migliore ripartizione della perdita nel ferro e nel rame. Quindi coll'aumentare la prima e diminuire la seconda ci siamo avvicinati alla condizione più favorevole dell'uguaglianza della perdita nel ferro e nel rame. Col raffreddamento ad olio si hanno i seguenti dati d'esercizio di questo trasformatore:

Carico in kw.	12	15	17
Corrente secondaria	120	150	170
» primaria	6,18	7,72	8,75
Perdita nel rame	134	209	270
» nel ferro	255	255	255
» totale	389	464	525
» percentuale	3,25	3,1	3,1
Aumento di temperatura	44	48	52

Per 15 Kw. la perdita nel ferro è un po' minore della metà della perdita totale, per 17 Kw. è un po' maggiore. I due carichi sono egualmente convenienti in rapporto al rendimento. Si vede quindi che non è necessaria una esatta ed uguale ripartizione della perdita tra rame e ferro, ma è sufficiente una uguaglianza approssimativa.

Anzi è favorevole avere un certo margine; invero se il trasformatore deve servire specialmente per luce, si deve rendere la perdita nel ferro un po' minore di quella nel rame a pieno carico, per tener conto della circostanza che il trasformatore è poco caricato durante la maggior parte del tempo. Se si tratta invece di un trasformatore per distribuzione di forza, e che quindi per molte ore del giorno lavora a pieno carico, è conveniente dare al ferro la maggior parte della perdita, perchè in tal modo si ottiene una costruzione più economica.

Economia d'esercizio. — Abbiamo veduto nel sopracitato esempio, che per un determinato trasformatore si ottiene il massimo rendimento con quel carico, per il quale le perdite nel ferro e nel rame sono quasi uguali. Ora questa proprietà non può verificarsi per qualsivoglia carico, ma solamente per uno determinato. Il costruttore quindi nel progettare il trasformatore deve fare in modo, che la più conveniente ripartizione

delle perdite avvenga per quel carico, che è preponderante durante l'esercizio di un anno. Ora è praticamente impossibile per piccoli trasformatori di adattare esattamente la costruzione ad ogni singolo caso. Tali trasformatori sono merce da magazzino ed il fabbricante il più delle volte, costruendoli, non sa quale uso ne sarà fatto più tardi. Se ne fabbricano contemporaneamente parecchie dozzine o centinaia di ogni tipo che vengono poi spediti secondo l'ordinazione.

Ma se non è possibile di adattare in ciascun caso la costruzione alle condizioni di esercizio, pure, senza abbandonare il sistema della fabbricazione di tipi correnti, si può ottenere un adattamento approssimato alle diverse condizioni di funzionamento, fabbricandone due tipi per ciascuna capacità, uno per il caso in cui il carico oscilla entro limiti molto grandi, l'altro per il caso in cui il carico oscilla entro stretti limiti.

Per questi ultimi si fa la perdita nel ferro un po' più grande di quella nel rame. — Così, per esempio, per un impianto nel quale si abbia con piccole variazioni in media 15 Kw., sceglieremo la costruzione ora indicata. La perdita nel ferro sarà 255 e quella nel rame 209 watt. Questo trasformatore, in un impianto dove il carico fosse molto variabile, non sarebbe conveniente al pari di uno, nel quale la perdita nel ferro fosse più piccola e quella nel rame più grande. Il trasformatore di prima adattato a questo caso avrebbe la perdita nel ferro 189 e quella nel rame 321 watt. Noi chiameremo per brevità queste due disposizioni *tipo per luce* e *tipo per forza*. Per riconoscere ora se sia o no conveniente la fabbricazione di questi due tipi invece che di uno solo, calcoleremo il rendimento annuo dei due tipi colla supposizione, prima che si abbia un impianto per luce con carico molto variabile e poi un impianto per trasporto di forza con carico poco oscillante. Per rendere facile il confronto scriviamo in una tabella i dati dei due trasformatori. I indica il tipo per luce, II il tipo per forza.

	I	II
Induzione nel nucleo	5063	6000
Potenza in Kw.	15	15
Perdita nel ferro, watt	189	255
» nel rame »	321	209
» totale »	510	464
Peso del materiale attivo . . Kg.	290	295
Costo » » L.	421,10	432,6

L'impianto per luce abbia una potenzialità corrispondente a 300 lampade di 50 watt e la durata d'accensione sia data dalla seguente tabella. Le ultime quattro colonne danno la perdita ohmica di energia e lavoro nel trasformatore.

Ore	Lampade contemporaneamente accese	Lampade ore	Perdita ohmica			
			Watt		Watt-ore	
			I	II	I	II
40	300	12.000	321	209	12.800	8.400
90	210	18.900	157	102	14.200	9.200
500	120	60.000	52	34	26.000	17.000
1000	60	60.000	13	9	13.000	9.000
800	30	24.000	3	2	2.400	1.600
6330	0	0	0,2	0,2	1.300	1.300
8760		174.900			69.700	46.500

La durata d'accensione media delle lampade installate è 580 ore. Viene effettuato un lavoro di $\frac{174900}{1000} \times 50 = 8745$ Kw.-ore.

Oltre a questo lavoro bisogna ancora aggiungere la perdita ohmica di 69,7 Kw.-ore per il tipo I o di 46,5 Kw.-ore per il tipo II e la perdita nel ferro. Quest'ultima è di 1660 Kw.-ore per I e 2240 Kw.-ore per II. Colla solita supposizione che il trasformatore in un impianto per luce non venga tolto dal circuito primario, si può calcolare come segue il rendimento annuale dei due tipi:

	Tipo	
	I	II
Lavoro fornito, Kw.-ore	8745	8745
Perdita ohmica »	69,7	46,5
» in calore nel ferro, Kw.-ore	1660	2240
Lavoro impiegato, Kw.-ore	10474,7	11031,5
Rendimento annuale in %	83,5	79,4

Adunque il tipo II costa per l'esercizio annuale in cifra tonda 560 Kw.-ore di più del tipo I. Il costo di fabbricazione di un trasformatore di tale grandezza è di circa $2\frac{1}{2}$ fino a 3 volte maggiore del costo del materiale attivo, adunque per il tipo I in cifra tonda lire 1200 e per il tipo II circa lire 40 di più. La differenza è così piccola che noi la possiamo trascurare, e ammettere che il costo di fabbricazione dei due trasformatori sia uguale. Usando quindi il tipo I si viene a risparmiare all'anno 560 Kw.-ore. Comunemente i trasformatori inseriti in una rete di una città vengono forniti dall'impresa elettrica stessa ed il contatore viene posto nel circuito secondario, sicchè in esso viene segnato solo il lavoro consumato dalle lampade, non quello perduto nel trasformatore. L'impresa quindi deve tener conto di questa perdita. Se si calcola in 13 centesimi il solo costo

della produzione di un Kw.-ora, allora questa maggior perdita, dovuta all'uso di un tipo di trasformatore non adatto, importa lire 65 circa all'anno, che capitalizzate al 5 % superano il valore del trasformatore.

Consideriamo l'economia d'esercizio di questi due tipi in un impianto per trasporto di forza. Supponiamo che il trasformatore serva a dare l'energia ad una piccola officina, e che quando non viene adoperato, venga tolto dal circuito primario. La durata totale d'esercizio sia 300 ore ed il carico sia diviso secondo la seguente tabella :

TABELLA DELLA DURATA DEL CARICO.

Ore	Carico		Perdita ohmica			
			Watt		Watt-ore	
	Kw.	Kw.-ore	I	II	I	II
1500	15	22.500	321	209	482	314
1500	12	18.000	206	134	309	200
3000		40.500			791	514

Le perdite nel ferro sono per I 567 Kw.-ore e per II 765 Kw.-ore. Il rendimento annuo si calcola come segue:

	Tipo	
	I	II
Lavoro fornito, Kw.-ore	40.500	40.500
Perdita ohmica »	791	514
» nel ferro »	567	765
Lavoro impiegato, Kw.-ore	41.858	41.779
Rendimento annuo in % (cifra tonda)	97	97

La differenza nel lavoro impiegato è di 79 Kw.-ore in favore del tipo II. Questo è ora migliore del tipo I. Esso ha anche il vantaggio di un minore aumento di temperatura.

L'esempio ora dato indica che è molto conveniente di fabbricare diversamente i trasformatori a seconda che essi devono servire per carico variabile o costante.

Dettagli di costruzione. — Le figure da 43 a 46 indicano le diverse parti del trasformatore sopra calcolato per 12 Kw. con raffreddamento ad aria e per 15 Kw. con raffreddamento ad olio. Il trasformatore è costruito in una cassa in ghisa e può essere installato in una cantina od in altro locale umido oppure anche all'aria aperta in paesi molto umidi. In quegli impianti nei quali devono essere posti trasformatori in luoghi

asciutti, la copertura esterna può anche essere fatta di lamiera bucata ottenendo così un minore riscaldamento; quest'ultimo può venire misurato dalla curva inferiore in figura 31. Il trasformatore rappresentato dalle figure 43 a 46 non ha alcuna connessura.

Dopo aver tagliato le lamiere nella loro giusta grandezza, esse vengono coperte da una parte mediante carta molto sottile e quindi serrate assieme; prima si formano i due nuclei ed il giogo inferiore, poi vengono infilati i rocchetti e da ultimo si mette a posto il giogo superiore. I rocchetti

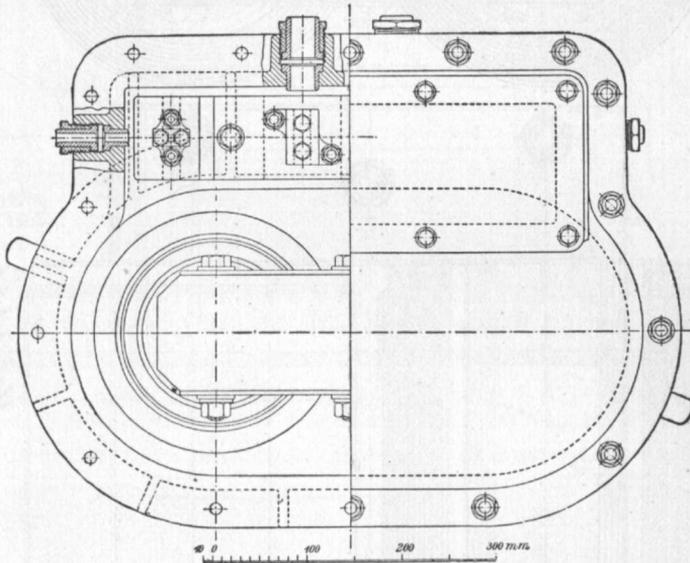


Fig. 43.

vengono avvolti, come già si è detto, sopra cilindri di carta, i quali alla parte inferiore sono muniti di flange, che non permettono all'avvolgimento di scorrere. Alla parte superiore le flange sono superflue, quando si uniscono i fili alla fine di ogni strato. Avvolto ogni strato è opportuno ricoprirlo con tela paraffinata sottile, le cui estremità vengono rimboccate prima della posa del prossimo strato, sicchè i fili vicini di tutti gli strati sono isolati fra di loro oltre che dalla copertura loro in cotone, anche dallo strato di tela.

Lo spessore della copertura in cotone dipende dal diametro dei fili (oppure dal diametro equivalente per fili di sezione quadrata), dalla tensione e dalla qualità della copertura. La copertura deve almeno essere doppia; preferibile se tripla. Per fili molto grossi può essere usato oltre

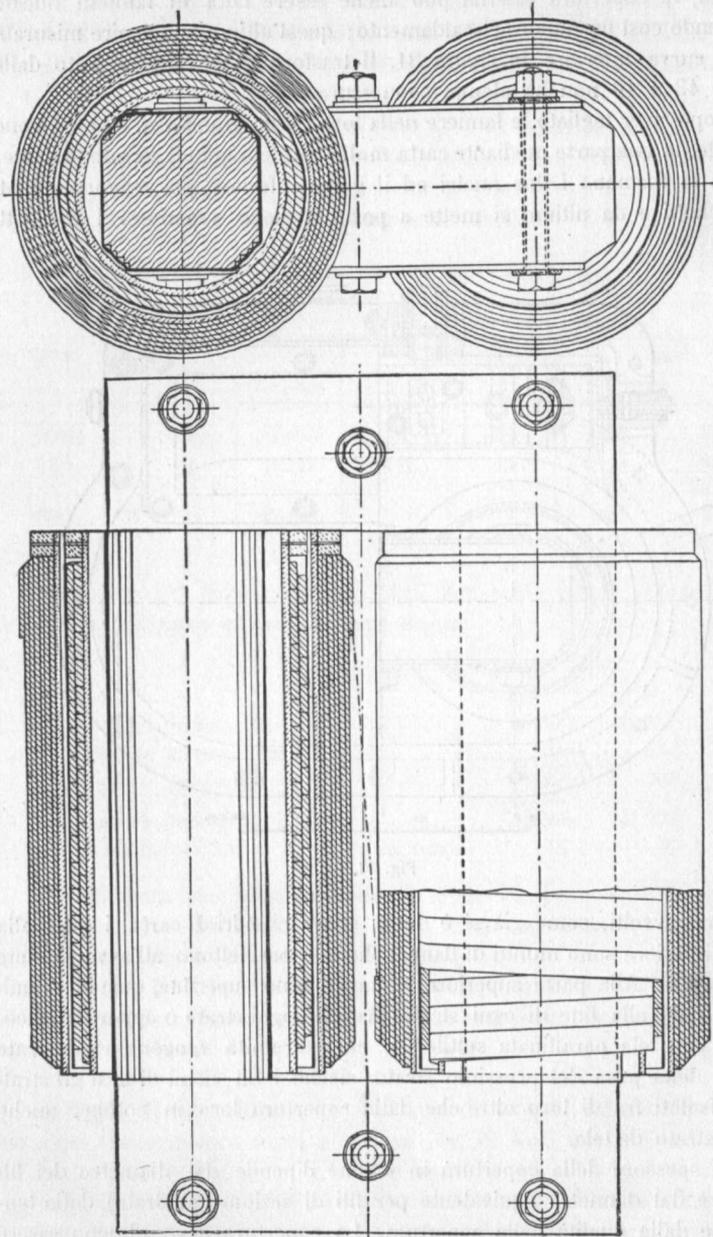


Fig. 44.

Mafsstab 1:6

Mafsstab = Scala.

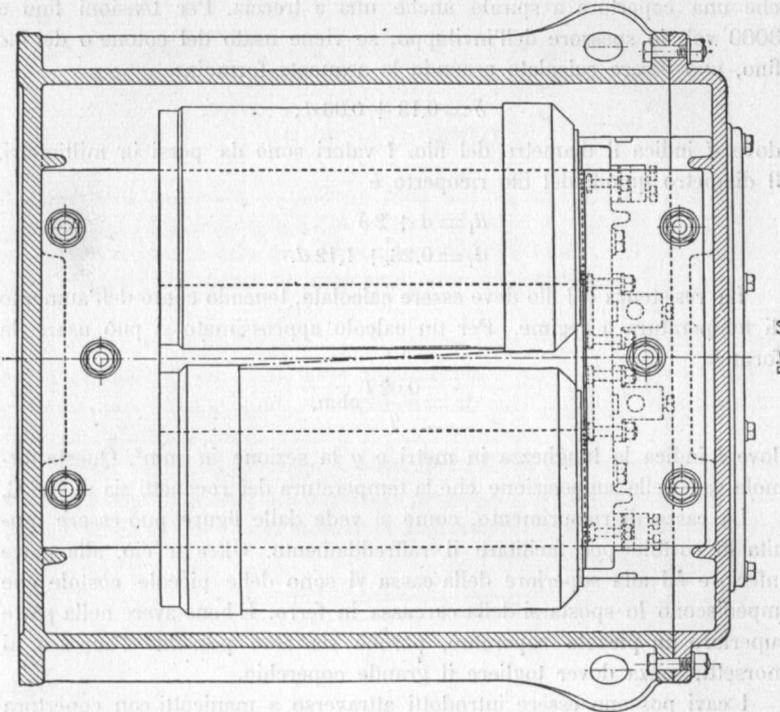


Fig. 46.

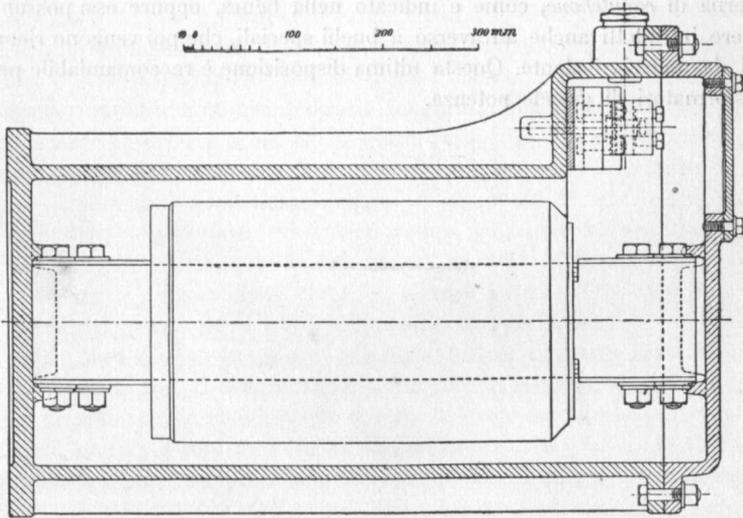


Fig. 45.

che una copertura a spirale anche una a treccia. Per tensioni fino a 3000 volt lo spessore dell'involuppo, se viene usato del cotone o del filo fino, può essere calcolato secondo la seguente formola:

$$\delta = 0,13 + 0,06 d,$$

dove d indica il diametro del filo. I valori sono da porsi in millimetri. Il diametro quindi del filo ricoperto è

$$d_1 = d + 2\delta$$

$$d_1 = 0,26 + 1,12 d.$$

La resistenza del filo deve essere calcolata, tenendo conto dell'aumento di temperatura a regime. Per un calcolo approssimato si può usare la formola

$$w = \frac{0,02 l}{q} \text{ ohm,}$$

dove l indica la lunghezza in metri e q la sezione in mm^2 . Questa formola vale nella supposizione che la temperatura dei rocchetti sia di 75°C .

La cassa di ricoprimento, come si vede dalle figure, può essere munita di costole per facilitare il raffreddamento. Oltre a ciò, alla parte inferiore ed alla superiore della cassa vi sono delle piccole costole che impediscono lo spostarsi della carcassa in ferro. È bene avere nella parte superiore un piccolo coperchio, perchè sia reso possibile l'accesso ai morsetti, senza dover togliere il grande coperchio.

I cavi possono essere introdotti attraverso a manicotti con copertura interna di *caoutchouc*, come è indicato nella figura, oppure essi possono essere introdotti anche attraverso a buchi speciali, che poi vengono riempiti da materia isolante. Questa ultima disposizione è raccomandabile per trasformatori di grande potenza.

CAPITOLO SESTO

Il diagramma vettoriale. — Calcolo della caduta induttiva di tensione — Azione della frequenza sulla caduta induttiva di tensione. — Determinazione grafica delle grandezze riguardanti il lavoro. — Determinazione grafica della caduta di tensione ai morsetti secondari.

Il diagramma vettoriale. — Il regime di lavoro di un trasformatore, ed in generale di un qualunque apparecchio a corrente alternata, si può rappresentare in due modi, o analiticamente per mezzo di formole generalmente piuttosto complicate, o geometricamente a mezzo del cosiddetto diagramma vettoriale. La rappresentazione analitica è meno chiara e quindi verrà qui riportata solo nella misura necessaria a spiegare la rappresentazione grafica. Tutte le grandezze periodicamente variabili possono essere

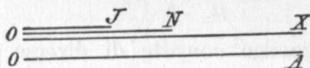


Fig. 47.

rappresentate da vettori rotanti, la lunghezza del vettore dà il valore massimo e la sua proiezione il valore istantaneo della grandezza. I vettori di quelle grandezze, che hanno ugual fase, giacciono sopra una medesima linea e si sovrappongono; essi in genere hanno lunghezze diverse, ma possono naturalmente avere uguale lunghezza, quando si scelgano opportunamente le diverse scale ed in questo caso uno stesso vettore rappresenta parecchie grandezze. Così, ad esempio, corrente, eccitazione vale a dire ampère-spire ed il flusso magnetico sviluppato da queste sono grandezze della stessa fase, ed i loro vettori giacciono sulla stessa retta. Possono però avere diverse lunghezze; così OJ in figura 47 può rappresentare il vettore della corrente, mentre il tratto ON rappresenta il vettore del campo ed il tratto OX quello dell'eccitazione.

In figura 47 per maggiore chiarezza furono disegnati separatamente i tre vettori, ma il lettore deve immaginarli sovrapposti. Ammettiamo che la scala sia la stessa per tutte e tre le grandezze, sicchè, ad esempio, 1 mm. = 1A; 1 mm. = 1 unità di campo in 10^6 linee di forza ed 1 mm. = 1 ampère-spira. Sia n il numero delle spire, allora deve essere in queste scale unitarie $\frac{OX}{OJ} = n$ e $\frac{OX}{ON} = R$, dove con R si indica la resi-

stenza magnetica del percorso delle linee di forza. Secondo una legge nota di elettrodinamica la forza magnetica in unità del sistema assoluto è:

$$H = \frac{4\pi n J}{l},$$

dove l è la lunghezza del percorso delle linee di forza. Se A è la sezione del circuito magnetico, p la sua permeabilità e B l'induzione, avremo

$$\begin{aligned} B &= H \mu \\ N &= A H \mu 10^{-6} \end{aligned}$$

in unità di 10^6 linee. Se J viene espresso in ampère, si ha

$$N = \frac{1,25 n J}{l} A \mu 10^{-6}$$

$$N = \frac{1,25 X A \mu}{l} 10^{-6}$$

$$N = \frac{X}{\frac{0,8 l 10^6}{A \mu}} = \frac{X}{R}$$

$$R = \frac{1}{\mu} \frac{0,8 l}{A} 10^6.$$

Se il circuito magnetico consiste di diverse parti inserite in serie, allora la resistenza totale è eguale alla somma delle resistenze parziali, adunque in genere

$$R = \sum \frac{1}{\mu} \frac{0,8 l}{A} 10^6 \dots \dots \dots (13)$$

L'eccitazione necessaria per generare un campo di N milioni di linee è quindi

$$X = R N \text{ ampère-spire.}$$

Se N è il valore massimo del campo, allora naturalmente anche per le ampère-spire va preso in considerazione il valore massimo e non quello effettivo. Se X rappresenta il valore effettivo, allora il valore massimo del campo è

$$N = \frac{X \sqrt{2}}{R} \dots \dots \dots (14)$$

Noi abbiamo supposto in figura 47, che la stessa unità di misura valga per le tre grandezze. Ora possiamo cambiare la scala per due di queste grandezze, in modo che esse vengano rappresentate dal vettore della terza grandezza. Se ad esempio $OA = OX$ è il vettore del valore massimo di ampère-spire nella scala di $1 \text{ mm.} = 1 \text{ ampère-spira}$, allora la lunghezza OA può essere anche considerata come vettore della corrente, quando la si misuri con un'altra scala, le cui divisioni distino tra loro

non di 1 mm. ma di n mm. Nello stesso modo OA può anche rappresentare il flusso di forza, quando lo si misuri con una scala le cui divisioni siano distanti l'una dall'altra di R mm. Se X è dato in ampère-spire effettive, la distanza delle divisioni nella scala corrispondente al campo

$$\text{è } \frac{R}{\sqrt{2}}.$$

Sia in figura 48 OE il valore massimo della tensione in un dato circuito (ad esempio nel rocchetto primario di un trasformatore) ed OJ sia il valore massimo della corrente. Le unità di misura della tensione e della intensità di corrente siano diverse e scelte a volontà. I due vettori ruotino nel senso della freccia; le loro proiezioni sulla verticale rappresentano i loro valori istantanei. Ora noi sappiamo che i valori effettivi;

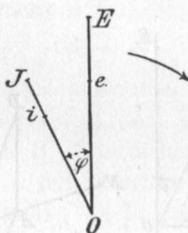


Fig. 48.

misurati nelle rispettive scale, sono dati dai vettori, le cui lunghezze sono minori dei vettori dei valori massimi nel rapporto di $\sqrt{2}:1$. Si ha adunque

$$\text{La tensione effettiva } Oe = \frac{OE}{\sqrt{2}}$$

$$\text{La corrente effettiva } Oi = \frac{OJ}{\sqrt{2}}.$$

Se ora cambiamo le scale in modo, che le loro divisioni siano distanti l'una dall'altra $\sqrt{2}$ volte più di prima, potremo misurare i valori effettivi direttamente colle nuove scale sulle lunghezze OE ed OJ. Noi possiamo anche considerare queste due rette rappresentanti i vettori effettivi come fisse, poichè per noi ha importanza solo la loro distanza angolare ϕ , la quale si mantiene costante sia che i vettori ruotino o che rimangano fissi. Però dobbiamo conservare in ogni modo il senso della rotazione, per sapere quale di questi vettori precede o segue l'altro. Nella figura 48 il vettore della tensione precede quello della intensità di corrente.

Come fu già detto nel IV Capitolo, i vettori di grandezze della stessa natura si possono sommare coll'aiuto del poligono funicolare. Noi possiamo quindi sommare fra di loro e campi ed eccitazioni e tensioni, ma non

un campo con un'eccitazione od un'intensità con una tensione. Un diagramma nel quale siano riunite nel giusto modo tutte le diverse grandezze che si riscontrano in un trasformatore viene chiamato *diagramma vettoriale* o *diagramma del lavoro di un trasformatore*. Come facile esempio vogliamo dapprima rappresentare un tale diagramma per un trasformatore, il quale non abbia nè perdite nè dispersioni, ma però possieda una resistenza magnetica. Questo caso certamente non è possibile in pratica; esso ha qui solo lo scopo di rendere più facile al lettore lo studio dei casi che si tratteranno in seguito.

Se il trasformatore alimenta solo delle lampade ad incandescenza, allora la corrente secondaria non ha alcuno spostamento di fase; adunque intensità e corrente giacciono su una stessa retta, ma possono naturalmente essere di lunghezza differente. Se invece nel circuito secondario si trovano

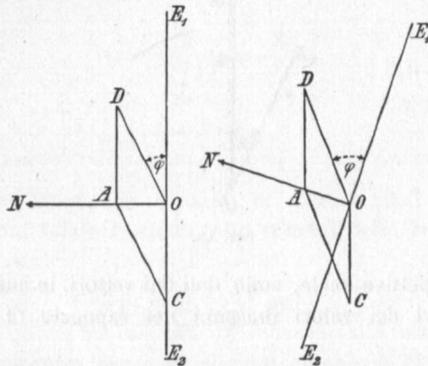


Fig. 49.

Fig. 50.

inserite oltre alle lampade ad incandescenza anche lampade ad arco o motori, allora si ha spostamento di fase; l'intensità segue la tensione. L'intensità di corrente secondaria viene regolata dalla inserzione o esclusione degli apparecchi di consumo (lampade o motori), supponiamo che per ogni condizione di carico rimanga uguale il rapporto fra il numero delle lampade ad incandescenza e quello degli altri apparecchi, sicchè lo spostamento di fase nel circuito secondario rimanga costante.

La figura 49 indica il diagramma del lavoro di un trasformatore con carico di sole lampade ad incandescenza e la figura 50 con carico misto. La rotazione dei vettori avviene in questi come in tutti gli altri diagrammi nel senso delle lancette di un orologio.

Sia $OC = X_2$ il vettore delle ampère-spire secondarie effettive ed $OE_2 = e_2$ quello della tensione effettiva ai morsetti del circuito secondario. Perchè ciò possa sussistere bisogna che vi sia un determinato flusso di forza, il cui valore massimo si ha dalla uguaglianza 7.

Si ha

$$N = \frac{e_2}{4,44 \frac{\text{S}}{100} n_2}$$

Il vettore del campo ON deve precedere quello della tensione e_2 di 90° , e quindi è determinata la grandezza e la posizione di quest'ultimo. Nel rocchetto primario il campo N genera una f. e. m., il cui vettore segue quello del campo alla distanza di 90° . La sua grandezza è

$$e_1 = 4,44 \frac{\text{S}}{100} N n_1.$$

Per avere l'equilibrio, deve essere generata nel rocchetto primario una f. e. m. di ugual grandezza, ma in senso contrario. Quindi la tensione ai morsetti del circuito primario è data dal vettore

$$O E_1 = e_1$$

dove l'unità di misura è uguale a quello di e_2 . Supponiamo che sia $n_1 > n_2$ allora, come si vede dal diagramma, sarà anche $e_1 < e_2$.

Per avere ora il campo N, l'eccitazione risultante deve avere un determinato valbre X, che si può calcolare colla formola (14). La resistenza magnetica si calcola colla (13). Tracciamo quindi, scegliendo come unità di misura quella usata per X_2 ,

$$O A = X,$$

allora, poichè X deve essere la risultante delle due eccitazioni (secondaria X_2 e primaria X_1), potremo trovare graficamente X_1 . Si avrà così il tratto OD. Costruendo ora una scala le cui suddivisioni siano n_2 volte più distanti di quelle della scala usata per l'eccitazione, in questa nuova scala sarà $OC = i_2$. Analogamente possiamo eseguire un'altra scala per le correnti, le cui suddivisioni sieno n_1 volte più distanti di quelle della scala usata per l'eccitazione, allora in questa nuova scala sarà $OD = i_1$. Siccome OA non può essere nullo (perchè secondo la premessa il trasformatore possiede resistenza magnetica), i_1 in figura 49 non può coincidere con e_1 , nel circuito primario si avrà uno spostamento di fase φ , benchè non abbia luogo lo spostamento di fase nel circuito secondario. Nella figura 50 $\sphericalangle COE_2$ è lo spostamento di fase nel circuito secondario e φ quello del circuito primario, ed è senz'altro chiaro che φ è maggiore dell' $\sphericalangle COE_2$. In causa dunque della resistenza magnetica del trasformatore lo spostamento di fase del circuito secondario viene trasportato, ingrandito, nel circuito primario.

Dal diagramma si deduce pure, che la tensione ai morsetti secondari sta in un determinato rapporto indipendente dal carico colla tensione ai morsetti primari.

Si ha cioè

$$e_2 = e_1 \frac{n_2}{n_1}.$$

Se la tensione primaria ai morsetti del trasformatore è mantenuta costante, anche la tensione secondaria della corrente fornita si manterrà costante. Se viene diminuita l'intensità della corrente secondaria (col togliere dal circuito degli apparecchi di consumo inseriti in parallelo), allora C si avvicina ad O e D ad A. Viene adunque diminuito i_1 ed aumentato φ . Per il funzionamento a vuoto $i_2 = 0$ e C coincide con O. Contemporaneamente D coincide con A, ed, a seconda che si adopera la scala per l'eccitazione o quella per gli ampère, OA dà l'eccitazione a vuoto $X\mu$ o la corrente a vuoto $i\mu$.

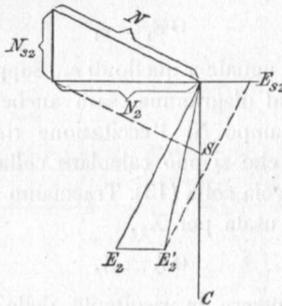


Fig. 51.

Fino ad ora abbiamo supposto, che il trasformatore non abbia nè perdita nè dispersione. Noi vogliamo ora supporre, che si abbia solo dispersione nel trasformatore; proprietà questa, che si manifesta col fatto, che in ogni rocchetto si produce una f. e. m. d'autoinduzione proporzionale all'eccitazione e ad essa normale. Questa segue la corrente e va paragonata ad una f. e. m. di uguale grandezza, che agisce sul rocchetto precedendo la corrente di 90° .

Sia come prima in figura 51 $OC = X_2$ l'eccitazione del circuito secondario e OE'_2 la tensione ai morsetti secondari. L'eccitazione X_2 generi un campo di dispersione N_{s2} e questo una f. e. m. d'autoinduzione $OE_{s2} = e_{s2}$. Per avere ora la tensione $e'_2 = OE'_2$, il campo utile N non deve solo generare questa f. e. m., ma anche una seconda f. e. m. che faccia equilibrio alla e_{s2} . Facciamo perciò

$$E'_2 E_2 = OE_{s2}$$

e ricaviamo la f. e. m.

$$e_2 = OE_2$$

che deve essere generata dal campo utile N dei rocchetti secondari. Per trovare N abbiamo sommato le f. e. m. e quindi dalla loro risultante e_2 stabilita l'esistenza del campo utile. Noi avremmo anche potuto sommare i campi e dalla loro risultante N_2 ricavare la tensione ai morsetti e'_2 . Tutti e due i modi di considerare la cosa conducono al medesimo risultato, l'ultimo però corrisponde più a quello che succede effettivamente.

Che sia solamente il campo N ad agire sui rocchetti secondari, ciò che dovrebbe avvenire realmente perchè potesse venirvi indotta la tensione e_2 , è un'ipotesi inammissibile. E cioè perchè possa formarsi la f. e. m. OE_{s_2} , occorre che anche il campo $OS = N_{s_2}$ agisca sui rocchetti secondari. Adunque in questi rocchetti agiscono due campi, vale a dire N e N_{s_2} , che si compongono nel campo risultante N_2 , come lo indica la figura 51. Il valore massimo quindi del vero flusso di forza non è N , ma N_2 . È quindi più esatto comporre fra di loro i campi e non le f. e. m. D'altra parte in certi casi è più conveniente riportare nel diagramma le sole f. e. m., e noi difatti, a seconda della convenienza, useremo dell'uno o dell'altro modo di ricerca. Il legame che passa fra i due sistemi è trattato più a lungo nel capitolo seguente.

Ora si tratta di determinare l'azione del campo d'autoinduzione. Se fosse $N_{s_2} = 0$, allora N_2 verrebbe ad assumere il massimo valore \bar{N} e e'_2 il massimo valore e_2 . Noi vediamo adunque che in conseguenza del campo d'autoinduzione, la tensione diminuisce alquanto e la diminuzione è tanto più grande quanto maggiore è e_{s_2} . La f. e. m. e_{s_2} viene chiamata caduta induttiva di tensione. Questa grandezza non è da confondersi colla differenza algebrica fra le tensioni e_2 e e'_2 . Generalmente è $e_{s_2} > e_2 - e'_2$; soltanto per carico puramente induttivo, come si indicherà in seguito, è $e_{s_2} = e_2 - e'_2$. Per qualsiasi carico, e_{s_2} è la differenza vettoriale tra e_2 e e'_2 e quindi la caduta induttiva di tensione ha un'azione tanto maggiore sulla vera caduta di tensione ai morsetti, quanto più è grande lo spostamento di fase nel circuito secondario.

Fu detto più sopra che la dispersione genera una f. e. m. normale all'intensità di corrente. E difatti, siccome i fili dei due rocchetti non possono occupare lo stesso spazio, tra essi esiste un campo di dispersione, le cui linee di forza attraversano solamente le spire dell'uno o solo quelle dell'altro rocchetto, ma non quelle di tutti e due contemporaneamente. Tutti e due i rocchetti sono attraversati soltanto dalle linee di forza del campo principale. Il campo principale viene generato dalla risultante delle ampère-spire nei due rocchetti. I campi di dispersione N_{s_1} e N_{s_2} vengono generati ciascuno dalle ampère-spire dei rocchetti corrispondenti ed i loro vettori hanno quindi la stessa direzione della corrente, mentre i vettori delle corrispondenti f. e. m. e_{s_1} ed e_{s_2} sono normali ai vettori della corrente.

Calcolo della caduta induttiva di tensione. — Per trovare la f. e. m. di dispersione procederemo come segue. Sia in figura 52 II la sezione dei rocchetti secondari e I quella dei primari di un trasformatore a nucleo con rocchetti cilindrici. Il rocchetto secondario sia posto vicino al ferro, il primario all'esterno. Siccome la permeabilità nel ferro è molto grande, non è necessaria quasi alcuna forza per guidare il flusso di forza attraverso al ferro; al contrario è necessaria una forza notevole per guidarlo attraverso lo spazio b tra i due rocchetti, mentre il flusso di dispersione che attraversa l'aria esternamente ad I richiede pure una parte della forza suddetta. Questo ragionamento ci dice che il fascio di linee di forza del campo di dispersione II incontra una resistenza magnetica minore del fascio di linee di forza del campo di dispersione I; quindi, per uguale eccitazione, il campo di dispersione di II è più intenso di quello

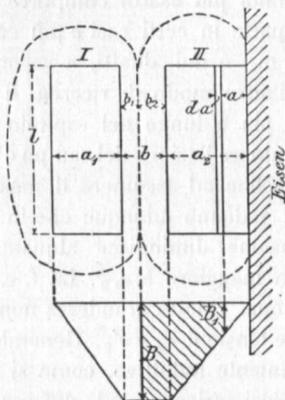


Fig. 52.

Eisen = Ferro.

di I. Ora, per poter trattare matematicamente questo argomento in modo facile, dobbiamo fare alcune supposizioni. Anzitutto supporremo che i_2 ed i_1 abbiano uguale fase, come si verifica quasi sempre; di poi che nello spazio b si trovi una superficie cilindrica di separazione, esternamente alla quale tutte le linee di dispersione attraversino solamente I ed internamente solamente II. Se la resistenza magnetica a sinistra di I fosse uguale a quella nel ferro a destra di II, la superficie di separazione sarebbe posta esattamente nel mezzo dello spazio cilindrico b ; ma siccome lo spazio a sinistra di I è dotato di una notevole resistenza magnetica, la superficie di separazione non dovrebbe veramente esser posta nel mezzo dello spazio b , ma in posizione tale che sia $b_1 < b_2$. Nel caso limite avremo $b_1 = \frac{b_2}{2}$; facendo così si ammetterebbe per lo spazio posto a sinistra

di I una resistenza troppo grande, e precisamente uguale a quella che si ha nel piccolo spazio b a destra di I. Ponendo invece la superficie di divisione nel mezzo di b , se cioè $b_1 = b_2$, si verrebbe a supporre nello spazio a sinistra di I una resistenza troppo piccola. Tutte e due le ipotesi sarebbero inesatte; ma siccome non è necessario una determinazione esatta della posizione della superficie di divisione, converrà eseguire il calcolo per ambedue questi casi limiti, assumendo poi la media dei due risultati. Un errore nella determinazione dei singoli campi di dispersione non ha praticamente importanza, perchè noi abbiamo bisogno non dei singoli valori della f. e. m. di autoinduzione, ma solo della loro somma per il calcolo della caduta di tensione.

Siano n_1 ed n_2 il numero delle spire nei due circuiti, π il perimetro dello spazio di dispersione b (che noi con approssimazione sufficiente supporremo uguale per i due rocchetti), γ il numero delle spire per 1 cm. di spessore d'avvolgimento ed l la lunghezza dei rocchetti. Le ordinate della superficie tratteggiata sono allora, a seconda della scala, o ampère-spire o densità del campo B; vicino al ferro ambedue sono uguali a zero, nello spazio b hanno ambedue il loro valore massimo e a sinistra di I sono di nuovo zero. Questa ipotesi non è propriamente esatta; però lo supporremo per facilitare il calcolo.

In una striscia di elementi di II di spessore radiale da , abbiamo

$$dn = \gamma da$$

spire. Da essa sono assorbite tutte le linee di forza, che corrispondono alla superficie tratteggiata tra B e B_1 . Questo flusso di forza, come risulta dal diagramma, è dato da

$$N = \pi \left(b_2 B + (a_2 - a) \frac{B + B_1}{2} \right).$$

La f. e. m. di dispersione corrispondente è

$$de_s = 4,44 \sim \pi \left(b_2 B + (a_2 - a) \frac{B + B_1}{2} \right) \gamma da.$$

Integriamo ora da $a = 0$ fino ad $a = a_2$, ricaveremo così la f. e. m. autoindotta nel rocchetto II per dispersione

$$e_{s_2} = 4,44 \sim \pi \gamma \int_0^{a_2} \left[b_2 B + (a_2 - a) \left(\frac{B + B_1}{2} \right) \right] da$$

$$e_{s_2} = 4,44 \sim \pi \gamma \left[b_2 B a_2 + \int_0^{a_2} (a_2 - a) \left(\frac{B + B_1}{2} \right) da \right].$$

Ma ora si ha

$$\frac{B + B_1}{2} = \frac{B}{a_2} \left(\frac{a_2 + a}{2} \right)$$

$$(a_2 - a) \left(\frac{B + B_1}{2} \right) = \frac{B}{a_2} \left(\frac{a_2^2 - a^2}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{a_2} (a_2 - a) \left(\frac{B + B_1}{2} \right) da &= \frac{B}{2a_2} \int_0^{a_2} (a_2^2 - a^2) da = \\ &= \frac{B}{2a_2} \left(a_2^3 - \frac{1}{3} a_2^3 \right) = \\ &= \frac{B a_2^2}{3} \end{aligned}$$

$$e_{s2} = 4,44 \sim \pi \gamma a_2 B \left(b_2 + \frac{a_2}{3} \right)$$

γa_2 è il numero delle spire di II, adunque n_2 e B è proporzionale ad $n_2 i_2 = X_2$. Possiamo adunque in generale scrivere

$$B = k \frac{X_2}{l}$$

dove k è un coefficiente dato dall'esperienza. Abbiamo quindi

$$\begin{aligned} e_{s2} &= 4,44 \sim n_2 X_2 k \left(b_2 + \frac{a_2}{3} \right) \frac{\pi}{l} \\ e_2 &= 4,44 \sim n_2 N \\ \frac{e_{s2}}{e_2} &= k \frac{X_2}{N} \left(b_2 + \frac{a_2}{3} \right) \frac{\pi}{l} \dots \dots \dots (15) \end{aligned}$$

Nello stesso modo si trova

$$\frac{e_{s1}}{e_1} = k \frac{X_1}{N} \left(b_1 + \frac{a_1}{3} \right) \frac{\pi}{l} \dots \dots \dots (16)$$

Siccome ora i vettori della corrente e quindi anche quelli delle eccitazioni X_1 ed X_2 hanno molto approssimativamente la stessa direzione, avremo la totale caduta di tensione percentuale, facendo la somma delle due perdite

$$100 \frac{e_s}{e} = 100 \left(\frac{e_{s1}}{e_1} + \frac{e_{s2}}{e_2} \right).$$

Se sopra ogni braccio si ha solo un rocchetto primario ed uno secondario, allora approssimativamente X_1 può supporre uguale ad X_2 e possiamo dire che la totale caduta induttiva di tensione riferita alla parte secondaria è proporzionale a $k \frac{X_2}{N} \frac{\pi}{l}$. Espresso in percento si ha

$$100 \frac{e_{s2}}{e_2} = 100 k \frac{X_2}{N} \left(b_1 + b_2 + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \frac{\pi}{l}.$$

Se chiamiamo a la profondità media dell'avvolgimento, sicchè

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2},$$

allora l'espressione tra parentesi può essere anche espressa in questo modo

$$\left(b + \frac{2}{3} a\right) = 2 \left(\frac{b}{2} + \frac{a}{3}\right)$$

$$100 \frac{e_{s2}}{e_2} = 200 k \frac{X_2}{N} \left(\frac{b}{2} + \frac{a}{3}\right) \frac{\pi}{l}.$$

Da esperienze su trasformatori in funzione (1) ho trovato, che 200 k ha approssimativamente il valore di 0,2, ossia k ha il valore 10^{-3} . Per X_2 devesi quindi porre il valore effettivo in unità di 10^3 e per N il valore massimo in unità di 10^6 .

Risulta adunque, che la totale caduta induttiva di tensione, riferita alla parte secondaria, in percento è uguale a

$$0,2 \frac{X_2}{N} \left(\frac{b}{2} + \frac{a}{3}\right) \frac{\pi}{l} \dots \dots \dots (17)$$

La determinazione della totale caduta induttiva di tensione riferita al circuito secondario può farsi quindi supponendo trasportata la superficie di separazione in b , poichè nella formola entra solo la somma di b_1 e b_2 . Se vogliamo determinare la caduta di tensione per ciascuno degli avvolgimenti, allora la posizione della superficie di giunzione non è indifferente. Più sopra abbiamo considerato i due casi estremi:

$$b_2 = 2b_1 = \frac{2}{3} b; e_{s1} \text{ risulta troppo piccolo, } e_{s2} \text{ troppo grande}$$

$$b_2 = b_1 = \frac{1}{2} b; e_{s1} \text{ risulta troppo grande, } e_{s2} \text{ troppo piccolo}$$

ed abbiamo detto che supporremo quale più probabile il valore medio di quelli corrispondenti a questi due casi.

I valori medi sono

$$b_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{2} + \frac{2b}{3}\right) = 0,58 b$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{2} + \frac{b}{3}\right) = 0,42 b.$$

Allora per rocchetti cilindrici sarà

$$100 \frac{e_{s1}}{e_1} = \frac{X_1}{N} (0,42 b + 0,33 a_1) \frac{\pi}{l} 10^{-1} \dots \dots \dots (18)$$

$$100 \frac{e_{s2}}{e_2} = \frac{X_2}{N} (0,58 b + 0,33 a_2) \frac{\pi}{l} 10^{-1} \dots \dots \dots (19)$$

Nel trasformatore preso in considerazione nel capitolo 5° è $\pi = 63$, $l = 41$, $a_2 = 1,4$, $b = 0,9$, $a_1 = 2,4$, $n_1 = 1365$, $n_2 = 70$. Sopra ogni

(1) Vedi *E. T. Z.* 1898, fascicolo 15.

braccio il numero delle spire è quindi la metà, e per 11 k. v. a. di carico è $i_1 = 5,66$ e $i_2 = 110$. Sarà adunque $X_1 = 3,85$ e $X_2 = 3,85$. Il flusso di forza del campo principale è $130 \times 5063 = N = 0,66$.

Noi abbiamo adunque la totale caduta di tensione percentuale dalla formola (17)

$$\% = 0,2 \frac{3,85}{0,66} (0,45 + 0,63) \frac{63}{41} = 1,9 \%$$

Dalle formole (18) e (19) si determinano le singole cadute di tensione:

Primario	1 %
Secondario	0,9 %

Se noi ora carichiamo lo stesso trasformatore fino a 15 k. v. a. allora questi valori aumentano nel rapporto di 110:150. Diventano cioè: primaria 1,37 %, secondaria 1,23 % ed in totale 2,6 %. E questo è ancora praticamente permesso. Se però si vuole per un determinato scopo rendere ancora più piccola la caduta di tensione per 15 k. v. a. di carico, si potranno fare ulteriori suddivisioni.

Noi faremo la suddivisione non nei rocchetti secondari, ma nei primari, per poter avere il filo sottile all'esterno. Questo ha lo scopo pratico di poter ottenere l'esatto rapporto di trasformazione, togliendo o aggiungendo spire di filo, il che non è difficile per i fili sottili dei rocchetti primari. Noi quindi porremo vicino al ferro una metà dei rocchetti primari, poi tutti i rocchetti secondari e sopra questi ultimi l'altra metà dei rocchetti primari. Allora X_1 nella formola (18) avrà il valore

$$\frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1365 \cdot 7,44 = 2,7.$$

Quantunque il rocchetto secondario non sia diviso in due parti come il primario nel calcolo di X_2 dobbiamo introdurre la metà del numero delle spire, cioè

$$X_2 = \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 70 \cdot 150 = 2,62$$

perchè esso genera campo di dispersione da tutti e due i lati. Risulta quindi la caduta di tensione percentuale per

i rocchetti primari interni	0,58 %
i rocchetti secondari	0,56 %
i rocchetti primari esterni	0,54 %
Totale	1,68 %

Nel calcolare questi valori si è tenuto anche conto della differenza di perimetro degli spazi frapposti tra i diversi rocchetti. Suddividendo così i rocchetti si ottiene quindi una diminuzione della caduta di potenziale da 2,6 a 1,68 %.

Per *rocchetti a disco* si può calcolare la caduta di tensione induttiva nello stesso modo. La superficie di separazione per i rocchetti frapposti passa certamente per le metà dello spazio b , sicchè:

$$b_1 = b_2 = \frac{b}{2}.$$

Per la posizione reciproca simmetrica dei dischi e per il fatto che, come indica la figura 53, la curva del campo passa attraverso allo zero nel piano mediano di ciascun disco, si deve solo introdurre nel calcolo

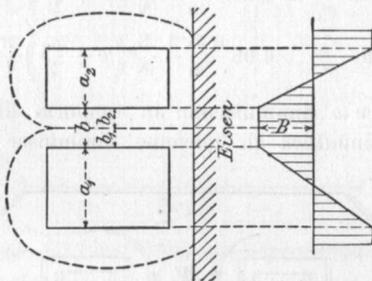


Fig. 53.

Eisen = ferro.

la metà dello spessore dei dischi e per l'eccitazione la metà del numero di ampère-spire. Il coefficiente prima trovato

$$h = 10^{-3}$$

vale anche per questo caso. Noi abbiamo dunque dalla formola (15) per ciascuno dei dischi secondari intermedi

$$\frac{e_{s2}}{e_2} = h \frac{X_2}{2N} \left(b + \frac{a_2}{3} \right) \frac{\pi}{l}$$

oppure

$$100 \frac{e_{s2}}{e_2} = 0,05 \frac{X_2}{N} \left(b + \frac{a_2}{3} \right) \frac{\pi}{l},$$

dove X_2 indica le ampère-spire effettive di tutto il disco. Analogamente per ciascun disco primario intermedio abbiamo dalla formola (16)

$$100 \frac{e_{s1}}{e_1} = 0,05 \frac{X_1}{N} \left(b + \frac{a_1}{3} \right) \frac{\pi}{l}.$$

Per i dischi terminali, siccome da una parte si ha il ferro, la dispersione è approssimativamente doppia. Se u_1 è il numero dei dischi primari ed u_2 il numero di quelli secondari, sopra uno dei bracci, allora può essere o $u_1 = u_2 = u$ oppure $u_1 = u_2 \pm 1$. Nel primo caso ad un'estremità si trova un disco primario ed all'altra un disco secondario, contro

il ferro. Nel secondo caso da ambedue le parti si hanno vicino al ferro dischi dello stesso avvolgimento. Quando il numero dei dischi nei due avvolgimenti è uguale, si deve usare per ciascuno dei $(u - 1)$ rocchetti il coefficiente 0,05 e per un rocchetto il coefficiente 0,1. Il valore percentuale della dispersione per tutto il gruppo di u dischi è quindi il prodotto del valore percentuale corrispondente ad un solo disco per il fattore $\frac{u+1}{u}$. Si ha quindi per l'intero trasformatore con avvolgimento a dischi:

$$100 \frac{e_{s1}}{e_1} = 0,05 \frac{u+1}{u} \frac{X_1}{N} \left(b + \frac{a_1}{3} \right) \frac{\pi}{l} \quad \dots \quad (20)$$

$$100 \frac{e_{s2}}{e} = 0,05 \frac{u+1}{u} \frac{X_2}{N} \left(b + \frac{a_2}{3} \right) \frac{\pi}{l} \quad \dots \quad (21)$$

Siccome ora X e a diminuiscono in rapporto diretto colle suddivisioni u , la caduta induttiva di tensione diminuisce proporzionalmente

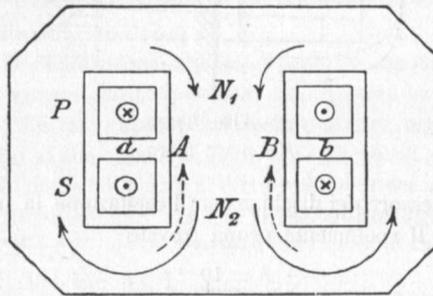


Fig. 54.

al quadrato delle suddivisioni (1). La caduta totale induttiva di tensione $100 \left(\frac{e_{s1}}{e_1} + \frac{e_{s2}}{e_2} \right)$ non deve superare nei buoni trasformatori il 3%. Questo limite può ottenersi senza difficoltà con una suddivisione opportuna.

Le formole per $\frac{e_s}{e}$ furono ricavate per trasformatori a nucleo; ma è senz'altro chiaro, che anche nei trasformatori a mantello la disposizione dei rocchetti deve avere azione analoga nella dispersione. La fig. 54 indica la sezione fatta parallelamente alle lamiere attraverso ad un trasformatore a mantello avente una disposizione poco opportuna dei rocchetti; poco opportuna, perchè tutte le spire primarie costituiscono un unico rocchetto P e le secondarie un unico rocchetto S, ed inoltre la lunghezza del fascio di linee di dispersione nell'aria in a e b è molto corta. Alquanto

(1) Vedi Capitolo primo, *Dispersione magnetica*.

migliore è la disposizione in fig. 55. Quivi si hanno pure solamente due rocchetti, ma lo spazio di dispersione tra di loro è più stretto e più lungo. Se il rocchetto P in un determinato istante genera le linee di forza N_1 nella direzione della freccia, il rocchetto S genera le linee di forza punteggiate AB in direzione opposta, ed il campo N_2 assorbito da S è più

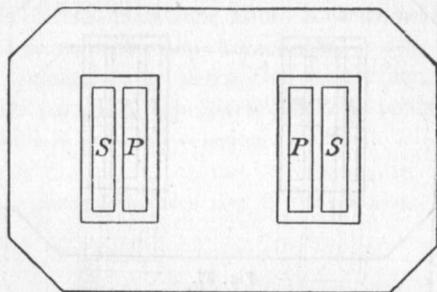


Fig. 55.

piccolo di quello assorbito da P. Noi abbiamo quindi l'identico fatto che si manifesta nei trasformatori a nucleo e lo stesso calcolo deve essere applicabile a questo caso per la ricerca della f. e. m. del campo di dispersione. È solamente dubbio se valgono anche qui gli stessi coefficienti.

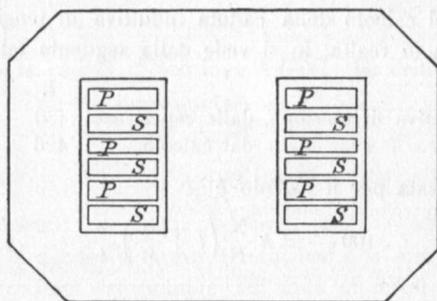


Fig. 56.

Per diminuire la dispersione nei trasformatori a mantello useremo lo stesso mezzo, ossia la suddivisione. La disposizione in fig. 56 è quindi migliore di quella in fig. 55 e quella in fig. 57 ancora migliore. Per determinare l'azione della suddivisione il Möllinger (1) ha fatto esperienze con un trasformatore a mantello da 8 kw. provvisto di diversi avvolgimenti, ed ha determinato sperimentalmente per ciascuno di questi la caduta di tensione. Da queste esperienze e dalle formole (15) e (16) ho

(1) E. T. Z. 1898, fascicolo 15.

determinato il coefficiente k e trovato, che la caduta percentuale di tensione che risulta dalle formole coincide approssimativamente con quella risultante dalle esperienze quando si ponga in un avvolgimento a dischi per i rocchetti intermedi $k = 0,05$ e per quelli terminali $k = 0,15$.

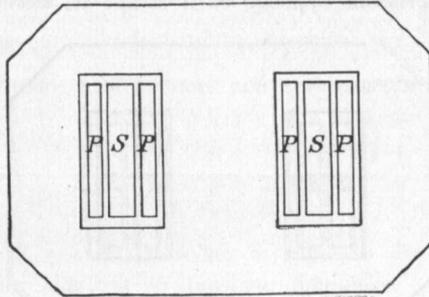


Fig. 57.

Il Möllinger ha fatto le sue ricerche su tre avvolgimenti, tutti collo stesso rapporto di trasformazione 1 : 1. Questi avvolgimenti erano:

- I. Un rocchetto primario ed uno secondario.
- II. Due rocchetti primari ed uno secondario.
- III. Due rocchetti primari e due secondari.

Che i risultati del calcolo della caduta induttiva di tensione coincidano con quanto si ha in realtà, lo si vede dalla seguente tabella:

	I.	II.	III.
Caduta induttiva di tensione, dalle esperienze	430	196	32,7
» » » » dal calcolo	426	191	34

La formola usata per il calcolo è

$$100 \frac{e_s}{e} = k \frac{X}{N} \left(b + \frac{a}{3} \right) \frac{\pi}{l} \dots \dots \dots (22)$$

Dove k è

Per rocchetti intermedi	0,05
» » terminali	0,15

X indica l'eccitazione effettiva in un rocchetto, espresso in unità di 1000 ampère-spire.

N indica il campo utile, espresso in unità di 10^3 linee di forza.

Azione della frequenza sulla caduta induttiva di tensione. — Nel paragrafo precedente si è visto, che la caduta induttiva di tensione è inversamente proporzionale al campo principale N . Immaginiamo ora che uno stesso trasformatore sia percorso una volta con corrente ad alta

frequenza, un'altra con corrente a bassa frequenza. Se nei due casi la tensione ai morsetti e la potenza devono rimanere eguali, l'induzione e quindi anche N deve essere maggiore quando la frequenza è più bassa. La caduta induttiva di tensione per bassa frequenza è quindi minore di quella per alta frequenza. Quale azione abbia la frequenza in questo rapporto ce lo dirà il seguente ragionamento. Supponiamo che non si sia mutato il metodo di raffreddamento; allora il calore nel rame è lo stesso perchè l'intensità di corrente non è cambiata, e deve quindi rimanere eguale anche la temperatura nel ferro. Ora quest'ultima, trascurando l'effetto delle correnti parassite, è proporzionale alla potenza 1,6 di B .

Abbiamo quindi le seguenti relazioni:

Per uguale f. e. m. è $\propto B = \text{costante}$.
 » » riscaldamento è $\propto B^{1.6} = \text{costante}$.

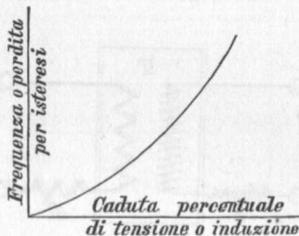


Fig. 58.

Se A indica la caduta di tensione e C, C_1, C_0 delle costanti si ha

$$A = \frac{C}{B},$$

$$A = C_1 \propto \frac{1}{B^{1.6}}$$

$$C_0 A^{1.6} = \propto$$

In figura 9 le ascisse indicano l'induzione e le ordinate la perdita di energia. Per variazioni determinate dell'unità di misura la stessa curva, come indica la figura 58, può essere perciò usata per rappresentare la relazione tra frequenza e caduta di tensione. Sia, ad esempio, per $\propto = 50$ e $B = 5000$ la caduta 3 %, allora ricaviamo dalla figura 9, usando le ordinate date in figura 58, i seguenti valori:

$\propto = 25$	30	40	50	60	70
$A \%$ = 1,95	2,22	2,58	3	3,3	3,6

Si vede da questa serie di numeri, che una bassa frequenza è conveniente in rapporto alla caduta di tensione. In questo riguardo è pure conveniente una forte induzione, poichè per esse nella formola di $\frac{e_s}{e}$ il

flusso di forza aumenta e l'eccitazione diminuisce. È raccomandabile quindi, non solo per la miglior utilizzazione del materiale, ma anche per riguardo ad una piccola caduta di tensione, di usare nei grandi trasformatori una intensa magnetizzazione con speciali mezzi di raffreddamento.

Determinazione grafica delle grandezze riguardanti il lavoro. —

Noi abbiamo ora ricavato tutti i dati necessari per rappresentare graficamente a mezzo di un diagramma vettoriale il regime di lavoro di un trasformatore. Anzitutto progettiamo il diagramma, componendo fra loro delle f. e. m. e non dei *campi*; la rappresentazione del diagramma del lavoro per mezzo della composizione di *campi* verrà trattata nel prossimo capitolo. Una prima disposizione, secondo la quale supponiamo di avere un campo comune ai due rocchetti e sommiamo nel diagramma le f. e. m., può essere rappresentata dalla figura 59. Noi considereremo l'azione della

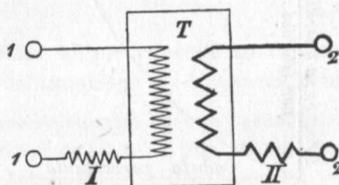


Fig. 59.

dispersione come se, oltre al campo comune N dei due rocchetti, si avessero altri due campi, dei quali l'uno assorbito dalle spire primarie e l'altro dalle secondarie. Immaginiamo sostituito al trasformatore reale, con dispersione magnetica, uno ideale privo di dispersione, ma nelle cui condutture si abbiano inseriti dei rocchetti d'induzione I e II , le cui f. e. m. autoindotte hanno i valori dati dalle formole (20) e (21). Il numero delle spire di ciascuno dei rocchetti d'induzione deve essere uguale al numero di suddivisioni del corrispondente rocchetto principale.

Le f. e. m. che ora agiscono sui morsetti 2 2 dei rocchetti secondari sono le seguenti:

- 1) Il campo principale N induce la f. e. m. e_2
- 2) Il campo di dispersione N_{s_2} induce la f. e. m. e_{s_2}
- 3) La resistenza ohmica produce una perdita di f. e. m. e_{w_2} .

In egual modo sui morsetti primari agiscono le f. e. m. corrispondenti e_1 , e_{s_1} ed e_{w_1} . La tensione secondaria ai morsetti e_{k_2} è la risultante o somma vettoriale di e_2 , e_{s_2} e e_{w_2} , e la tensione generata nei rocchetti primari è la risultante o la somma vettoriale di e_1 , e_{s_1} ed e_{w_1} . Per non avere troppa differenza nella lunghezza dei vettori del diagramma vetto-

riale è opportuno supporre un ugual numero di spire nei rocchetti secondari e primari, vale a dire che il rapporto di trasformazione sia uguale ad uno. Questa supposizione è permessa in quanto, senza cambiare nulla nella costruzione, è possibile inserire in parallelo un determinato numero di spire del rocchetto ad alta tensione. Se ad esempio il rapporto di trasformazione è in realtà 2000 a 100, e il rocchetto ad alta tensione ha 800 spire, si può supporre di inserire tra loro in parallelo gruppi di 20 spire, in modo che nel rocchetto primario passi una corrente venti volte più intensa, la cui tensione non sia più 2000, ma soli 100 volt. Con ciò

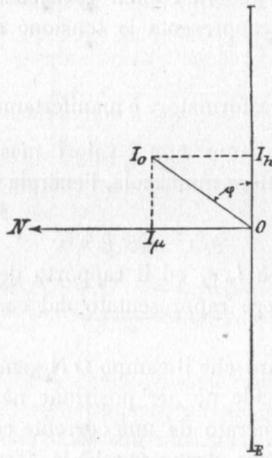


Fig. 60.

nulla viene mutato sia nel riscaldamento, sia nella corrente percentuale a vuoto, sia nel rendimento, ecc., ma otterremo il vantaggio che le f. e. m. nei due rocchetti sono state portate allo stesso ordine di grandezza, vale a dire che esse nel diagramma vettoriale possono comodamente essere disegnate nella stessa scala. Si deve però osservare, che l'intensità di corrente sale nel rapporto stesso col quale fu ridotto il numero delle spire, e la resistenza diminuisce in rapporto quadrato.

Consideriamo ora il caso più semplice, vale a dire un trasformatore a vuoto. Sia in figura 60, OI_0 la corrente a vuoto quale risulta dal calcolo e sia riportata nel diagramma in una qualunque scala. Questa corrente si può scomporre in due componenti I_μ ed I_h le quali, come prima fu indicato, possono venir calcolate. Riportiamo queste correnti nella stessa scala. Il nucleo viene magnetizzato colla corrente I_μ ed il flusso magnetico viene rappresentato in ogni istante dalla proiezione oriz-

zontale di un vettore ON , il quale cade nella stessa direzione del vettore $I\mu$. Nell'istante considerato nel diagramma la proiezione è nulla e la f. e. m. generata nel rocchetto primario ha un massimo, vale a dire $2\pi \frac{\infty}{100} N n_1$ volt. Siccome questa f. e. m. cerca impedire l'aumento dell'intensità della corrente, deve essere portata nel diagramma verso il basso. Sia questa indicata dal tratto OE misurato in una scala qualsiasi. La tensione della corrente di regime in questo istante deve essere uguale alla precedente e diretta in senso opposto. Si ha così il vettore OE_1 che rappresenta la tensione ai morsetti primari. Rimane così trascurata la piccolissima caduta di tensione e_{w1} , generata dalla resistenza dei rocchetti primari. Nello stesso modo OE rappresenta la tensione ai morsetti dei rocchetti secondari.

L'energia guidata al trasformatore è manifestamente $\frac{I_h E_1}{2} = \frac{I_o \cos \varphi E_1}{2}$.

Se nel diagramma riportiamo non i valori massimi, ma gli effettivi ed indichiamo questi con lettere minuscole, l'energia guidata al trasformatore a vuoto è

$$i_h e_1 = \cos \varphi i_o e_1.$$

L'energia apparente è $i_o e_1$ ed il rapporto dell'energia reale a quella apparente, ossia il numero rappresentato dal $\cos \varphi$, si chiama *fattore di potenza*.

È necessario osservare che il campo ON generato dalla corrente magnetizzante i_o non coincide nè per posizione nè per grandezza con quel campo, che verrebbe generato da una corrente costante di intensità i_o . A primo sguardo questo pare strano perchè la corrente i_o attraversa effettivamente il rocchetto primario, e si dovrebbe quindi credere, che essa debba magnetizzare il ferro proporzionalmente alle sue ampère-spire. Ma questo non succede. La magnetizzazione è più debole di quella che corrisponderebbe a questa eccitazione, e riguardo al tempo segue la corrente.

Il ritardo è dato nel diagramma dall'angolo $\frac{\pi}{2} - \varphi$. Questa apparente contraddizione si può chiarire facilmente nel seguente modo. La perdita a vuoto viene prodotta dalle correnti parassite e dall'isteresi. Se noi avessimo del ferro, che si comportasse ottimamente in rapporto alla magnetizzazione, e non desse luogo a correnti parassite, sarebbe $i_h = 0$ e $i\mu = i_o$. Il fattore di potenza sarebbe quindi uguale a zero. Supponiamo ora di avere realmente un tale trasformatore, potremmo allora peggiorare le sue condizioni coll'aggiunta di un terzo avvolgimento di data resistenza, chiuso in corto circuito, in modo che il suo diagramma del lavoro coincida con quello del trasformatore praticamente costruibile. Dobbiamo solo costrurre in modo tale questo terzo avvolgimento, che l'energia da esso

trasformata in calore sia uguale alla perdita d'energia del trasformatore non perfetto (cioè con isteresi e correnti parassite). Ora le correnti in questo terzo avvolgimento chiuso in corto circuito diminuiscono l'azione magnetizzante della corrente di regime, perchè esse in genere sono rivolte in senso contrario, e quindi ne viene, che non agisce quale magnetizzante tutta la corrente a vuoto, ma solo quella componente che precede di un quarto di periodo la corrente che scorre nel terzo rocchetto. Siccome siamo in grado, con una ben appropriata scelta del numero delle spire e della resistenza del terzo rocchetto, di rendere la perdita d'energia in

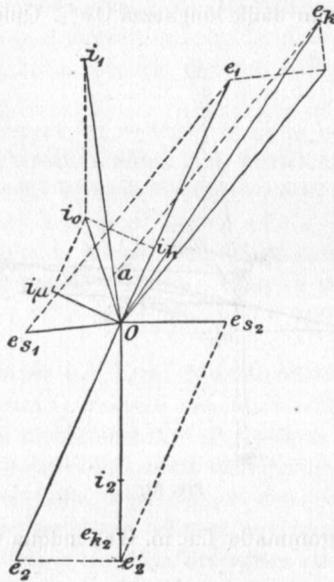


Fig. 61.

quest'ultimo uguale alla perdita nel trasformatore reale, essa può venire considerata come un equivalente magnetico ed elettrico della imperfezione del trasformatore effettivo; con altre parole, noi possiamo immaginare, che tutte le perdite consistano in correnti elettriche agenti nel nucleo di ferro in senso smagnetizzante. Con ciò resta chiarita l'apparente contraddizione, come è detto più sopra.

Se il trasformatore lavora sotto carico, allora l'eccitazione formantesi nel rocchetto secondario deve essere compensata da una corrispondente eccitazione nel primario; cioè la corrente primaria deve in tal caso essere maggiore. Conserveremo anche ora la supposizione fatta prima, che il numero delle spire sia uguale nei due rocchetti e supporremo anche che

il carico sia costituito da lampadine ad incandescenza, sicchè nel circuito secondario non vi sia spostamento di fase.

Il tratto $O i_2$ (figura 61) rappresenta la corrente secondaria, $O e_{h_2}$ la tensione ai morsetti secondari, $e_{h_2} e'_{h_2}$ la perdita di tensione e_{w_2} per resistenza ohmica; allora $O e'_{h_2}$ deve essere la risultante della f. e. m. $O e_2$ generata nel rocchetto dal campo N e della f. e. m. di autoinduzione e_{s_2} , che viene generata dal campo di dispersione N_{s_2} . Il vettore di quest'ultima deve avere una posizione tale che e_{s_2} tenda ad impedire la diminuzione di i_2 ; deve quindi essere disegnato in senso orizzontale verso destra. Il valore calcolato per e_{s_2} secondo l'uguaglianza (21) sia dato nella scala delle tensioni dalla lunghezza $O e_{s_2}$. Quindi si determina col

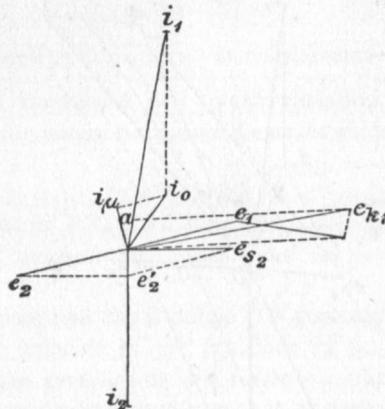


Fig. 62.

disegno del parallelogramma la f. e. m. $O e_2$ indotta nel rocchetto secondario.

La corrente di magnetizzazione i_μ deve essere normale ad $O e_2$, mentre la corrente i_h necessaria a compensare la perdita giace sul prolungamento di questa linea. Troviamo di qui $O i_0$, vettore della corrente a vuoto, e componendolo con $O i_2$ si ottiene il vettore della corrente primaria $O i_1$. La f. e. m. di autoinduzione della corrente primaria deve essere perpendicolare a $O i_1$ e seguirlo nella fase. Il suo vettore deve quindi venire portato da O verso sinistra. Si avrà così il tratto $O e_{s_1}$. La tensione primaria ai morsetti deve avere tre componenti. L'una, uguale e diretta in senso opposto alla f. e. m. $O e_2$ generata dal campo N , vale a dire $O e_1$; la seconda, uguale e diretta in senso opposto alla f. e. m. di autoinduzione $O e_{s_1}$, e la terza destinata a compensare la perdita ohmica di tensione $O a$ nel rocchetto primario. Troviamo quindi col poligono funicolare il vettore $O e_{h_1}$ della tensione ai morsetti primari. Come si vede facilmente

e_{k1} deve essere più grande di e_{k2} , cioè si trova sotto carico e produce una caduta di tensione, tanto più grande quanto più lo sono le f. e. m. e_{s1} e e_{s2} e quanto più grande è la resistenza ohmica dei rocchetti. Il diagramma (fig. 61) è stato disegnato in modo da rendere più chiara la costruzione.

È interessante studiare il caso in cui la tensione ai morsetti secondari è zero. Questo si verifica chiudendo il trasformatore in corto circuito attraverso ad un amperometro. Supponiamo di regolare la tensione ai morsetti primari, in modo che questo amperometro indichi esattamente la corrente normale a pieno carico e costruiamo nuovamente il diagramma vettoriale; otterremo allora la figura 62. Le indicazioni sono le stesse della figura 61. Il diagramma indica, che quantunque la tensione ai morsetti secondari sia zero, ai morsetti primari si deve avere una tensione espressa da e_{k1} , affinché la corrente di pieno carico possa attraversare i rocchetti secondari.

Se la resistenza ohmica dei rocchetti è molto piccola, come avviene sempre nei buoni trasformatori, allora la e_2 verrà a giacere ad un dipresso sulla orizzontale ed i_1 sulla verticale. I punti e_1 e e_{k1} si avvicinano anche all'orizzontale ed e_{k1} diventa quasi uguale ad $e_{s2} + e_{s1}$. Se ora, come avviene il più delle volte, la disposizione dei due rocchetti è simmetrica si può supporre senza grande errore $e_{s2} = e_{s1}$ e si ricava quindi

$$e_{k1} = 2e_{s2}.$$

Si può dunque trovare la f. e. m. di autoinduzione nei due rocchetti con una facile esperienza. I morsetti secondari vengono chiusi in corto circuito mediante un amperometro, e si regola la tensione ai morsetti primari in modo, che il carico in ampère nel circuito secondario raggiunga il suo valore normale. Colla supposizione non sempre giusta, che la perdita di tensione per resistenza ohmica sia trascurabile rispetto alla perdita di tensione induttiva, la metà del valore della tensione misurata ai morsetti primari sarà uguale alla f. e. m. di autoinduzione nei rocchetti primari. La f. e. m. di autoinduzione nei rocchetti secondari è uguale a questo stesso valore, diviso per il rapporto di trasformazione. Supponiamo ad esempio, che in un trasformatore di 10 kw., con una trasformazione da 2000 a 100 volt, la sopraindicata esperienza stabilisca, che è necessaria una tensione primaria di 100 volt, per avere a corto circuito una corrente totale di regime di 100 ampère nel secondario, allora sarebbe $e_{s1} = 50$ ed $e_{s2} = 2,5$ volt. In un diagramma vettoriale disegnato per questo trasformatore (fig. 61) sarebbe adunque da portarsi per e_{s2} secondo la corrispondente unità di misura 2,5 volt.

Se la perdita di tensione ohmica non può essere trascurata rispetto a quella induttiva, si trova $2e_{s1}$ quale cateto di un triangolo rettangolo, di cui l'altro cateto è $2e_{w1}$ e la cui ipotenusa è la tensione osservata.

L'esperienza può anche servire per determinare il coefficiente di autoinduzione dei rocchetti. Sia L_2 il coefficiente di autoinduzione dei rocchetti secondari, sarà allora

$$e_{s_2} = 2\pi \omega i_2 L_2,$$

se quindi ad esempio è $\omega = 50$, sarebbe

$$2,5 = 6,28 \times 50 \times 100 \times L_2$$

donde

$$L_2 = 0,795 \times 10^{-4} \text{ henry.}$$

Per il rocchetto primario è $e_{s_1} = 50$ ed $i = 5$, quindi

$$L_1 = 400 L_2$$

$$L_1 = 0,0316 \text{ henry.}$$

Si deve però osservare, che questi valori valgono solo alla condizione, che il rocchetto secondario sia chiuso in corto circuito.

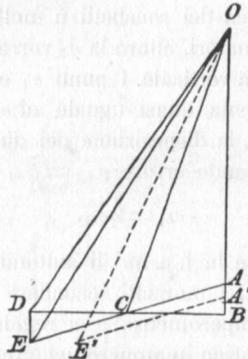


Fig. 63.

Quando si abbia determinata nel modo sopraindicato, mediante il calcolo o con una tale esperienza, la f. e. m. d'autoinduzione generata per dispersione nei due rocchetti, si può trovare facilmente, mediante il diagramma vettoriale, la caduta della tensione ai morsetti secondari per qualunque carico. Per questo si può, senza notevole errore, usare un metodo approssimato, che consiste nel supporre che le correnti primaria e secondaria sieno precisamente in opposizione di fase. Questa supposizione è permessa, perchè la corrente a vuoto è solo una piccola parte di quella di regime, e quindi lo spostamento di fase della corrente primaria, dovuto alla corrente a vuoto, è affatto trascurabile. Con questa premessa si semplifica di molto il diagramma. Nella figura 63 OA rappresenta la tensione ai morsetti secondari, AB la perdita di tensione ohmica e_{res} nei rocchetti secondari, BC = e_{s_2} la f. e. m. d'autoinduzione nei rocchetti secondari, quindi OC = e_2 la f. e. m. indotta nei rocchetti secondari. Se noi pensiamo che il rapporto di trasformazione sia ridotto

ad 1, allora OC è anche la f. e. m. generata nel rocchetto primario, $CD = CB$ la f. e. m. d'autoinduzione nel rocchetto primario e $DE = AB$ rappresenta con sufficiente approssimazione la caduta ohmica di tensione nel rocchetto primario supposto, che l'aumento di temperatura nei due rocchetti sia uguale, come avviene in una buona costruzione. La linea ACE è adunque una retta ed il suo angolo di inclinazione è uguale per tutti i carichi. Ad esempio, per un piccolo carico, corrispondente alla caduta ohmica di tensione BA' , sarebbe OA' la tensione ai morsetti secondari ed OE' la tensione ai rocchetti primari, mentre la lunghezza della linea $A'E'$ sta con AE nello stesso rapporto di $A'B$ ad AB . In altre parole: la lunghezza della linea $A'E'$ è direttamente proporzionale al carico. Se ora si pensa che il tratto AB è all'incirca una centesima

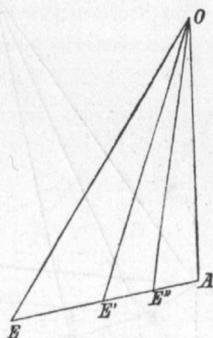


Fig. 64.

parte di AO , si vede che senza grave errore si può supporre la linea punteggiata $A'E'$ coincidente colla linea piena AE e quest'ultima linea può essere adoperata per portarvi direttamente i diversi carichi.

Prepariamo una scala per gli ampère, le cui divisioni siano tali, che il tratto AE corrisponda al pieno carico di 100 ampère (fig. 64). Allora le tensioni ai morsetti sono date dai tratti OA e OE misurati nella scala delle tensioni. Per metà carico è $AE' = \frac{1}{2} AE$, e la tensione ai morsetti primari è OE' ; per un quarto di carico è $AE'' = \frac{1}{4} AE$, e la tensione ai morsetti primari è OE'' . La tensione ai morsetti secondari rimane uguale in tutti i casi, vale a dire OA . Noi possiamo adunque con questa costruzione determinare come deve variare la tensione ai morsetti primari a seconda del carico, perchè la tensione ai morsetti secondari rimanga costante. Questo però non avviene generalmente in pratica. In genere rimane costante la tensione ai morsetti primari e si tratta solo di determinare come varia la tensione ai morsetti secondari al variare del carico. Anche questo problema si può risolvere graficamente con una piccola modificazione alla precedente costruzione.

Fu detto più sopra, che ai diversi carichi corrispondono i triangoli $O A E$, $O A' E'$ ecc., i quali hanno tutti un angolo uguale (ossia l'angolo ottuso in A, A' , figura 63). Il lato più lungo di questi triangoli rappresenta la tensione primaria, quello più corto il carico.

Ora noi possiamo immaginare questi triangoli ingranditi o rimpiccioliti in modo, che il lato più lungo sia in tutti uguale; allora i punti E si troveranno su di una circonferenza con centro in O e raggio uguale alla tensione costante ai morsetti primari nella scala scelta. Sia $O E$ (fig. 65) il vettore di questa tensione e $O A$ quello della tensione secondaria corrispondente a pieno carico. $E A$ rappresenta allora come in figura 64 il carico. Per un carico minore sia il vettore primario $O E'$, E' deve giacere

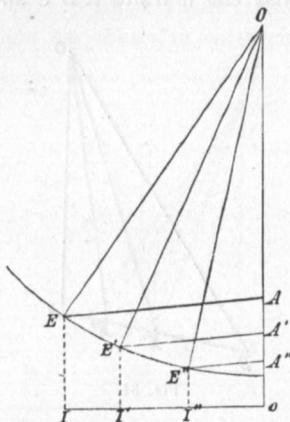


Fig. 65.

sulla circonferenza sopraindicata, se la tensione primaria è costante. Se per E' tracciamo una retta parallela ad $E A$, fino a che taglia la verticale, allora ricaviamo il punto A' e $O A'$ è la tensione ai morsetti secondari, che corrisponde al carico $A' E'$. Per semplicità possiamo portare il carico anche sopra una orizzontale a partire da o . Al carico $o I$ corrisponde allora il vettore primario $O E$, al carico $o I'$ il vettore primario $O E'$, ecc. I valori corrispondenti della tensione secondaria sono poi $O A, O A'$, ecc. Se noi usiamo questa costruzione per un trasformatore, per il quale vi sia in ciascuno dei due rocchetti a pieno carico una perdita di tensione ohmica dell'1 ‰, e la f. e. m. di autoinduzione del 5 ‰, allora per ambedue i rocchetti assieme avremo una f. e. m. di autoinduzione di 10 v ed una perdita ohmica di tensione di 2 volt. L'inclinazione della linea $E A$ è quindi di 1 : 5. Se la tensione ai morsetti secondari a pieno carico deve essere di 100 volt, allora $O A$ deve essere riportato in figura = 100 nella scala dei volt. Il tratto $O E$ corrisponde al pieno carico; la sua proiezione $o I$

deve dunque rappresentare la corrente a pieno carico di 100 ampère. Se noi facciamo una scala per gli ampère, possiamo portare per ogni carico i punti corrispondenti I' su oI , e quindi a mezzo di verticali segnare i punti corrispondenti E' . Di qui tracciando linee parallele ad EA si ottengono i punti A' , che ci danno le tensioni secondarie.

Da questa costruzione fatta per il trasformatore con 5 % d'autoinduzione e 1 % di perdita ohmica di tensione in ciascun rocchetto, si ottengono i seguenti valori:

Carico in ampère	0	50	100	200
Tensione ai morsetti secondari	102,2	101,1	100	96

Si ha quindi una caduta di tensione di 2,2 volt dal funzionamento a vuoto a quello a pieno carico. Per un sovraccarico corrispondente al doppio del carico normale (che il trasformatore può ancora sopportare per breve tempo) la caduta di tensione aumenta ancora di 4 volt; essa importa cioè complessivamente 6,2 volt.

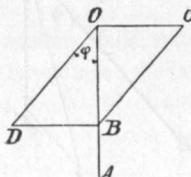


Fig. 66.

Rimane ancora da trattare il caso in cui il carico del trasformatore non consta di una resistenza priva di induzione, ma possiede una determinata autoinduzione. Questo avviene quando il trasformatore viene adoperato per l'alimentazione di lampade ad arco o a fornire l'energia ad un motore. Le lampade ad arco o il motore sviluppano, in causa della loro autoinduzione, una forza controelettromotrice, la cui fase è normale a quella della corrente e segue quest'ultima. La tensione ai morsetti secondari deve adunque avere una componente, che precede la corrente di 90° ed è uguale alla f. e. m. di autoinduzione nel circuito contenente gli apparecchi di consumo. Sia in figura 66 OA la corrente di regime e OB la componente della f. e. m. che produce lavoro, OC la forza controelettromotrice prodotta dall'autoinduzione. La tensione ai morsetti secondari del trasformatore deve adunque essere OD e deve precedere la corrente dell'angolo φ . $\cos \varphi$ è il fattore di potenza del motore o delle lampade ad arco, che vengono alimentate a mezzo del trasformatore. La componente della f. e. m. BD si chiama componente oziosa, perchè non produce alcun lavoro, quella OB invece si chiama componente attiva, perchè produce l'intero lavoro. Capita spesso il caso, che gli apparecchi di consumo sono in parte costituiti da resistenze ohmiche, ed in parte da resi-

stENZE con autoinduzione; così, ad esempio, in un impianto di illuminazione possono essere usate contemporaneamente lampade ad incandescenza e lampade ad arco. Se la tensione normale fosse di 100 volt si disporrebbero le lampade ad arco in serie di 2 o 3, le lampade ad incandescenza invece a 100 volt in parallelo. Nella figura 67 rappresenti OE il vettore della tensione ai morsetti secondari e $\cos \varphi$ il fattore di potenza delle lampade ad arco. Allora OA' è la componente della corrente necessaria all'alimentazione delle lampade ad arco. La componente necessaria all'alimentazione delle lampade ad incandescenza è $A'A$ e deve naturalmente essere parallela ad OE . La corrente totale è quindi OA ed il fattore di potenza di tutto l'impianto $\cos \psi$. Dalla figura appare chiaramente che $OA < OA' + A'A$; se noi dunque in ciascuna delle due derivazioni (alle lampade ad arco ed alle lampade ad incandescenza) poniamo

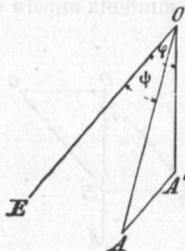


Fig. 67.

un amperometro, e nel circuito prima delle derivazioni ne poniamo un altro, allora quest'ultimo indicherà una intensità di corrente minore della somma delle letture degli altri due strumenti. Sia ad esempio il fattore di potenza delle lampade ad arco 71% ($\varphi = 45^\circ$) e si inseriscano 5 serie di lampade in parallelo, ciascuna delle quali consuma 15 ampère, allora è $OA' = 75$ ampère. Inseriamo ora tante lampade ad incandescenza in modo che $A'A = 32$ ampère. La corrente totale non è allora 107 ampère, ma solo 100 ampère, come si può facilmente vedere con una semplice costruzione. Il fattore di potenza di tutto l'impianto è $\cos \psi = 0,85$. Il nostro trasformatore è adunque caricato apparentemente di 10 kw, ma in realtà solamente di 8,5 kw. Questa diminuzione del carico è portata dallo spostamento di fase tra corrente e tensione, e resta solo a ricercare quale azione ha lo spostamento di fase sulla tensione ai morsetti secondari o sul rapporto delle tensioni ai morsetti primari e secondari. Sia in figura 68 OA la corrente totale e OB la tensione ai morsetti secondari. La f.e.m. indotta nel rocchetto secondario deve adunque avere una componente OB , una componente BB' destinata a vincere la resistenza ohmica ed una componente $B'C$ per vincere l'autoinduzione.

Noi abbiamo così il vettore OC per la f. e. m. indotta nel rocchetto secondario, la quale ridotta proporzionalmente al numero di spire vale anche per il rocchetto primario. La tensione ai morsetti primari deve anche avere tre componenti, vale a dire OC, CD per vincere la autoinduzione e DE per superare la resistenza ohmica. Si ricava così OE quale vettore della tensione

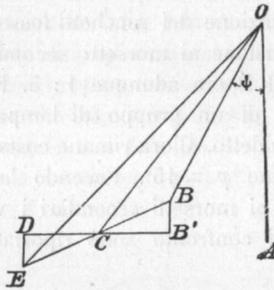


Fig. 68.

ai morsetti primari. L'inclinazione della retta BE è come prima data dal rapporto fra la resistenza e la reattanza dell'avvolgimento del trasformatore.

Per un carico misto, ψ varia col numero delle lampade ad arco e ad incandescenza inserite. Se però il carico è composto di sole lampade ad

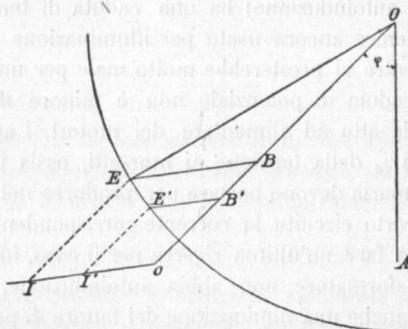


Fig. 69.

arco, che possono venire inserite o tolte dal circuito in gruppi di due o tre in serie, allora l'angolo di fase, che in questo caso indicheremo con ϕ , rimane costante per ogni intensità di corrente.

L'intensità di corrente può allora essere portata graficamente sopra una retta oI parallela a BE (fig. 69) e la scala per gli ampère deve essere scelta in modo tale che oI rappresenti il carico massimo. Se quindi si descrive con centro in O una circonferenza che passi per E, allora si può facilmente trovare la tensione ai morsetti secondari per ciascun carico I' . Si tiri $I'E'$ parallela ad IE ed $E'B'$ parallela ad EB; si otterrà allora OB'

quale tensione ai morsetti secondari corrispondente al carico I' . Da un confronto fra le figure 69 e 65 si può tosto riconoscere, che la caduta di tensione a carico induttivo a parità delle altre condizioni è più grande che per carico privo di induzione.

Più sopra venne dato un esempio sulla caduta di tensione di un trasformatore di 10 kw per un carico privo di induzione. In questo esempio si ammise che l'autoinduzione dei rocchetti fosse il 10 % e la resistenza ohmica il 2 % della tensione ai morsetti secondari a pieno carico. La inclinazione della retta EB era adunque 1 : 5. Facciamo ora lavorare lo stesso trasformatore su di un gruppo di lampade ad arco inserite nel modo indicato. Come s'è detto, allora rimane costante il fattore di potenza; sia esso 71 %, adunque $\varphi = 45^\circ$. Facendo la costruzione grafica si trovano per la tensione ai morsetti secondari i valori dati dalla seguente tabella. Per facilitare il confronto sono riportati anche i valori trovati prima:

Carico in ampère	0	50	100	200	
Tensione ai morsetti secondari	priva				
	d'induzione	102,2	101,1	100	96
	induttiva				
	$\cos \varphi = 71\%$	102,2	98,3	93,6	85

Per un carico privo di induzione questo trasformatore (2 % di resistenza e 10 % di autoinduzione) ha una caduta di tensione del 2,2 %; esso può quindi venire ancora usato per illuminazione con lampadine ad incandescenza, mentre si presterebbe molto male per un carico induttivo, perchè allora la caduta di potenziale non è minore dell'8,6 %. Perchè il trasformatore sia atto ad alimentare dei motori, l'autoinduzione non deve superare il 4 % della tensione ai morsetti, ossia il 4 % della tensione normale primaria devono bastare per produrre nel rocchetto secondario chiuso in corto circuito la corrente corrispondente al pieno carico.

Rimane ora da fare un'ultima ricerca per il caso, in cui l'apparecchio alimentato dal trasformatore non abbia autoinduzione, ma capacità. La capacità produce anche una diminuzione del fattore di potenza, e potrebbe credersi, che anche in questo caso la caduta di tensione sia tanto più grande, quanto più il fattore di potenza viene diminuito dalla capacità. Ma questo, come verrà facilmente dimostrato, non avviene. La capacità negli apparecchi alimentati dal trasformatore produce non un aumento, ma una diminuzione della caduta di potenziale, e la diminuzione può essere così forte, che la tensione ai morsetti secondari può essere maggiore sotto carico che a vuoto. Per fare questa ricerca il più semplicemente possibile, supponiamo dapprima, che l'apparecchio alimentato dai morsetti secondari del trasformatore possieda solamente resistenza ohmica e capacità, ma non autoinduzione. La capacità sia in derivazione sulla

resistenza. Se E è il valore massimo della tensione ai morsetti e K la capacità del condensatore in *farad*, allora il condensatore in un intero periodo verrà caricato e scaricato di una quantità di elettricità di KE coulomb, e precisamente la carica avviene alternativamente in senso positivo e negativo. Consideriamo l'istante in cui la f. e. m. ha raggiunto il suo valore massimo e comincia a diminuire. In questo istante il condensatore è completamente caricato dalla corrente, che fino a quel momento scorreva nel senso positivo. Il condensatore comincia allora a scaricarsi, e la corrente scorre in senso opposto, ossia negativo. La corrente adunque è nulla, quando la f. e. m. ha raggiunto il suo massimo, ed un istante dopo la corrente è già negativa, mentre la f. e. m. ha ancora un valore positivo, benchè più piccolo. La corrente precede adunque la f. e. m.

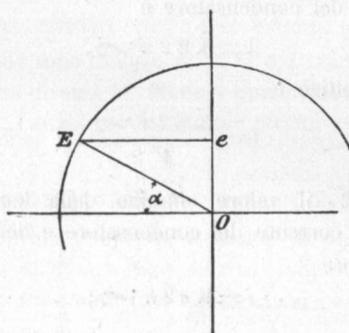


Fig. 70.

Sia in figura 70 E il vettore della f. e. m. nell'istante t , al quale corrisponde la posizione angolare α , ed e la tensione tra le piastre del condensatore. Trascorso lo spazio di tempo infinitesimo dt la tensione e è aumentata del valore $de = \frac{d}{dt} E \sin \alpha$ e la carica del condensatore pure si è accresciuta della quantità di elettricità $id t$, dove i è la corrente di carica, che ha agito durante il tempo dt sotto la tensione de . Abbiamo adunque:

$$i dt = K de$$

$$i = K \frac{de}{dt}$$

Il quoziente differenziale $\frac{de}{dt}$ si può determinare per una corrente sinusoidale colla uguaglianza $e = E \sin \alpha$.

Abbiamo anzitutto:

$$\frac{de}{dt} = E \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt}$$

e poichè $da = 2\pi \sim dt$, si ha:

$$\frac{de}{dt} = E 2\pi \sim \cos a$$

$$i = KE 2\pi \sim \cos a.$$

La corrente i del condensatore raggiunge il suo massimo per tutti i valori di a , per cui $\cos a = \pm 1$, adunque per $a = 0, \pi, 2\pi$, ecc. Essa è nulla per $a = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$, ecc. D'altra parte la tensione $e = E \sin a$ è massima per $a = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$, ecc. ed eguale a zero per $a = 0, \pi, 2\pi$, ecc.

Nel diagramma vettoriale la corrente del condensatore è quindi normale alla tensione e , come già fu indicato, precede quest'ultima. Il valore massimo della corrente del condensatore è

$$I = KE 2\pi \sim,$$

ed il suo valore effettivo è

$$i = \frac{KE 2\pi \sim}{\sqrt{2}}.$$

Ora è $e = E: \sqrt{2}$ il valore effettivo della tensione; quindi tra i valori effettivi della corrente del condensatore e della tensione ha luogo la seguente relazione:

$$i = Ke 2\pi \sim;$$

dove i è da porsi in ampère, e in volt e k in farad.

L'unità pratica di capacità non è però il farad, ma il microfarad (un milionesimo di farad) e riportando la capacità del condensatore in microfarad, il valore effettivo della corrente del condensatore è

$$i_k = Ke 2\pi \sim 10^{-6}, \dots \dots \dots (23)$$

dove al simbolo della corrente diamo l'indice k , per esprimere con ciò, che si tratta solo di quella componente della corrente totale, che scorre nel condensatore e non fa alcun lavoro. La componente attiva della corrente la cui fase coincide con quella della tensione verrà indicata

con $i_w = \frac{e}{W}$. La corrente totale che scorre nell'apparecchio è dunque

$$i = \sqrt{i_k^2 + i_w^2}.$$

Il diagramma vettoriale per un tale apparecchio è rappresentato dalla figura 71. Oe è il vettore della tensione effettiva, Oi_w quello della corrente attiva ed Oi_k quello della corrente del condensatore. Allora il vettore Oi dà la grandezza e la fase della corrente totale. Il diagramma vale naturalmente solo per il caso, in cui resistenza e capacità sono

inserite fra loro in parallelo, come è il caso, ad esempio, di un cavo concentrico unito con un'estremità ad un generatore e con l'altra ad un gruppo di lampade ad incandescenza. I due conduttori del cavo costituiscono le armature di un condensatore, caricato e scaricato dalla corrente i_k .

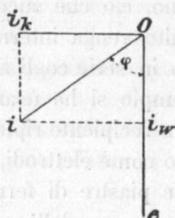


Fig. 71.

Se tutte le lampade sono escluse $i_w = 0$ e i coincide con i_k , $\varphi = 90^\circ$ ed il fattore di potenza diventa 0. Mano a mano che vengono inserite delle lampade aumenta i_w , l'angolo φ diventa più piccolo ed il fattore di potenza più grande.

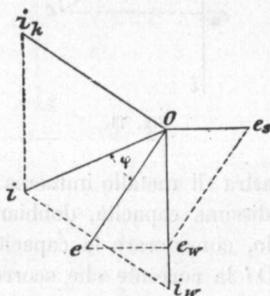


Fig. 72.

Se ora all'estremità del cavo non si hanno più lampadine ad incandescenza, ma lampade ad arco o motori, oltre alla resistenza ohmica si ha pure *autoinduzione*. La f. e. m. d'autoinduzione è $e_s = 2\pi \omega L i_w$, e la sua fase segue quella della corrente di 90° . La corrispondente componente della tensione ai morsetti deve adunque precederla di 90° . La componente attiva e_w ha la stessa fase della corrente. Nella figura 72 i_w è la corrente che scorre attraverso alla resistenza induttiva ed e_w la componente attiva della corrispondente f. e. m. La f. e. m. d'autoinduzione è e_s e quindi e la totale tensione ai morsetti.

Questa produce ora una corrente nel condensatore, che la precede di 90° ; sia i_k . La corrente fornita dal generatore (o trasformatore) deve adunque contenere le due componenti i_w e i_k . Noi la troveremo colla

costruzione del parallelogramma; il suo vettore sarà rappresentato in grandezza e posizione dalla linea Oi . È manifesto, che a seconda che prevale l'autoinduzione o la capacità, i precede o segue e . Nella figura si sono scelti i valori in modo, che la corrente precede la tensione.

Noi abbiamo supposto finora, che la capacità sia in derivazione sugli altri elementi dell'apparecchio, ciò che succede generalmente; può però anche avvenire, che il circuito venga interrotto dal condensatore, ossia che quest'ultimo sia inserito in serie cogli altri elementi dell'apparecchio. Una tale disposizione ad esempio si ha usando una resistenza liquida per la prova dei trasformatori. Un recipiente ripieno di acqua salata od acidula contenente piastre di piombo come elettrodi, oppure un recipiente di ferro con una soluzione alcalina e piastre di ferro come elettrodi, offrono un mezzo molto facile, per consumare dell'energia elettrica, e molte volte vengono usati nella prova dei trasformatori in luogo di resistenze solide.

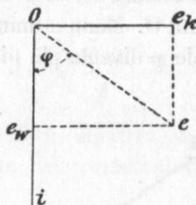


Fig. 73.

Ora è noto, che una piastra di metallo immersa in un liquido costituisce un condensatore di grandissima capacità, dobbiamo quindi oltre alla resistenza ohmica del liquido, considerare la capacità esistente ai due elettrodi. Sia in figura 73 Oi la corrente che scorre attraverso la resistenza liquida e Oe_K quella componente della f. e. m., che da sola è necessaria per vincere la resistenza ohmica.

La f. e. m. necessaria alla carica del condensatore in unità del sistema assoluto è $e_K = i : k 2\pi$ e segue la corrente di 90° . È quindi Oe la f. e. m. totale, che il trasformatore deve fornire agli elettrodi. È chiaro che anche in questo caso la corrente precede di un angolo φ la f. e. m. e che quindi il fattore di potenza della resistenza liquida è minore di 1.

Venne già indicato, come in base alle costanti elettriche si possa determinare lo spostamento di fase corrispondente ad ogni carico di un circuito. Se adunque sono dati la tensione ai morsetti del trasformatore e le costanti elettriche dell'apparecchio alimentato dal trasformatore, le condizioni di lavoro del trasformatore stesso sono completamente determinate. I diversi casi in cui la tensione ai morsetti precede la corrente vennero da noi già esaminati riguardo alla caduta di tensione; rimane

quindi solo da estendere la ricerca a quei casi, in cui la tensione segue la corrente, dove cioè l'angolo φ (fig. 69) è negativo. La costruzione allora usata può essere applicata senz'altro anche a questo caso. Noi abbiamo segnato come prima in figura 74 il vettore della corrente OA e la tensione ai morsetti secondari OB . La perdita ohmica di tensione nei rocchetti secondari sia BB' . Questa grandezza deve essere diretta nello stesso senso di OA . La f. e. m. di autoinduzione nel rocchetto secondario è $B'C$, quella nel rocchetto primario è CD , e la perdita ohmica di tensione nel rocchetto primario è DE . Quest'ultima è diretta, secondo quanto fu detto più sopra, ad un dipresso nel senso della corrente OA . Noi abbiamo così in OE la tensione, che deve agire ai morsetti primari, perchè dai morsetti secondari

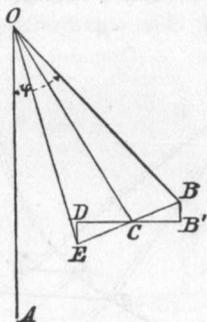


Fig. 74.

possa ricavarsi la corrente OA alla tensione OB . Siccome il tratto BB' , come pure quello $B'C$ sono proporzionali alla corrente, l'inclinazione della linea BE rimane la stessa per ciascun carico, e noi possiamo con una determinata scala per gli ampère determinare la intensità di corrente secondaria dalla lunghezza BE , oppure eseguendo il diagramma possiamo riportare BE corrispondentemente all'intensità della corrente. Supponiamo dapprima, che il fattore di potenza rimanga uguale per diverse intensità di corrente, allora si può determinare graficamente la tensione ai morsetti secondari colla costruzione della figura 69 per tutte le intensità di corrente.

Sia in figura 75 OA il vettore della corrente ed Oo la direzione del vettore della tensione ai morsetti secondari. L'inclinazione della linea oI , sulla quale noi misuriamo il carico in ampère, è data, come fu detto prima, dal rapporto fra la resistenza e la reattanza. Descriviamo con centro in O un arco di cerchio, il cui raggio sia uguale alla tensione ai morsetti primari. Tiriamo ora da I una parallela a oO , fino a che essa taglia la circonferenza, e dal punto d'incontro E una parallela ad Io , fino a tagliare la oO ; troviamo allora il punto B , la cui distanza da O dà la tensione ai morsetti secondari. Per una corrente più debole I' noi tro-

viamo nello stesso modo la tensione ai morsetti OB' . Come si vede dal diagramma la tensione ai morsetti cresce col carico.

Il trasformatore in tal caso si comporta adunque in modo del tutto diverso, che nel caso in cui il carico era induttivo. Noi avevamo trovato allora, che col carico si produce caduta di tensione, mentre qui si ha un aumento di tensione. Se noi avessimo scelto nel diagramma l'angolo φ più piccolo, allora, come subito si vede, anche questo aumento sarebbe stato minore e per un determinato valore di φ l'aumento scompare affatto. Sempre però la caduta di tensione, che si produce quando il trasformatore alimenta un circuito contenente una capacità, è minore che nel caso, in cui il circuito ha solo resistenza ohmica oppure resistenza e reattanza. Per questa ragione non è consigliabile di usare come carico

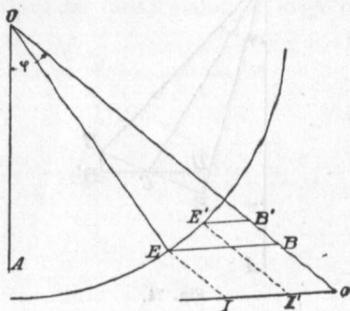


Fig. 75.

una resistenza a liquido allo scopo di determinare direttamente la caduta di tensione. La caduta di tensione trovata in questo modo è sempre troppo piccola e può in certi casi risultare anche negativa, vale a dire che sotto carico si trova erroneamente non una caduta, ma un aumento di tensione.

Noi abbiamo fino ad ora supposto, che sia costante l'angolo di precedenza o ritardo della corrente ed abbiamo determinato la tensione ai morsetti secondari come funzione del carico in ampère. Nella maggior parte dei casi, che si presentano in pratica, interessa soltanto di conoscere la tensione a pieno carico. La determinazione esatta della tensione per un carico minore del normale ha poco valore, perchè l'adoperabilità di un dato trasformatore deve giudicarsi dalla massima caduta di tensione possibile, che si ha appunto a pieno carico. Al contrario è molto utile determinare per ogni trasformatore, come la tensione cambia a pieno carico, quando esso viene usato all'alimentazione di apparecchi aventi diverso fattore di potenza; da questa determinazione dipende la decisione se esso trasformatore sia o no adoperabile per un determinato scopo.

prima detto, è senz'altro chiaro, che la lunghezza della linea Oo rappresenta il carico. Variando il carico il punto o si sposta, e si può eseguire la costruzione per ogni singolo valore del carico. Il diagramma a figura 76 può quindi essere usato per determinare la tensione secondaria di un dato trasformatore per tutti i casi possibili. La determinazione così condotta è da preferirsi ad una misura diretta per varie ragioni. In primo luogo una misura diretta può dare un risultato esatto soltanto, se l'apparecchio che utilizza la corrente dà luogo esattamente a quello spostamento di fase tra corrente e tensione, che si è ammesso. L'uso di un reostato a liquido non è quindi in genere da accettarsi. Resistenze composte da filo o da lampadine sono di uso incomodo ed il loro impiego nel laboratorio di una fabbrica per avere uno spostamento di fase esattamente determinato è ben difficile. A ciò si deve aggiungere, che per la prova di grandi trasformatori è necessario consumare una notevole quantità di energia. È quindi opportuno abbandonare la misura diretta della caduta di potenziale e adottare la determinazione indiretta coll'aiuto del diagramma della figura 76 (1).

Per chiarir meglio questo metodo di prova riepiloghiamo brevemente facendone un'applicazione pratica. Si abbia un trasformatore di 60 kw con un rapporto di trasformazione da 3000 a 200 volt. La resistenza del rocchetto primario sia 0,9 ohm; la perdita ohmica di tensione 18 volt. La resistenza del rocchetto secondario sia 0,0036 ohm; la perdita ohmica di tensione 1,08 v. Se noi ora pensiamo ridotto il numero delle spire del rocchetto primario a quello del secondario, la perdita ohmica di tensione risulta $18 \cdot \frac{200}{3000} = 1,20$ v. Noi abbiamo adunque per la determinazione del tratto So nella figura 76:

Perdita ohmica di tensione	primaria	. . . . .	1,20
»	»	»	»
»	»	»	»
»	»	»	»
	secondaria	. . . . .	1,08
	totale	. . . . .	2,28

Ora chiudiamo in corto circuito i morsetti secondari con un amperometro e guidiamo ai morsetti primari una corrente della giusta frequenza e di tensione tale, che l'amperometro indichi esattamente 300 ampère. La tensione spesa sia 255 v., che ridotta al numero di spire del secondario corrisponde ad una tensione di 17 v. Noi abbiamo adunque in figura 76 $Oo = 17$, $So = 2,28$ ed $OE = 200$. Abbiamo così tutti i dati per costruire il diagramma vettoriale in figura 77. OA è il vettore della corrente, riportiamo su di esso il fattore di potenza $\cos \varphi$. La posizione corrispondente del vettore della tensione è OE . Questo vettore misurato nella scala delle tensioni dà 187 volt e nello stesso modo si

(1) *E. T. Z.* 1895, fasc. 17, pag. 260.

procede per tutti gli altri valori di $\cos \varphi$. Questi ultimi sono dati dalla seguente tabella arrotondati di un volt.

Trasformatori di 60 kw 3000 : 200 volt a vuoto.

Tensione ai morsetti secondari per una corrente di 300 ampère e per valori diversi del fattore di potenza nell'apparecchio alimentato.

Fattore di potenza in %	100	99	90	80	70	60	50
Tensione per la corrente che precede	197	200	205	207	210	212	213
» » » » » ritarda	197	195	190	188	187	186	185

Questo trasformatore quindi alimentando soltanto lampadine ad incandescenza, avrebbe una caduta di tensione dell'1 $\frac{1}{2}$ %, mentre per l'alimentazione di motori o di lampade ad arco, dove il fattore di potenza

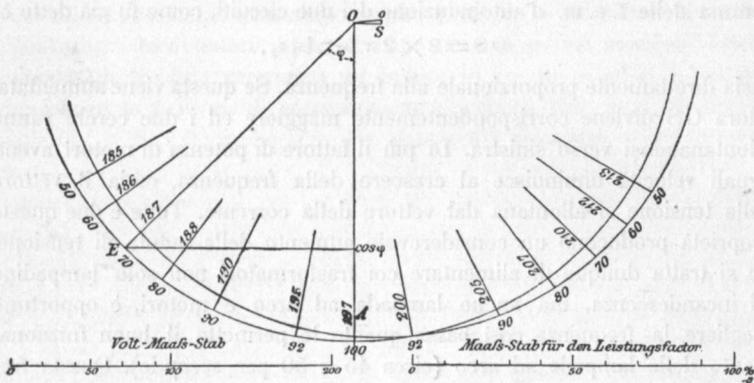


Fig. 77.

Volt-Maass-Stab = Scala delle tensioni.

Maass-Stab für den Leistungsfactor = Scala dei fattori di potenza.

ha il valore del 70 fino all'80 %, si avrebbe una caduta di circa il 6 %. Esso sarebbe quindi ottimo per lampade ad incandescenza, mentre per motori darebbe una caduta di tensione troppo grande.

Dal diagramma in figura 77 si possono ancora trarre alcune interessanti conclusioni che hanno anche valore pratico. Limitiamoci a considerare il caso in cui l'apparecchio alimentato abbia autoinduzione, ossia che porti un ritardo della corrente. In questo caso dobbiamo esaminare soltanto la metà a sinistra del diagramma.

Se fosse possibile costruire un trasformatore privo assolutamente di dispersione riuscirebbe $OS = O$ ed il punto o verrebbe a cadere esattamente sopra di O . Allora il cerchio interno si avvicina tanto più a quello esterno quanto più procediamo verso sinistra. La massima caduta di tensione risulta quindi per un carico privo di induzione. Questo caso non

è tuttavia praticamente possibile, perchè non si può evitare completamente l'autoinduzione, ma si può, specialmente per un piccolo numero di periodi, diminuirla di molto. Se la si diminuisce di tanto da rendere pressochè uguale reattanza e resistenza, allora l'angolo compreso da $O O$ OA è di circa 45° e la distanza tra i due cerchi si cambia di poco; cioè la caduta di tensione è quasi costante per ogni fattore di potenza.

Il più delle volte l'induttanza è notevolmente maggiore della resistenza, ed i due cerchi vanno fra di loro allontanandosi verso sinistra; la caduta di tensione diviene allora più grande, quando il fattore di potenza diminuisce. Se lo stesso trasformatore viene usato per lo stesso scopo una volta con bassa frequenza ed un'altra volta con alta frequenza, allora la caduta di tensione nel secondo caso sarà maggiore che nel primo. La somma delle f. e. m. d'autoinduzione dei due circuiti, come fu già detto è:

$$OS = 2 \times 2\pi \sim L_2 i_2,$$

ossia direttamente proporzionale alla frequenza. Se questa viene aumentata, allora OS diviene corrispondentemente maggiore ed i due cerchi vanno allontanandosi verso sinistra. Di più il fattore di potenza di motori aventi uguali velocità diminuisce al crescere della frequenza, ossia il vettore della tensione si allontana dal vettore della corrente. Tutte e due queste proprietà producono un considerevole aumento della caduta di tensione. Se si tratta dunque di alimentare coi trasformatori non solo lampadine ad incandescenza, ma anche lampade ad arco e motori, è opportuno scegliere la frequenza così bassa quanto lo permette il buon funzionamento delle lampade ad arco (circa 45 a 50 per secondo). Questa frequenza è opportuna anche in riguardo alla costruzione dei motori.

CAPITOLO SETTIMO

Teoria dell'eccitazione trasportata. — Applicazione del concetto dell'eccitazione trasportata ai trasformatori. — Uguaglianza dei coefficienti di trasporto. — Il diagramma circolare. — Trasformatori a corrente costante.

Teoria dell'eccitazione trasportata. — Nel parlare del diagramma del lavoro figura 61, abbiamo supposto, che il campo utile N sia generato dalla risultante X delle ampère-spire primarie e secondarie X_1 ed X_2 , calcolate coi loro valori massimi. Noi abbiamo quindi supposto, che il campo utile N esista veramente ed induca le f. e. m. e_1 ed e_2 , e che esistano pure le f. e. m. di autoinduzione, prodotte dai campi di dispersione N_{s_1} e N_{s_2} . Il campo utile era dato dalla relazione:

$$N = \frac{X}{\rho},$$

dove ρ indica la resistenza magnetica del campo utile senza considerare quella del campo di dispersione. Secondo questo modo di vedere vengono composte fra di loro nel diagramma del lavoro non campi ma f. e. m., e i campi di dispersione vengono considerati in certo qual modo esterni al trasformatore, come lo indica la figura 59. Questa supposizione conduce a risultati esatti, ma essa non è propriamente giusta, perchè i campi di dispersione veramente non sono posti al di fuori del trasformatore, ma si trovano per così dire frammisti al campo utile. Noi dobbiamo quindi, per non allontanarci dalla realtà, sommare fra di loro nel diagramma del lavoro non f. e. m., ma campi, e precisamente dobbiamo sommare fra di loro da una parte il campo utile immaginario N col campo di dispersione N_{s_2} per comporre l'effettivo campo secondario N_2 e dall'altra il campo utile immaginario N col campo di dispersione N_{s_1} per formare l'effettivo campo primario N_1 . Siccome ora tanto N_2 quanto N_1 accanto alle loro linee di forza comune hanno anche ciascuno le proprie linee di dispersione, la resistenza magnetica dei campi primario e secondario è alquanto minore di ρ . Sia S la resistenza magnetica del campo totale di dispersione. In questo fascio le linee di dispersione primarie e secondarie devono dividersi, sicchè per ciascun gruppo non va considerata che la metà della sezione del fascio. Se noi consideriamo separatamente i due fasci di linee di dispersione, la resistenza magnetica di ciascuno di essi è data da $2S$ e la resistenza magnetica ρ' dei campi effettivi N_2

e N_1 corrisponde per ciascuno alla inserzione in parallelo di ρ e $2S$. Noi abbiamo quindi

$$\rho' = \frac{\rho 2S}{\rho + 2S}$$

$$\rho' = \rho \frac{1}{\frac{\rho}{2S} + 1}$$

oppure, ponendo

$$n = \frac{1}{\frac{\rho}{2S} + 1}$$

si ha

$$\rho' = n \rho.$$

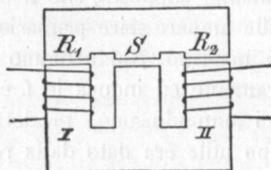


Fig. 78.

Si può ora vedere facilmente che n non è altro che un rapporto numerico minore di 1, il quale indica quanto della eccitazione prodotta da uno degli avvolgimenti viene trasportato nell'altro. Questo modo di vedere può essere chiamato *teoria dell'eccitazione trasportata*. Essa si può senz'altro ricavare, come vedremo in seguito, dal diagramma del lavoro; ma per meglio chiarire la cosa vogliamo studiarne gli effetti fisici con un esempio pratico. In figura 78 il nucleo in ferro sia avvolto da un rocchetto primario I e da uno secondario II. Supponiamo che il ferro non abbia resistenza, e che vi siano solo delle connesure di resistenza R_1 e R_2 , sicchè la resistenza magnetica del fascio di linee principali, non considerando la dispersione, sia espresso dalla

$$\rho = R_1 + R_2.$$

Noi supporremo ancora, che esista dispersione solo nella connesura di mezzo, la cui resistenza magnetica sia S . Tutte queste supposizioni non possono avverarsi in pratica, ma sono senz'altro accettabili, perchè ora non si tratta di dimostrare un principio, ma solo di chiarire un concetto precedentemente enunciato. Quando noi avremo esaminato questo concetto in un caso facile ed ipotetico, sarà possibile estenderlo senza difficoltà ai casi complicati e che si presentano veramente nella pratica.

Facciamo ora agire X_1 ampère-spire in I a mezzo di una corrente continua ed analogamente in II X_2 ampère-spire. Sia ancora $X_1 > X_2$ e la direzione della corrente sia tale, che il rocchetto I faccia agire il flusso

di forza nel senso delle sfere d'un orologio e che il rocchetto II faccia agire il suo flusso di forza nel senso opposto. Misuriamo le eccitazioni e il campo che agisce in R_2 . Ora allontaniamo i rocchetti e diamo al braccio II un avvolgimento primario ed uno secondario così intrecciati fra loro, che venga esclusa ogni dispersione.

Nel filo secondario facciamo ora di nuovo agire X_2 ampère-spire e nel filo primario un numero X'_1 tale di ampère-spire da produrre in R_2 un campo del valore di prima. X'_1 naturalmente è più piccolo di X_1 ed il rapporto fra i due valori

$$n_1 = \frac{X'_1}{X_1}$$

indica quanta dell'eccitazione del rocchetto primario nella prima disposizione a rocchetti separati viene trasportata nel rocchetto secondario. Noi possiamo anche immaginare l'esperienza condotta in modo inverso. Allora troveremmo il coefficiente

$$n_2 = \frac{X_2'}{X_2}$$

il quale indica quanta dell'eccitazione che agisce nel rocchetto secondario viene trasportata nel rocchetto primario.

Colla disposizione a rocchetti separati nel

Rocchetto I e resistenza R_1 agisce il campo N_1 ,
 » II » R_2 » » N_2 ,

ed in corrispondenza alla resistenza della connettura S agisce il campo N_s sicchè

$$N_1 = N_2 + N_s.$$

Se X è la pressione magnetica tra le parti superiore ed inferiore della carcassa, espressa in ampère-spire, avremo

$$\begin{aligned} N_1 R_1 &= X - X \\ N_2 R_2 &= X - X_2 \\ N_s S &= X \\ (N_1 - N_2) S &= X \\ \frac{X_1 - X}{R_1} - \frac{X - X_2}{R_2} &= \frac{X}{S} \\ (X_1 - X) R_2 S - (X - X_2) R_1 S &= X R_1 R_2. \end{aligned}$$

Quindi si ha

$$X = \frac{X_1 R_2 S + X_2 R_1 S}{R_1 R_2 + S(R_1 + R_2)}.$$

Sostituito questo valore nella uguaglianza per $N_2 R_2$ si ha:

$$N_2 = \frac{X_1 S - X_2 R_1 - X_2 S}{R_1 R_2 + S(R_1 + R_2)} \dots \dots \dots (24)$$

Immaginiamo ora che l'avvolgimento intrecciato sia portato sul braccio II e che questo braccio sia eccitato in modo che N_2 mantenga il valore dato dall'uguaglianza (24). L'eccitazione è $n_1 X_1 - X_2$. Siccome X_2 deve avere il valore di prima, $n_1 X_1$ e quindi anche il coefficiente di trasporto n_1 sono facilmente determinabili. La resistenza del fascio magnetico è composta di R_2 e delle resistenze inserite in parallelo R_1 ed S .

La condizione da cui ricaveremo il valore di n_1 è quindi la seguente:

$$N_2 = \frac{n_1 X_1 - X_2}{R_2 + \frac{R_1 S}{R_1 + S}}$$

ossia

$$N_2 = \frac{(n_1 X_1 - X_2) (R_1 + S)}{R_1 R_2 + S (R_1 + R_2)}$$

Questa uguaglianza unita alla (24) dà

$$(n_1 X_1 - X_2) (R_1 + S) = X_1 S - X_2 R_1 - X_2 S$$

$$n_1 = \frac{S}{R_1 + S}$$

Un calcolo analogo dà

$$n_2 = \frac{S}{R_2 + S}$$

In un trasformatore comune i rocchetti sono sempre disposti simmetricamente. Si ha quindi $R_1 = R_2$ e $R_1 + R_2 = \rho$. Ne viene che $n_1 = n_2 = n$, e

$$n = \frac{S}{\frac{\rho}{2} + S}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\rho}{2S} + 1} \quad \dots \dots \dots (25)$$

Questa è la stessa espressione, che abbiamo trovato prima per il coefficiente, che dà in qual rapporto viene diminuita la resistenza magnetica del campo utile di ciascun rocchetto per effetto dell'intreccio dei campi di dispersione.

L'espressione (25) può essere scritta sotto altra forma.

Se X_μ indica il valore effettivo di quella eccitazione, che è necessaria a vincere la resistenza magnetica ρ , allora abbiamo

$$N = \frac{X_\mu \sqrt{2}}{\rho}$$

Nello stesso modo è

$$N_{s1} = \frac{X_1 \sqrt{2}}{2S}$$

Sia $\varepsilon_1 = \frac{e_{s1}}{e_1}$ il fattore di dispersione per il circuito primario (nei trasfor-

matori ε_1 è una grandezza variabile da 0,01 a 0,03, ma nei motori asincroni è notevolmente maggiore), avremo quindi

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{N_{s1}}{N} \\ \varepsilon_1 &= \frac{\rho}{2S} \frac{X_1}{X_{\mu}} \\ \frac{\rho}{2S} &= \varepsilon_1 \frac{X_{\mu}}{X_1} \\ n &= \frac{1}{\varepsilon_1 \frac{X_{\mu}}{X_1} + 1} \dots \dots \dots (26) \end{aligned}$$

In questa espressione ε_1 è il fattore di dispersione primario, che può essere calcolato colla uguaglianza (20); X_{μ} è la componente effettiva oziosa dell'eccitazione che genera il campo N , e X_1 la eccitazione primaria effettiva. Nei buoni trasformatori è $\frac{X_{\mu}}{X_1}$ dell'ordine di grandezze fra 0,02 e 0,04. Prendiamo come valore medio 0,03 e come valore medio di ε_1 0,015, allora sarà:

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{0,03 \times 0,015 + 1} \\ n &= 0,99955. \end{aligned}$$

Adunque dell'eccitazione, che agisce sopra uno degli avvolgimenti, viene trasportata nell'altro il 99,955 % (1).

Applicazione del concetto dell'eccitazione trasportata ai trasformatori. — Dopo aver fissato le idee intorno all'eccitazione trasportata con la rappresentazione fisica data dalla figura 78, vogliamo applicare questo concetto al diagramma del lavoro di un trasformatore. Per evitare in questa applicazione considerazioni superflue, vogliamo anzitutto supporre, che il trasformatore non abbia perdite nè nel ferro, nè nel rame, e che non vi sia alcuno spostamento di fase nel circuito secondario esterno.

Il nucleo di ferro abbia però resistenza magnetica ed esista anche dispersione. Sia in figura 79 OE'_2 la tensione ai morsetti secondari e $e_{s2} = E'_2 E_2$ la f. e. m. d'autoinduzione nel rocchetto primario. Allora

(1) Un motore asincrono può essere considerato come un trasformatore, nel cui circuito secondario la potenza viene data parte elettricamente e parte meccanicamente. Abbia un tale motore il 30 % di corrente a vuoto e una dispersione primaria del 10 %. Allora sarà:

$$n = \frac{1}{0,1 \times 0,3 + 1} = 0,97087.$$

In questo motore quindi viene trasportato il 97,087 % dell'eccitazione del circuito primario nel secondario o viceversa.

il vettore del campo N comune ai due rocchetti deve essere normale a OE_2 . Il vettore di questo campo sia Ob . L'eccitazione secondaria, data dalla espressione $i_2 n_2 \sqrt{2}$, sia OC' . Per generare il campo Ob sia necessaria l'eccitazione OB' . Sarà quindi

$$\frac{OB'}{\rho} = Ob.$$

Affinchè ora si abbia la risultante OB' , occorre che agisca accanto alla componente secondaria OC' anche la primaria OD' . In questo modo si trova, come fu già indicato nel capitolo precedente, il vettore dell'eccitazione primaria OD' . Essendo i due triangoli OE'_2E_2 ed Oab simili,

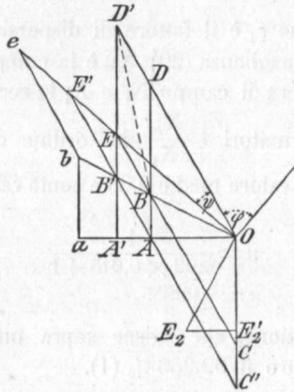


Fig. 79.

saranno $ab = N_{s_2}$ e $Oa = N_2$ i valori corrispondenti al campo assorbito dai rocchetti secondari, e che genera la tensione ai morsetti OE'_2 . Dalla somiglianza dei triangoli Oab e $OA'B'$ si ha pure

$$\frac{OA'}{\rho} = Oa.$$

Ora veramente la resistenza magnetica del campo N_2 non è ρ , ma

$$\rho' = \rho \left(\frac{1}{\frac{\rho}{2S} + 1} \right)$$

$$\rho' = n\rho$$

e quindi deve agire sul campo un'eccitazione minore di OA' , ossia nOA' , perchè si abbiano N_2 linee di forza. Questa eccitazione sia

$$OA = nOA'.$$

La posizione del punto A si determina tirando la retta $B'C'$. Il suo punto d'incontro con Oa è A .

Poichè

$$\frac{OA'}{OA} = \frac{OB'}{OB}$$

sarà anche

$$OB = n OB'$$

e

$$OC = n OC'$$

Se noi adunque determiniamo il punto C nel vettore della eccitazione OC' in modo tale, che $OC = n OC'$, allora OC è quella parte della eccitazione secondaria, che viene trasportata nel circuito primario. Essa si compone con la parte corrispondente dell'eccitazione primaria sulla risultante OB e abbiamo quindi le relazioni

$$\frac{OB}{\rho'} = N$$

$$\frac{OB'}{\rho} = N,$$

adunque $\frac{OB}{OB'} = \frac{\rho'}{\rho} = n$, come facilmente si può vedere dalla somiglianza dei due triangoli.

Estendendo queste considerazioni al circuito primario risulta che $be = Ns_1$ e $Oe = N_1$ corrispondono al campo assorbito dai rocchetti primari.

Noi abbiamo per analogia

$$\frac{OE'}{\rho} = Oe$$

$$\frac{OE}{\rho'} = Oe$$

$$\frac{OE}{OE'} = n$$

$$\frac{OD}{OD'} = \frac{OB}{OB'} = n.$$

Adunque se è noto il valore di n possiamo disegnare il diagramma di lavoro del trasformatore senza valerci della linea OE_2 . Portiamo in figura 80 $OC' = X_2 \sqrt{2}$ e $OC = n OC'$. L'intensità del campo N_2 corrispondente alla tensione ai morsetti secondari possiamo calcolarla colla formola (7). L'eccitazione corrispondente la calcoliamo con l'eguaglianza:

$$X_{\mu} \sqrt{2} = n \rho N_2$$

e la portiamo nell'unità di misura dell'eccitazione da O verso sinistra. Allora OA è la risultante di due eccitazioni, vale a dire della eccitazione totale secondaria e di quella parte dell'eccitazione primaria, che viene trasportata nel rocchetto secondario.

Noi dunque innalziamo in A una normale e facciamo $AD = OC'$, sicchè

$$OD = n X_1 \sqrt{2}.$$

Siccome

$$\frac{OC}{OC'} = n$$

troviamo $OD' = X_1 \sqrt{2}$ dalla

$$\frac{OD'}{OD} = \frac{OC'}{OC}.$$

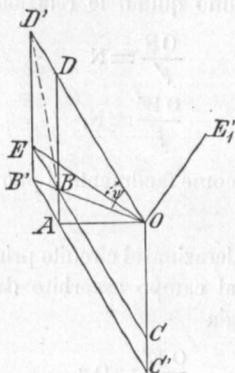


Fig. 80.

È quindi determinato il vettore dell'eccitazione primaria OD' in grandezza e posizione. Troveremo poi il vettore della tensione ai morsetti primari nel modo seguente: Tiriamo da C una parallela a $C'A$ e determiniamo il suo punto d'incontro E colla verticale in D' . Allora OE è l'eccitazione, che genera il campo N_1 , dunque

$$N_1 = \frac{OE}{n\rho}.$$

Il valore corrispondente della tensione ai morsetti primari si determina colla (7). Il vettore di questa tensione deve precedere quello del campo di 90° , e quindi è determinato in grandezza e posizione. Sia esso rappresentato dalla retta OE'_1 .

Nel disegnare la figura 79 abbiamo supposto, che nel circuito secondario esterno non vi sia alcun spostamento di fase. Vogliamo ora ammettere, che vi sia spostamento di fase e vedere quale forma assume in questo caso il diagramma del lavoro. Sia in figura 81 φ l'angolo di fase del cir-

cuito secondario esterno e OE'_2 la tensione ai morsetti secondari. Mantenendo la indicazione della figura 79 sarà

$$e_{s_2} = E'_2 E_2$$

$$N = Ob$$

$$N_2 = Oa$$

$$N_1 = Oe.$$

Oa è normale ad OE'_2 e Ob ad OE_2 . Siccome la resistenza magnetica è uguale nei tre campi, cioè $n\rho$, invece dei campi possiamo comporre le eccitazioni corrispondenti. Sarà quindi:

OA la risultante della eccitazione totale secondaria e di quella parte dell'eccitazione primaria che viene trasportata nel rocchetto secondario.

OE la risultante della eccitazione totale primaria e di quella parte dell'eccitazione secondaria che viene trasportata nel rocchetto primario.

OB la risultante di quelle parti della eccitazione primaria e secondaria che vengono trasportate scambievolmente.

Il vettore della tensione ai morsetti primari deve essere normale ad N_1 . Siccome la grandezza di questa tensione può essere calcolata colla uguaglianza (7), il suo vettore OE' è determinato in grandezza e posizione. Noi abbiamo però per semplicità supposto, che il rapporto di trasformazione del trasformatore sia 1:1, quindi in ambedue i circuiti si ha lo stesso rapporto fra le intensità dei campi e le f. e. m. Siccome nei due circuiti anche il rapporto fra intensità di corrente ed eccitazione è uguale, avrà luogo la relazione

$$\frac{OE'_2}{OA} = \frac{OE'_1}{OE}.$$

Noi potremo quindi con una conveniente unità di misura leggere le tensioni ai morsetti sui vettori delle eccitazioni OA ed OE .

Uguaglianza dei coefficienti di trasporto. — Noi abbiamo fino ad ora supposto che $n_1 = n_2 = n$ ed abbiamo motivato questa supposizione nella disposizione perfettamente simmetrica dei due avvolgimenti. Per un rapporto di trasformazione di 1:1 ed uguali dimensioni di tutti i rocchetti non può esservi invero alcuna ragione per ammettere l'ineguaglianza dei coefficienti n_1 e n_2 . Ma non si può ammettere senz'altro che questo avvenga nel caso che si abbia un rapporto di trasformazione diverso e per conseguenza disuguaglianza nei rocchetti primario e secondario. È veramente probabile, che, se l'avvolgimento primario trasporta molta della sua azione nel secondario, debba avvenire anche l'azione reciproca, ma non sarebbe certamente giustificato il dedurre da questa probabilità un'assoluta uguaglianza tra i due coefficienti. Per ben chiarire questa questione faremo le seguenti considerazioni.

Nelle figure 79 ed 81 abbiamo supposto l'uguaglianza dei coefficienti. Per coefficienti disuguali il diagramma avrebbe un altro aspetto; ossia i punti CBE non giacerebbero sopra una stessa retta, ma in una linea spezzata in B. Se noi ora potremo provare, che per una proprietà fisica la linea CBE deve essere una retta, ne seguirà, che per questa stessa proprietà non può sussistere disuguaglianza nei coefficienti. La ragione per la quale CBE non può essere che una retta è semplicemente quella che in un trasformatore senza perdite (ed i due diagrammi si intendono appunto per un tale trasformatore) la potenza ad esso guidata deve essere esattamente uguale a quella da esso ricavata. Nella figura 79 a cagione della proporzionalità di OE e della tensione ai morsetti primari,

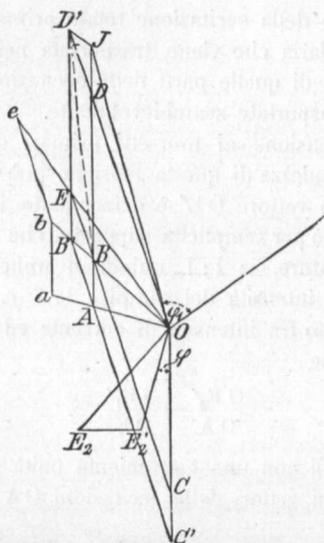


Fig. 81.

la potenza guidata al trasformatore è proporzionale al prodotto di OE, OD' e $\cos \varphi$. Siccome $\cos \varphi = \sin \psi$, possiamo scrivere per la potenza P_1 guidata l'espressione

$$P_1 = K \times OE \times OD' \sin \psi,$$

dove K è un coefficiente, che dipende dalle unità di misura e dai dati di costruzione, ma che ha naturalmente lo stesso valore per ambidue gli avvolgimenti. Ora OE $\sin \psi$ non è altro che l'altezza del triangolo ODE' e la potenza primaria viene quindi data dalla superficie del triangolo OED' usando una conveniente unità di superficie.

Nello stesso modo la potenza secondaria è data dalla superficie del triangolo OAC'. Viene ora la domanda, se questi due triangoli abbiano

la stessa superficie. E questo è proprio il caso. Supponiamo che E sia portato in B, allora sarà

$$\Delta O D' E = \Delta O D' B$$

$$\Delta O D' B = \frac{1}{n} \Delta O D B$$

$$\Delta O D B = \Delta B C O$$

$$\Delta B C O = n \Delta A C' O$$

$$\Delta A C' O = \frac{1}{n} \Delta B C O$$

$$\Delta A C' O = \frac{1}{n} \Delta O D B$$

$$\Delta A C' O = \Delta O D' B$$

$$\Delta A C' O = \Delta O D' E,$$

il che prova l'uguaglianza delle due potenze. Questa dimostrazione invece cade se il diagramma è disegnato colla supposizione, che i coefficienti n_1 ed n_2 non sieno uguali. Un'analoga considerazione si può applicare alla figura 81. Noi abbiamo qui come prima:

$$P_1 = K \cdot O D' \times O E \cos \varphi_1$$

e la potenza primaria è data dalle superficie del triangolo $O D' E$ quando si scelga opportunamente l'unità di misura. Immaginiamo ora che il vertice E di questo triangolo sia spostato parallelamente alla base $O D'$, allora la superficie non cambia. Avremo quindi:

$$\Delta O D' E = \Delta O D' B.$$

Ora tiriamo $D' J$ parallela a $B' B$. Consideriamo $O B$ come base e spostiamo il vertice D' parallelamente ad essa; allora la superficie pure non cambia. La potenza primaria è quindi data dalla superficie del triangolo $O J B$, e questa è uguale alla superficie del triangolo $O D A$. Ora è $A D = O C'$ e $O D = A C'$. La potenza primaria è dunque anche data dalla superficie del triangolo $O C' A$. La potenza secondaria è:

$$P_2 = K \times O C' \times O A \sin (90 + \varphi).$$

Ma $O A \sin (90 + \varphi)$ non è altro che l'altezza del vertice A del triangolo $O A C'$ sulla base $O C'$. Usando l'unità di misura di prima si ha quindi, che la superficie del triangolo $O C' A$ è anche uguale alla potenza secondaria.

Noi abbiamo così dimostrata l'uguaglianza delle potenze primaria e secondaria. La dimostrazione è riuscita, perchè siamo partiti dalla supposizione, che i punti $E B C$ siano sopra una retta e che i punti $B' A C'$ giacciano sopra una retta parallela alla prima. Ma questa supposizione è solo giusta nel caso che $n_1 = n_2$; non facendo questa ipotesi la dimostrazione non riesce. Siccome però la potenza primaria deve essere uguale

alla secondaria, ne viene che tra i coefficienti di trasporto non può esservi altra relazione che l'uguaglianza.

Il diagramma circolare. — Conosciuti lo spostamento di fase, il carico del circuito secondario ed il coefficiente di trasporto n , si può determinare graficamente a mezzo del diagramma del lavoro in figura 81 tanto la tensione quanto la corrente primaria ed il suo spostamento di fase φ_1 . Questa determinazione può farsi naturalmente anche per una serie di carichi secondari e colla supposizione della costanza dello spostamento di fase e della tensione ai morsetti, ottenendo così una

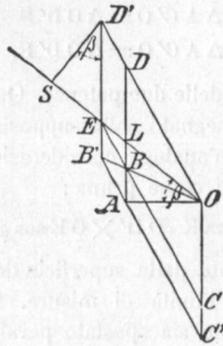


Fig. 82.

serie di valori corrispondenti di i_2 , i_1 , φ_1 ed e_1' . Praticamente nei trasformatori la tensione ai morsetti primari è in genere costante, e non è quindi ammissibile la supposizione, che la tensione ai morsetti secondari rimanga costante per qualunque condizione di carico, ed essa assume effettivamente valori diversi a seconda del carico e dello spostamento di fase. Un metodo per trovare graficamente la tensione ai morsetti secondari venne già indicato nel capitolo precedente, questo metodo però non dà la corrente primaria. Per determinare quest'ultima, e contemporaneamente la tensione ai morsetti secondari, possiamo far uso del così detto *diagramma circolare*, il quale fu dato per la prima volta dall'Heyland (1). Supponiamo che il trasformatore non abbia perdita propria, e che nel circuito secondario esterno non vi sia alcuno spostamento di fase. Il diagramma del lavoro avrà quindi la forma data dalla figura 80. Questo diagramma con una piccola aggiunta venne ripetuto in figura 82. Indichi come prima OC' a seconda delle unità di misura la corrente o

(1) E. T. Z., 1894, fasc. 41.

l'eccitazione secondaria, e OC quella parte dell'eccitazione secondaria, che viene trasportata nel rocchetto primario. Sarà adunque:

$$n = \frac{OC}{OC'}$$

Analogamente OD' è l'eccitazione primaria totale e OD quella parte di essa, che viene trasportata nel rocchetto secondario.

$$n = \frac{OD}{OD'}$$

Si prolunghi OE e si abbassi su di essa la perpendicolare D'S, allora, come facilmente si può vedere,

$$\sphericalangle ED'S = \sphericalangle LOA = \beta$$

$$\text{sen } \beta = \frac{AL}{OL}$$

$$\text{sen } \beta = \frac{AD - DL}{OL}$$

$$AD = OC', \quad DL = n D'E, \quad D'E = n OC', \quad OL = n OE.$$

$$\text{sen } \beta = \frac{OC' - n^2 OC'}{n OE}$$

$$\text{sen } \beta = \frac{OC' (1 - n^2)}{n OE}$$

$$\text{sen } \beta = \frac{i_2 (1 - n^2)}{n OE}$$

$$n i_2 = \frac{n^2}{1 - n^2} OE \text{ sen } \beta.$$

Ora è $\frac{n^2}{1 - n^2}$ un numero incognito maggiore di 1, quindi $\left(\frac{n^2}{1 - n^2}\right) OE$ una lunghezza, che indicheremo con d . Possiamo quindi anche scrivere:

$$n i_2 = d \text{ sen } \beta \dots \dots \dots (27)$$

Siccome $n i_2$ è un'intensità di corrente (ossia $OC' = D'E$), che va misurata coll'unità degli ampère, la lunghezza d deve essere anche considerata come una intensità di corrente, e precisamente essa è il più grande valore che possa raggiungere $n i_2$. Il massimo valore dell'intensità di corrente secondaria viene raggiunta quando si chiudono in corto circuito i morsetti secondari, mantenendo costante la tensione ai morsetti primari. Noi abbiamo supposto che OD rappresenti a seconda dell'unità di misura tanto l'eccitazione primaria quanto la corrente primaria. Se il rapporto di trasformazione è 1:1, potremo usare la stessa unità per la parte secondaria del trasformatore. Sarà quindi:

$$D'E = n i_2$$

la parte della corrente secondaria trasportata nel circuito primario. Se però scegliamo un'unità di misura per il circuito secondario, le cui suddivisioni stiano nel rapporto di $n:1$ a quelle dell'unità di misura per il circuito primario, potremo con questa unità di misura leggere direttamente in $D'E$ la corrente secondaria ed in questa nuova scala d dà senz'altro la corrente secondaria di corto circuito.

L'espressione (27) è l'equazione di una circonferenza. Facciamo in figura 83:

$$EF = d = OE \left(\frac{n^2}{1 - n^2} \right),$$

allora è $ED = d \operatorname{sen} \beta$ e i punti D' giacciono sul semicerchio descritto sul diametro EF . Allora sarà (misurando tutti i vettori della corrente nelle unità di misura del circuito primario):

$$OD' = i_1 \quad \text{e} \quad ED' = n i_2.$$

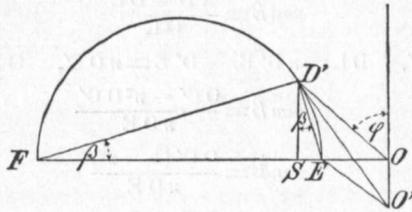


Fig. 83.

Il vettore della tensione ai morsetti primari secondo la figura 80 è normale ad OE , sia questa la normale passante per O . Lo spostamento di fase primario è quindi dato dall'angolo φ . Se il carico viene diminuito, D' si avvicina ad E e lo spostamento di fase diventa maggiore. A vuoto la corrente secondaria è zero e quindi ED' infinitamente piccolo, ossia il punto D' coincide con E , nel qual caso $\varphi = 90^\circ$. Se ora il carico gradatamente cresce, D' si avvanza sul mezzocerchio e φ diminuisce fino a che viene ad avere il valore minimo in quella posizione per la quale OD' è tangente al cerchio. A partire da questo punto φ aumenta di nuovo, fino a che a corto circuito, quando cioè D' coincide con F , sarà di nuovo 90° . È chiaro che, misurato colla unità di misura del circuito primario:

$$EF = n \times \text{corrente di corto circuito.}$$

Questo vale però soltanto nell'ipotesi che il trasformatore non abbia alcuna perdita propria. In realtà la corrente a corto circuito è alquanto minore.

Il diagramma circolare dà quindi per ciascun carico $i_2 = \frac{1}{n} ED'$ la

corrispondente corrente primaria $i_1 = OD'$ e lo spostamento di fase primario φ . A vuoto l'intensità di corrente primaria è:

$$i_\mu = 0 \text{ E.}$$

Per trovare la tensione ai morsetti secondari (la primaria è supposta costante) faremo le seguenti considerazioni.

La potenza fornita e quella ricavata devono essere uguali, perchè abbiamo supposto che il trasformatore non abbia perdite proprie. Sarà quindi:

$$i_1 e_1 \cos \varphi = i_2 e_2.$$

Secondo la nostra premessa non vi è spostamento di fase nel circuito secondario esterno. Poichè $i_1 = OD'$ e $i_2 = \frac{1}{n} ED'$, si avrà anche:

$$e_1 OD' \cos \varphi = e_2 \frac{ED'}{n}$$

$$e_1 SD' = e_2 \frac{ED'}{n} \qquad e_2 = e_1 n \frac{SD'}{ED'}$$

Siccome $\frac{SD'}{ED'} = \cos \beta$, sarà anche

$$e_2 = e_1 n \cos \beta.$$

A vuoto è $\beta = 0$ e la tensione ai morsetti secondari ha il valore $e_1 n$, supposto il rapporto di trasformazione uguale a 1:1. Se il rapporto di trasformazione invece è $n_1 : n_2$ la tensione ai morsetti secondari a vuoto è:

$$e_2' = \frac{n_2}{n_1} e_1 n$$

e sotto carico:

$$e_2 = e_2' \cos \beta.$$

Quanto più grande è il carico, tanto più grande diventa ED' e β , e tanto più piccola la tensione ai morsetti secondari. Se ora determiniamo un'unità di misura per i volt, suddivisa in modo che:

$$FE = e_2',$$

potremo leggere direttamente su FD' la tensione ai morsetti secondari. Sarà:

$$e_2 = FD'.$$

Siccome non esiste caduta di tensione per resistenza ohmica (il trasformatore non ha perdite proprie), ED' misurata nella scala dei volt, deve rappresentare la caduta induttiva di tensione, riferita al circuito secondario, cioè:

$$e_s = ED'.$$

La figura 83 corrisponde alla figura 76, quando in essa si faccia $\varphi = 0$ e $S_o = 0$. FD' in figura 83 corrisponde al tratto OB_3 della figura 76.

Fino ad ora abbiamo supposto, che il trasformatore non abbia perdite proprie. La corrente a vuoto era quindi uguale alla corrente di magnetizzazione. Ma veramente in pratica si hanno sempre delle perdite nel ferro, e la corrente a vuoto ha quindi una componente attiva e normale alla corrente di magnetizzazione OE . Il suo vettore sia OO' (fig. 83). Allora $O'E$ è il vettore della corrente a vuoto ed $O'D'$ quello della corrente primaria corrispondente ad un carico secondario $i_2 = \frac{1}{n}ED'$. Per tenere quindi conto delle perdite nel ferro, è sufficiente misurare la corrente primaria a partire da O' anzichè da O .

Il diagramma è esagerato riguardo alla dispersione, per rendere più chiara la costruzione. I buoni trasformatori hanno poca dispersione ed il rapporto di EF a OE è molto grande, perchè è molto grande il rapporto $\frac{n^2}{1 - n_2}$. Abbiamo visto che n è molto prossimo all'unità. Scriviamo quindi:

$$n = 1 - \lambda,$$

allora è:

$$\begin{aligned} \frac{EF}{OE} &= \frac{(1 - \lambda)^2}{1 - (1 - \lambda)^2} \\ &= \frac{1 - 2\lambda + \lambda^2}{2\lambda - \lambda^2}. \end{aligned}$$

Poichè λ è un numero molto piccolo (dell'ordine di grandezza 0,0005) λ^2 è trascurabile rispetto a 2λ e questo è trascurabile rispetto ad 1. Possiamo quindi scrivere:

$$EF = \frac{1}{2\lambda} OE.$$

Per disegnare il diagramma circolare per un trasformatore, procederemo nel modo seguente. Determiniamo la corrente di magnetizzazione i_μ , che è la componente oziosa della corrente a vuoto. Determiniamo quindi la componente attiva i_h della corrente a vuoto e portiamo queste due grandezze in un diagramma simile a quello in figura 83. Siano questi i tratti OE e OO' .

Dall'equazione (25) o (26) determiniamo n e calcoliamo:

$$\lambda = 1 - n.$$

Il diametro del cerchio è dato dalla frazione $\frac{OE}{2\lambda}$. Per la costruzione è però più comodo determinare il raggio R , che, quando si scelga come

unità di misura la lunghezza OE è dato dalla frazione $\frac{1}{4\lambda}$, avremo quindi per:

$$\begin{aligned} n &= 0,9995 & 0,9990 & 0,998 & 0,997 & 0,996 & 0,995 \\ \lambda &= 0,0005 & 0,001 & 0,002 & 0,003 & 0,004 & 0,005 \\ R &= 500 & 250 & 125 & 83 & 62 & 50. \end{aligned}$$

Se il trasformatore non avesse affatto dispersione sarebbe $R = \infty$, ed il cerchio si ridurrebbe ad una retta passante per E.

Trasformatore a corrente costante. — Aumentando intenzionalmente la dispersione si può costruire un trasformatore, il quale, quando sia mantenuta costante la tensione primaria, dia nel circuito secondario

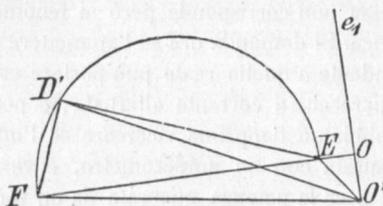


Fig. 84.

una corrente d'intensità quasi costante con tensione variabile. Un tale trasformatore può essere usato per alimentare lampadine inserite in serie, da spegnersi facendo corto circuito fra i loro morsetti. Il punto D' in figura 83 giace in tal caso a sinistra sul semicerchio, come indica la figura 84. Perché un tale trasformatore non bruci quando si faccia corto circuito fra i morsetti secondari, la dispersione deve essere molto grande, ciò che si ottiene con apposite sporgenze dai gioghi, come è indicato dalla figura 78. Allora ε_1 nella formola (26) è pressochè uguale a $1/2$, n è dell'ordine di grandezza 0,97 e R dell'ordine di grandezza 8. La corrente primaria corrispondente ad un corto circuito sul secondario è data da $O'F$. A morsetti secondari aperti la corrente primaria è $O'E$ e la tensione secondaria FE . Se ora il circuito secondario viene chiuso a mezzo di una resistenza priva d'induzione di grandezza tale, che la corrente secondaria sia $\frac{ED'}{n}$, la tensione ai morsetti diviene FD' . Se la resistenza diminuisce per esclusione di una parte delle lampade inserite in serie, D' si avvicina a F e l'intensità di corrente diventa alquanto maggiore. Quando il trasformatore sia ben costruito la variazione dell'intensità della corrente secondaria avviene nei limiti permessi da un buon funzionamento delle lampade.

CAPITOLO OTTAVO

Il dinamometro. — Il wattometro. — Misura di correnti irregolari. — Altri metodi per la misura dell'energia. — Prova dei trasformatori. — Prova delle lamiere.

Il dinamometro. — La supposizione fino ad ora fatta, che le curve della corrente e della tensione siano di forma sinusoidale, è molto conveniente per la trattazione analitica e grafica dei problemi riguardanti le correnti alternate, essa non corrisponde però ai fenomeni che avvengono realmente nella pratica. Si domanda ora se l'ammettere per la corrente una curva non corrispondente a quella reale può portare errori nel progettare o provare degli apparecchi a corrente alternata; e per poter rispondere a tale domanda, dobbiamo dapprima ricercare se l'intensità di una corrente variabile, misurata con un ampèrometro, è veramente la effettiva intensità di corrente e se la potenza misurata da un wattometro è la vera o effettiva potenza della corrente. Per quanto riguarda la prima domanda dobbiamo dapprima farci un concetto chiaro dell'intensità effettiva della corrente. Supponiamo di avere due identiche lampadine ad incandescenza, delle quali l'una sia alimentata da una corrente continua, l'altra dalla corrente alternata da sperimentare. Se le due lampade hanno esattamente la stessa intensità luminosa, se adunque le temperature dei due filamenti di carbone e quindi le energie trasformate in calore sono esattamente uguali, l'intensità effettiva della corrente alternata è evidentemente uguale a quella della corrente continua. Siccome ora le due lampade hanno la medesima temperatura, esse hanno anche la stessa resistenza W , ed il lavoro della corrente continua J_0 nel tempo T è $J_0^2 W T$, mentre quello della corrente alternata è $\int_0^T J^2 W dt$, dove J è una funzione qualunque del tempo t , che viene graficamente rappresentata dalla curva di forma irregolare della corrente alternata. Possiamo quindi avere l'intensità effettiva della corrente alternata, uguagliando queste due espressioni. Ne risulta

$$J_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T J^2 dt.}$$

Si domanda ora, se l'ampèrometro indica questo o un altro valore. Tutti gli strumenti per la misura delle correnti alternate si fondano o sull'azione elettrodinamica o su quella calorifica della corrente. In ambidue i casi l'azione sviluppata in ogni istante è proporzionale al quadrato della

intensità della corrente corrispondente a quell'istante. Tutti gli apparecchi che si basano su questo principio sono adunque equivalenti in merito alle loro indicazioni, ossia agli errori di misura, e quindi non occorre fare la ricerca che per una specie di questi istrumenti. Il risultato vale poi per tutti.

A questo scopo scegliamo il dinamometro comune di Weber. Il rocchetto mobile si trova, come è noto, nel campo del rocchetto fisso ed è quindi assoggettato ad una forza che tende a farlo deviare, mentre è mantenuto in equilibrio dalla tensione di una molla. La forza che tende a farlo deviare è proporzionale al prodotto dell'intensità del campo per l'intensità della corrente, e, siccome la prima è prodotta dalla corrente stessa ed è a questa proporzionale, la forza che in ciascun istante tende a far deviare il rocchetto mobile è proporzionale al quadrato della intensità istantanea della corrente. Se noi abbiamo una corrente continua J_0 la forza deviatrice è costantemente uguale a $J_0^2 \frac{1}{K^2}$, dove K è una costante che dipende dalla costruzione dell'istrumento. La forza contraria della molla è proporzionale al suo angolo di torsione D , per cui ha luogo l'equazione

$$DK^2 = J_0^2,$$

da cui

$$J_0 = K\sqrt{D},$$

che è la nota formola che serve a determinare l'intensità della corrente a mezzo della lettura D .

Si domanda ora se questa formola può venire senz'altro usata per la determinazione dell'effettiva intensità di corrente di una corrente alternata avente una curva di forma qualunque. Immaginiamo rappresentata la corrente colle ordinate di una curva quale funzione del tempo. Se noi disegniamo una seconda curva, le cui ordinate rappresentino il quadrato delle prime, la superficie racchiusa dalla seconda curva e dall'asse delle ascisse dà il valore $\int_0^T J^2 dt$, e l'altezza di un rettangolo di ugual base e superficie rappresenta il quadrato della corrente effettiva. Sul rocchetto mobile del dinamometro agiscono continuamente la forza prodotta dalla tensione della molla e la forza dinamica della corrente che oscilla fra 0 ed un massimo, e che ha quindi sempre direzione opposta alla tensione della molla. Chiamiamo J_t la corrente che scorre nell'istante t , allora è $DK^2 - J_t^2$ la forza impressa ai fili del rocchetto in questo stesso istante. L'accelerazione impressa in questo istante al rocchetto è $\frac{DK^2 - J_t^2}{m}$, quando si indichi con m la massa del rocchetto ridotta al centro d'azione della forza. Se questa massa fosse abbastanza piccola, l'accelerazione, la quale è ora positiva ora negativa, imprimerebbe effettivamente al rocchetto un movi-

mento oscillatorio, ed il rochetto avrebbe ad ogni istante una determinata velocità che si può calcolare dalla formola

$$v = \int_0^t \frac{(D K^2 - J t^2)}{m} dt,$$

premesso che la velocità sia nulla al tempo $t = 0$.

Però la massa del rochetto mobile, in confronto alle forze agenti, è così grande e la durata di ciascun periodo così piccola, che il rochetto non ha movimento visibile, ma si dispone nella posizione mediana corrispondente alla tensione della molla. Questa è del resto la condizione necessaria per una misura esatta. Per poter quindi misurare con gli strumenti, v deve essere infinitamente piccolo, ossia uguale a zero.

Ne viene che

$$\int_0^T \frac{(D K^2 - J t^2)}{m} dt = 0$$

e quindi

$$D K^2 \int_0^T dt = \int_0^T J t^2 dt$$

$$D K^2 = \frac{1}{T} \int_0^T J t^2 dt.$$

L'espressione a destra di questa equazione non è altro che l'altezza del rettangolo sopra detto, ossia il quadrato dell'intensità effettiva J_0 , e quindi è dimostrato che il dinamometro indica senza errore la effettiva intensità di corrente, qualunque sia la forma della curva. La costante, determinata con corrente continua, per la taratura dell'istrumento, vale anche per corrente alternata di qualunque numero di periodi e forma di curva.

Si deve qui osservare che l'applicazione generale di questo principio cogli altri istrumenti di misura è solo possibile quando in questi istrumenti l'azione dinamica della corrente in ciascun istante è proporzionale al quadrato dell'intensità della corrente. Se un istrumento di misura contiene del ferro, questa proporzionalità non è sicura; può darsi invece spesso il caso che tale proporzionalità sia disturbata dall'isteresi e dalle correnti parassite, ed allora l'istrumento deve venire tarato per ciascun numero di periodi e forma di curva.

Il wattometro. — Occorre ora stabilire se il dinamometro, usato come wattometro, dà esattamente la potenza effettiva anche per correnti alternate a curve irregolari.

La disposizione di un dinamometro per la misura dell'energia è rappresentata dalla figura 85. C è il rocchetto mobile e c il fisso. G è la sorgente di corrente e T l'apparecchio che riceve la corrente; in questo caso un trasformatore.

I dinamometri che si costruiscono ordinariamente hanno solo due morsetti A e B (oppure tre se il rocchetto fisso è diviso in due parti per aumentare il campo della misura). Se l'istrumento deve servire per la misura dei watt, allora l'unione tra i rocchetti mobile e fisso deve portare pure un morsetto D. La corrente, della quale si deve determinare l'energia, viene condotta al rocchetto fisso, e tra il morsetto B del rocchetto mobile ed il conduttore di ritorno, viene inserita una resistenza W possibilmente

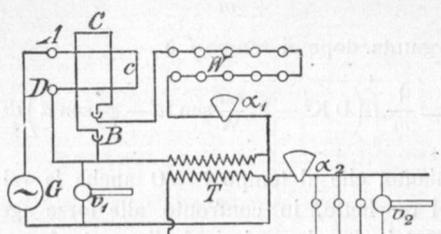


Fig. 85.

priva di induzione, la quale è costituita in genere da un filo o striscia di platino disposto a zig-zag (non a forma di spirale) oppure anche da una serie di lampade ad incandescenza. In questo circuito può essere anche inserito un ampèrometro α_1 ; questo però non è assolutamente indispensabile.

Se la resistenza W è molto grande, allora senza notevole errore si può supporre che la corrente che attraversa α_1 coincida nella fase colla f. e. m. ai morsetti del generatore, indicata dal voltmetro v_1 . Con altre parole: la corrente che scorre attraverso il rocchetto mobile del wattometro non ha spostamento di fase. La corrente che scorre attraverso il rocchetto fisso ha però in genere uno spostamento di fase, e precisamente tanto più grande quanto maggiore è l'autoinduzione dell'apparecchio T. Sia I la corrente primaria del trasformatore (il cui valore massimo è I_m) e i la corrente di derivazione (col valore massimo i_m), allora per un andamento sinusoidale il momento di torsione sul rocchetto mobile è proporzionale all'espressione:

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) i_m \sin \alpha$$

dove α è la fase della f. e. m. in quell'istante e φ lo spostamento di fase in c. Siccome $i_m = \frac{e_m}{W}$ (comprendendo in W la resistenza del rocchetto

fisso, dell'ampèrometro α_1 e delle condutture di giunzione) l'espressione sopra indicata può anche essere scritta nella seguente forma

$$I_m \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \frac{e_m}{W} \operatorname{sen} \alpha.$$

Se ora girando il bottone viene tesa la molla del dinamometro, al rocchetto mobile verrà impresso un movimento di torsione DK^2 , dove come prima D è la lettura angolare e K la costante dell'istrumento determinata mediante la taratura con corrente continua. Se m è la massa del rocchetto ridotto al centro d'azione delle forze, l'accelerazione impressale è

$$\frac{DK^2 - I_m \frac{e_m}{W} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \operatorname{sen} \alpha}{m}$$

e la velocità raggiunta dopo il tempo i è

$$v = \frac{1}{m} \int_0^i \left(DK^2 - I_m \frac{e_m}{W} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \operatorname{sen} \alpha \right) dt,$$

dove noi supponiamo, che al tempo $t=0$ anche la velocità sia 0. Ma ora la massa del rocchetto, in confronto alle forze agenti su di esso, è molto grande, ed inoltre le variazioni di queste forze in grandezza e direzione sono talmente rapide, che il rocchetto non può assolutamente seguirle, ma si dispone in una posizione fissa. Adunque è $v=0$, il che può solo darsi nel caso che

$$t DK^2 = \int_0^t I_m \frac{e_m}{W} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \operatorname{sen} \alpha dt$$

oppure, estendendo l'integrazione per la durata di un intero periodo

$$DK^2 = \frac{I_m e_m}{W T} \int_0^T \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \operatorname{sen} \alpha dt,$$

oppure, con una piccola trasformazione,

$$DK^2 = \frac{I_m e_m}{W} \int_0^{2\pi} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \operatorname{sen} \alpha \frac{d\alpha}{2\pi}.$$

Il valore dell'integrale è $\frac{\cos \varphi}{2}$ e quindi

$$DK^2 = \frac{1}{W} \frac{I_m e_m}{2} \cos \varphi$$

oppure introducendo i valori effettivi invece di quelli massimi

$$DK^2 = \frac{1}{W} I e \cos \varphi.$$

Ma ora $I \cos \varphi$, secondo le premesse fatte, non è altro che l'energia condotta all'apparecchio; e quindi vediamo che questa è rappresentata dal prodotto WDK^2 , dove

D è la lettura in gradi al dinamometro (o in questo caso al wattometro),

K la costante determinata nella taratura con corrente continua, sicchè $K\sqrt{D} = i$,

W la resistenza totale del circuito derivato, espressa in ohm.

Si può ora usare l'istrumento disegnato in figura 85 quale wattometro e fare due altre osservazioni, usandolo come dinamometro per la misura della corrente, vale a dire impiegando i morsetti A e B e non D .

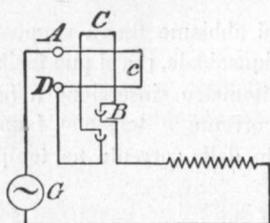


Fig. 86.

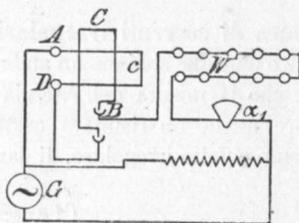


Fig. 87.

L'inserzione viene variata in modo, da misurare prima la corrente principale I (fig. 86) e poi quella in derivazione $\frac{e}{W}$ (fig. 87). Supporremo ora che l'autoinduzione dovuta al rocchetto mobile nell'inserzione in figura 86 sia molto piccola in confronto all'autoinduzione dell'apparecchio, e che l'aumento di resistenza nell'inserzione a figura 87 sia anche piccolissimo in confronto alla resistenza addizionale W ; con altre parole, che nello istrumento non esista nè perdita di energia per resistenza ohmica, nè spostamento di fase per autoinduzione. Si misuri allora nella inserzione data dalla figura 86 la corrente principale I , e sia D_1 la corrispondente lettura,

$$K\sqrt{D_1} = I,$$

e nell'inserzione in figura 87 alla corrente in derivazione $\frac{e}{W}$ corrisponda la lettura D_2

$$K\sqrt{D_2} = \frac{e}{W}.$$

Moltiplicando tra loro queste due uguaglianze si ottiene:

$$K^2\sqrt{D_1 D_2} = I \frac{e}{W}$$

che unita all'equazione trovata precedentemente:

$$K^2 D = I \frac{e}{W} \cos \varphi$$

dà

$$\cos \varphi = \frac{D}{\sqrt{D^2 + I^2}}$$

Si può adunque con tre misure, eseguite con lo stesso strumento (usato una volta come wattometro e due volte come dinamometro), e direttamente dalle letture angolari, determinare lo spostamento di fase. Non è necessario conoscere nè la costante dell'istrumento, nè la resistenza addizionale.

Misura di correnti irregolari. — Noi abbiamo finora supposto che corrente e tensione abbiano un andamento sinusoidale, ma si può facilmente vedere, che la misura dell'energia col wattometro (inserzione a fig. 85) può dare anche un risultato esatto, se corrente e tensione hanno un andamento affatto irregolare. Il lavoro fatto dalla corrente nel tempo T è

$$\int_0^T I e dt = W \int_0^T I i dt,$$

dove tanto la corrente principale I come la corrente i in derivazione, possono essere funzioni qualunque del tempo. Il momento torcente impresso al rocchetto corrispondentemente all'angolo D è $DK^2 - Ii$. Questo varia da istante ad istante, e per un numero di periodi abbastanza piccolo (T grande) e per una piccola massa del rocchetto produce in quest'ultimo un movimento vibratorio. La massa del rocchetto è però abbastanza grande e T abbastanza piccolo, e non si produce quindi movimento visibile del rocchetto. L'integrale dell'accelerazione esteso alla durata di un periodo, deve quindi essere 0, ossia

$$\int_0^T \left(\frac{DK^2 - Ii}{m} \right) dt = 0$$

$$TDK^2 = \int_0^T I i dt$$

$$WDK^2 = \frac{W}{T} \int_0^T I i dt.$$

Ora $W \int_0^T I i dt$, come fu detto più sopra, è il lavoro prodotto nel tempo T , quindi $\frac{W}{T} \int_0^T I i dt$ dà la potenza; troviamo quindi che la potenza misurata col wattometro

$$WDK^2 = P$$

dà la potenza reale della corrente alternata, qualunque sia la forma delle curve dell'intensità e della tensione.

Si vede da questa formola, che per la determinazione della potenza è necessario conoscere il valore della resistenza W . Se questa è fatta con platinoide o altro metallo simile avente un piccolissimo coefficiente di temperatura, questa condizione non porta alcuna difficoltà. Se però come resistenza si usa una serie di lampade ad incandescenza, essa resistenza non è costante, ma dipende da e . Si può allora determinare W in due modi. Secondo il primo metodo, si osserva contemporaneamente lo spostamento D al wattometro, la corrente i all'ampèrometro α_1 e la tensione al voltmetro v_1 . Le due ultime osservazioni danno $W = e : i$, sicchè la potenza è data dalla formola

$$P = \frac{e}{i} D K^2.$$

Ma la osservazione contemporanea di tre grandezze è alquanto incerta e per facilitare il compito si può usare il secondo metodo, secondo il

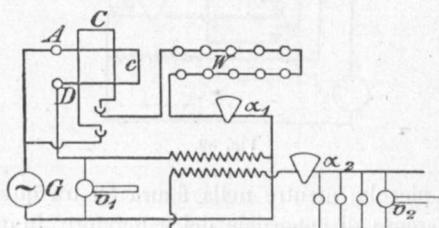


Fig. 88.

quale si determina dapprima la resistenza delle lampade, trovando il valore di W come funzione di e , e rappresentando questa funzione con una curva. Allora per misurare l'energia non sono necessarie che le letture di D ed e ricavando il valore di W corrispondente ad e dalla curva. La taratura può essere anche fatta con corrente continua e l'ampèrometro α_1 può essere poi tolto o posto in corto circuito, con che viene reso più facile l'adempimento della condizione di avere una derivazione priva di induzione.

Nell'inserzione a figura 85 il wattometro è attraversato non solo dalla energia che alimenta il trasformatore T , ma anche dalla energia consumata nel circuito in derivazione. Questa inserzione è adunque solo da usare quando si tratta di misurare l'energia totale prodotta dal generatore. Se però si vuole misurare solamente l'energia che viene fornita al trasformatore, si deve variare l'inserzione, in modo che il circuito in derivazione sia preso non da B , ma da A , figura 88. Allora attraverso a c scorre solo la corrente primaria del trasformatore, e l'energia consumata nella resistenza W non viene misurata.

La misura $W D K^2 = P$ dà esattamente l'energia mandata ai morsetti primari del trasformatore. Se il carico è solo di lampade ad incandescenza, il prodotto della corrente per la tensione rappresenta la potenza consumata nel circuito secondario. Misurando quindi coll'ampèrometro α_2 la corrente i_2 e col voltmetro v_2 la tensione e_2 , si ottiene il rendimento con la formola

$$\eta = \frac{i_2 e_2}{W D K^2}.$$

Quando la misura dell'energia viene fatta per correnti ad alta tensione è necessario fare l'inserzione in modo, che nel wattometro stesso non avvengano grandi differenze di potenziale. L'inserzione data dalla figura 89 è teoricamente equivalente a quella della figura 88, ma praticamente questa è preferibile, perchè tra i due rocchetti C e c ha luogo una differenza di

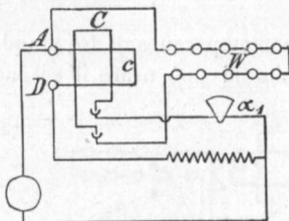


Fig. 89.

potenziale molto piccola, mentre nella figura 89 tra questi due rocchetti si ha l'intera differenza di potenziale del generatore. In quest'ultimo caso quindi è da temersi una scarica attraverso l'isolamento. L'inserzione in figura 88 è anche da preferirsi, perchè, senza diminuire l'isolamento del wattometro, si può porre a terra uno dei suoi morsetti, evitando così eventuali disgrazie per contatti con l'apparecchio.

Nel trattare la teoria del wattometro fu detto, che la resistenza del circuito in derivazione è così grande in confronto dell'autoinduzione dell'istrumento, che si può supporre uguale a 0 lo spostamento di fase della corrente del circuito in derivazione. Questa condizione però non può essere adempita matematicamente, perchè la forza meccanica misurata nel dinamometro si fonda sull'azione reciproca tra corrente e campo magnetico, ciò che fa ammettere implicitamente una certa autoinduzione; ma questa è così piccola nelle buone costruzioni, che si può senz'altro trascurare. È però molto facile introdurre una correzione per l'autoinduzione dello istrumento.

Sia in figura 90 Oe la tensione ai morsetti e Oi l'intensità. Lo spostamento di fase sia φ , sicchè

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi \omega L}{W},$$

dove $2\pi \sim L$ è la reattanza e W la resistenza del circuito principale. La potenza è $Oi \times Oa$.

Se il wattometro non avesse assolutamente alcuna induttanza, allora la corrente in derivazione verrebbe a coincidere con Oe ; ma in conseguenza dell'induttanza la corrente in derivazione ritarda dell'angolo ψ e prende la posizione Oi_0 . Sia w la resistenza del circuito in derivazione e l il suo coefficiente di autoinduzione, allora sarà

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\pi \sim l}{w}.$$

In conseguenza dello spostamento di fase ψ , il wattometro non indica l'energia reale $Oi \times Oa$, ma l'energia apparente $Oi \times Oc$, e per trovare

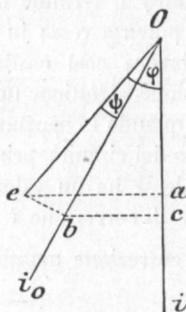


Fig. 90.

dalle letture l'energia reale, dobbiamo moltiplicare la lettura per il rapporto $\frac{Oa}{Oc}$. Se quindi P' è la potenza apparente, che noi abbiamo letto sul wattometro, la reale energia è

$$P = P' \times \frac{Oa}{Oc}.$$

Ora è $Oa = Oe \times \cos \varphi$ e $Oc = Ob \times \cos (\varphi - \psi) = Oe \times \cos \psi \cos (\varphi - \psi)$ e quindi

$$P = P' \frac{\cos \varphi}{\cos \psi \cos (\varphi - \psi)}.$$

Siccome l'angolo ψ è una costante dell'istrumento, lo si può determinare una volta per sempre. Lo spostamento di fase $(\varphi - \psi)$ tra le correnti nei due circuiti può venire determinato colla

$$\cos (\varphi - \psi) = \frac{D}{\sqrt{D_1 D_2}}$$

da cui si ha pure lo spostamento di fase φ tra la f. e. m. e la corrente.

Il termine di correzione per P nell'uguaglianza sopraindicata è facilmente determinabile. Possiamo scrivere questo valore nella formola

$$\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi}.$$

Se $\psi < \varphi$, allora questa espressione è minore di 1 e la potenza letta sul wattometro è più grande della potenza reale. Ma se φ è molto piccolo (ad esempio quando il trasformatore sia caricato con lampade ad incandescenza), e ψ abbastanza grande, può darsi che $\psi > \varphi$ ed allora il wattometro dà un valore minore di quello reale. Si ha lo stesso caso, quando il circuito in derivazione ha una notevole capacità e quindi ψ diventa negativo.

Per due valori speciali di ψ il termine di correzione diventa uguale ad 1 ed il wattometro dà la potenza vera; in primo luogo quando $\psi = 0$, ossia quando l'istrumento lavora così esattamente, che anche per una grande resistenza in derivazione si ottiene una lettura esatta; in secondo luogo quando $\psi = \varphi$, ossia quando lo spostamento di fase nel circuito in derivazione è uguale a quello del circuito principale. Il caso più frequente in pratica è quello, nel quale ψ ha un valore positivo molto piccolo, e che $\varphi > \psi$. Allora il termine di correzione è più piccolo di 1 e raggiunge un minimo per $\psi = \frac{\varphi}{2}$. La correzione massima possibile è allora $\frac{\cos \varphi}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}}$

e questa espressione ci dà anche il limite d'errore, quando si trascura la correzione. La seguente tabella indica i valori limiti per vari valori dello spostamento di fase φ .

φ	Energie lette	L'energia reale è uguale o maggiore di	L'errore è uguale o minore di
5°	1000 watt	998,5 watt	0,15 %
10°	1000 »	994,6 »	0,54 %
15°	1000 »	982,7 »	1,73 %
20°	1000 »	968,8 »	3,12 %
25°	1000 »	950,8 »	4,92 %
30°	1000 »	928,2 »	7,18 %

Altri metodi per la misura dell'energia. — Un wattometro ben costruito è certamente il più comodo ed il più esatto degli istrumenti per la misura dell'energia. Ma se non si ha a disposizione un tale apparecchio, si può anche ricorrere ad altri metodi, certamente non così comodi come il precedente. Si devono distinguere due casi: a) l'energia viene trasformata in calore nell'apparecchio di misura; b) essa deve essere misurata mentre attraversa l'istrumento e viene altrove trasformata in calore od altrimenti utilizzata. Questi due modi di misura si possono definire come metodo d'assorbimento e metodo di trasmissione.

Come esempio del metodo d'assorbimento può servire la misura della energia fornita da un generatore a corrente alternata. La macchina lavora sopra una resistenza metallica, che non è necessario sia priva di induzione, ma che però deve essere costituita da un materiale dotato di un piccolo coefficiente di temperatura (platinoide, manganina, nichelina, ecc.). Per la misura si fa uso di un ampèmetro e di un ponte di *Wheatstone*. Si osserva la corrente di regime, ossia quando la resistenza ha raggiunto la sua massima temperatura, e si sospende quindi l'esercizio. Più presto che è possibile si misura quindi la resistenza col ponte e si ripete la misura ad intervalli di circa dieci secondi, per determinare la legge secondo cui diminuisce la resistenza col tempo. Si costruisce così una curva che rappresenta la resistenza in funzione del tempo, che va prolungata allo indietro fino al punto corrispondente all'istante, in cui la corrente era stata

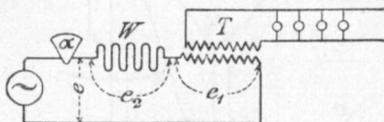


Fig. 91.

interrotta. L'ordinata corrispondente dà la resistenza reale W , che la corrente i , doveva attraversare, e l'energia può quindi essere calcolata colla formola $P = i^2 W$. Con una disposizione appropriata del ponte e dell'interruttore si può lavorare molto velocemente ed ottenere quindi un grado molto alto di esattezza nella misura.

Un altro esempio del metodo d'assorbimento è la misura dell'energia perduta in un trasformatore a mezzo di osservazioni sulla sua temperatura. Si misura l'aumento di temperatura del trasformatore a regime; si toglie quindi dal circuito la corrente alternata e si manda attraverso ai rocchetti ad alta tensione una corrente continua, la cui intensità viene regolata in modo, che l'aumento di temperatura rimanga lo stesso. La energia data dalla corrente continua è quindi uguale a quella che andava perduta prima colla corrente alternata nel trasformatore. L'energia della corrente continua può venire facilmente determinata colla misura della intensità e della tensione. Per misurare la temperatura è opportuno usare un termometro ad alcool, perchè il campo prodotto dalla corrente alternata induce nel mercurio delle correnti parassite che alterano le indicazioni del termometro a mercurio. Questo metodo di misura è molto lento e richiede pratica ed abilità nell'osservatore, per dare risultati sufficientemente esatti.

Al metodo di trasmissione appartengono la misura a mezzo del wattometro, che fu già indicato più sopra, quello così detto *dei tre voltometri* di *Ayrton* e quello *dei tre ampèrometri* di *Fleming*.

Per determinare quest'ultima occorrono quindi quattro letture, vale a dire tre per la tensione ed una per la corrente. Se è nota esattamente la resistenza W , si può omettere la misura della corrente e calcolare la potenza colla formola

$$P = \frac{e^2 - e_1^2 - e_2^2}{2W}.$$

Questa è la potenza che viene guidata al trasformatore. Volendo determinare la potenza fornita dal generatore a P si deve sommare $\frac{e_2^2}{W}$ e si ottiene

$$P' = \frac{e^2 + e_2^2 - e_1^2}{2W}.$$

Invece di calcolare P con questa formola si può anche trovare graficamente la componente attiva di e_1 , segnando con centro in O due archi

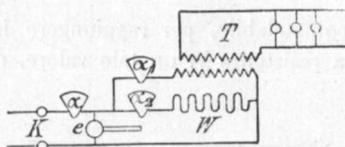


Fig. 93.

di cerchio di raggi e_1 ed e , e spostando parallelamente a se stessa una verticale fino a che il tratto compreso fra i due cerchi sia esattamente uguale ad e_2 ; questa definisce allora la posizione del punto E_1 e la lunghezza $OA = e_{10}$. La potenza è quindi $P = e_{10}i$. Dal diagramma si vede senz'altro che un piccolo errore nella determinazione delle tensioni, deve produrre un errore tanto più grande nel risultato, quanto più il cerchio e_1 è vicino ad O o ad e . La costruzione offre la massima esattezza quando e_1 è all'incirca la metà di e . È quindi raccomandabile, di scegliere la resistenza W in modo che e_2 non differisca molto da e_1 , e che quindi e sia molto maggiore di e_1 , ossia si deve avere a disposizione una sorgente di corrente che dia una tensione molto più alta di quella richiesta dall'apparecchio da misurare. Quando si ha a disposizione una tale macchina, oppure si può alzare convenientemente la tensione mediante trasformazione, il metodo sopraindicato è il più comodo ed il più esatto; ma se non si ha nè una macchina, nè un trasformatore per produrre una tensione molto più alta, questo metodo non è usabile e si deve ricorrere al

Metodo dei tre ampèrometri. Questo è una variazione fatta dal dottore *Fleming* al metodo dell'*Ayrton* e viene usato specialmente, con vantaggio, quando si dispone della corrente di una centrale elettrica alla tensione per cui è costruito il trasformatore. La disposizione è indicata in figura 93. K sono i morsetti della condotta d'alimentazione, α è un

ampèrometro che indica la corrente totale, e α_1, α_2 sono ampèrometri che indicano le due componenti di questa corrente, W è una resistenza priva di induzione e T è il trasformatore da sperimentare. Nella figura 94 OE è il vettore della tensione, i_1 la corrente primaria di T e i_w la sua componente attiva; i_2 è la corrente in W, il cui vettore è evidentemente parallelo ad OE. Allora deve naturalmente essere

$$i_1^2 - i_w^2 = i^2 - (i_w + i_2)^2$$

e l'energia

$$e i_w = P = \frac{e}{2} \frac{(i^2 - i_1^2 - i_2^2)}{i_2}.$$

Se si conosce esattamente la resistenza W, non è necessario misurare e e si può calcolare la potenza colla formola

$$P = \frac{W}{2} (i^2 - i_1^2 - i_2^2).$$

Anche qui è raccomandabile, per raggiungere la massima possibile esattezza, di dare alla resistenza W un tale valore, che i_2 non differisca molto da i_1 .

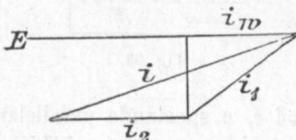


Fig. 94.

Nel trattare i due metodi abbiamo usato il diagramma vettoriale e tacitamente abbiamo supposto che tanto la tensione quanto la corrente abbiano forma sinusoidale. Si domanda ora, se questi metodi possono venir usati anche nel caso in cui corrente e tensione non hanno andamento sinusoidale, ma variano secondo una qualunque funzione del tempo. Che il wattometro dia lo stesso risultato per qualunque sorta di correnti fu già dimostrato, e siccome facendo contemporaneamente la misura col wattometro e con uno di questi due metodi si viene sempre allo stesso risultato, è chiaro che questi metodi sono anche usabili per correnti di forma qualunque. Ma questo lo si può anche dimostrare direttamente. Vogliamo dimostrare questa proprietà per il metodo dei tre voltometri, rilasciando al lettore di estendere la dimostrazione al caso dei tre ampèrometri. Indicheremo con lettere minuscole i valori istantanei della corrente e della tensione, in un istante qualunque t sarà allora

$$e = e_1 + e_2$$

$$i = \frac{e_2}{W}.$$

L'energia che in questo istante attraversa l'apparecchio è

$$p = i e_1 = \frac{e_1 e_2}{W}.$$

Siccome

$$e^2 = e_1^2 + 2 e_1 e_2 + e_2^2,$$

sarà

$$e^2 = e_1^2 + 2 p W + e_2^2$$

e quindi

$$p = \frac{1}{2W} (e^2 - e_1^2 - e_2^2).$$

Il lavoro prodotto durante un periodo è $\int_0^T p dt$ e quindi l'energia effettiva

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

$$P = \frac{1}{2W} \frac{1}{T} \left(\int_0^T e^2 dt - \int_0^T e_1^2 dt - \int_0^T e_2^2 dt \right).$$

Ma le espressioni della forma $\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt$ non sono altro che i quadrati dei valori medii della tensione, ossia i quadrati delle cosiddette tensioni effettive lette sui voltometri. Indichiamo questi colle lettere e , e_1 ed e_2 , ed allora troviamo per l'energia l'espressione uguale a quella trovata coll'uso del diagramma vettoriale, ossia

$$P = \frac{1}{2W} (e^2 - e_1^2 - e_2^2).$$

Siccome questo risultato fu ricavato nell'ipotesi che le curve della corrente e della tensione abbiano un andamento qualunque, si è anche dimostrato che il metodo dei tre voltometri è applicabile a qualunque caso.

Prova dei trasformatori. — Coll'aiuto dei diversi metodi sopraesposti si possono determinare l'energia ed il rendimento di un trasformatore, supposto che si abbia a disposizione una conveniente sorgente di corrente ed un apparecchio che assorba la corrente secondaria. Siccome però il rendimento dei trasformatori è in generale molto grande, la sua determinazione diretta presenta difficoltà quando lo si voglia determinare dalla potenza fornita e ricavata dal trasformatore, poichè piccoli errori nella misura di queste energie possono portare grandi errori nel loro rapporto. Supponiamo, ad esempio, che l'energia fornita effettivamente al trasformatore sia 100 e quella da esso ricavata sia 97, e che nelle due misure si commetta un errore dell'1 0/0; e precisamente negativo nella prima e positivo nella seconda. Le misure lette sarebbero quindi: energia fornita 99; ricavata 98. Secondo queste misure il rendimento sarebbe del 99 0/0

invece del 97 % come si ha in realtà. Per diminuire il più possibile l'effetto degli errori di misura, è raccomandabile di determinare il rendimento non con la diretta misura delle energie mandate e ricavate dal trasformatore, ma di procedere nel seguente modo: Si misurano due trasformatori uguali assieme, e precisamente in modo che l'energia presa dal primo trasformatore venga usata ad alimentare il secondo e l'energia ricavata dal secondo trasformatore, coll'aggiunta di energia fornita separatamente da un generatore di corrente, alimenta il primo trasformatore. In tal caso si tratta adunque di una circolazione di energia tra i due trasformatori, mentre dall'esterno non viene fornita che l'energia corrispondente alle perdite. Si misura quindi l'energia totale circolante e la perdita d'energia. Siccome quest'ultima è relativamente molto piccola, gli

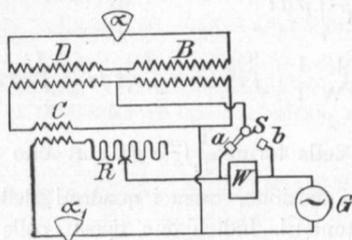


Fig. 95.

errori di misura si ripercuotono meno sul risultato finale, che nei metodi diretti. La disposizione è data dalla figura 95. D e B sono i due trasformatori da provarsi e C è un piccolo trasformatore ausiliario, che effettua la circolazione della corrente attraverso ai rocchetti primari. Nel circuito primario di C viene inserito un reostato R privo d'induzione, che permette di regolare la f. e. m. aggiunta nel circuito primario dei trasformatori principali in modo che attraverso all'ampèrometro a scorra la normale corrente secondaria. L'inserzione dei trasformatori D e B deve naturalmente essere fatta in guisa, che le loro f. e. m. agiscano fra di loro in senso opposto. Se si inserisse il solo trasformatore C, alimentando il sistema col generatore G, si potrebbe bensì produrre nei trasformatori D e B le corrispondenti intensità totali delle correnti, ma non si potrebbe ottenere la esatta tensione ai morsetti. Per avere quest'ultima il generatore deve essere unito, come in figura, coi rocchetti primari di D e B. Se si togliesse dal circuito, a mezzo del reostato, il trasformatore C e si chiudesse in corto circuito il suo rocchetto secondario, il generatore G dovrebbe fornire solamente la corrente a vuoto per i due trasformatori, e siccome essi sono uguali, in α non verrà indicata alcuna corrente. Se ora si inserisce C, rimane invariata la tensione ai morsetti di D e B; avviene però

uno spostamento di energia da un trasformatore nell'altro, ed α indicherà una corrente. Si disponga quindi il reostato in modo, che questa corrente assuma il suo valore normale, allora i due trasformatori sono caricati colla loro tensione normale e normale intensità di corrente. Inserendo quindi un wattometro W nella condotta d'alimentazione del generatore si potrà misurare l'energia consumata per coprire tutte le perdite, che sono: calore in R e perdite in D, B e C. Siccome è noto il rendimento del piccolo trasformatore ausiliario, si può determinare la perdita nel medesimo, quando sia nota l'energia fornitagli. Col wattometro è unito un commutatore S. Se la leva del commutatore sta sul contatto a , il wattometro misura l'energia totale fornita dal generatore; la quale sia P_1 . Se la leva sta su b , il wattometro misura l'energia che viene guidata al trasformatore C ed al reostato R; la quale sia P_c . La corrente primaria i di C viene letta in α_1 . Se w indica la resistenza del reostato quando la leva si trova nella posizione opportuna, l'energia che riceve C è $P_c - i^2 w$. Se η' è il rendimento del trasformatore piccolo, esso fornirà al suo circuito secondario un'energia data da $\eta' (P_c - i^2 w)$. La macchina fornisce ai circuiti primari dei due trasformatori complessivamente l'energia $P_1 - P_c$, e quindi la perdita nei due trasformatori D e B è

$$P_v = P_1 - P_c + \eta' (P_c - i^2 w).$$

Sia P la potenza ed η il rendimento del trasformatore D. D riceve allora nel circuito primario P watt e ne dà ηP watt; B riceve ηP watt e dà ai morsetti ad alta tensione $\eta^2 P$ watt. Abbiamo dunque:

$$P_v = P - \eta^2 P$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P - P_v}{P}}.$$

Si vede da quest'uguaglianza, che un errore non molto grande nella misura di P_v può produrre solo un piccolissimo errore nella determinazione del rendimento. Secondo il nostro esempio di prima si avrebbe $P = 100$, $P_v = 6$. Misurando esattamente si ottiene

$$\eta = \frac{1}{10} \sqrt{94} = 0,9695.$$

Supponiamo ora che, come prima, nella determinazione della energia totale si commetta un errore dell'1 % e nella determinazione della perdita P_v un errore del 5 %, allora l'errore nel calcolo del rendimento può salire, al massimo, ad $\frac{1}{4}$ %. Questo metodo dunque per determinare il rendimento è più esatto di quello delle misure dirette. Di più esso offre due altri vantaggi: primieramente non si ha bisogno di alcuna resistenza o di altro apparecchio, che sia in grado di assorbire la totale energia data

dai rocchetti secondari del trasformatore, ed in secondo luogo la sorgente di corrente deve essere solo sufficiente per coprire le perdite. Ambedue sono vantaggi di molto pregio, quando le prove devono farsi sopra grandi trasformatori.

Il modo migliore di determinare l'aumento di temperatura è il seguente: Si portano i trasformatori alla temperatura che si presuppone sia quella finale o col riscaldamento in apposito locale o a mezzo di una corrente continua, e quindi si fanno attraversare da una corrente alternata, secondo lo schema d'inserzione a figura 95. Di tratto in tratto si misura la temperatura a mezzo di un termometro ad alcool, e si portano graficamente i valori trovati come funzione del tempo, continuando l'esperienza fino a che la curva della temperatura acquista un percorso orizzontale.

Se si ha a disposizione corrente alternata di una centrale, si può omettere il riscaldamento preventivo. I trasformatori vengono subito inseriti secondo lo schema a figura 95 e si tengono in esercizio fino a che abbiano raggiunto la temperatura finale. La caduta di tensione viene determinata o direttamente sotto carico, o nelle condizioni normali d'esercizio, oppure la si ricava secondo i metodi indicati nel cap. 6. Quest'ultimo modo è più semplice e più esatto.

Le misure d'isolamento è opportuno farle quando si è raggiunta la temperatura finale; ed è pure raccomandabile di provare la resistenza dell'isolamento fra i seguenti punti: *a)* un morsetto primario con uno secondario; *b)* un morsetto primario colla terra; *c)* un morsetto secondario colla terra.

Prova delle lamiere. — I metodi per la determinazione della permeabilità e dell'isteresi delle grosse sbarre di ferro non sono convenienti per la prova delle lamiere, perchè non è facile poter ottenere un sufficiente contatto magnetico tra il campione e le altre parti dell'apparecchio. Si può determinare col metodo balistico l'isteresi in lamiere di forma anulare, ma questo esige l'esecuzione di un avvolgimento per ogni campione e dà il risultato solo indirettamente. Quello che si deve determinare è il lavoro dell'isteresi corrispondente alla frequenza normale. Il metodo balistico dà l'isteresi per variazioni graduali dell'induzione, e da questa può essere calcolato il lavoro d'isteresi, non però la perdita dovuta alle correnti parassite. È quindi meglio misurare direttamente le perdite nel ferro a mezzo di un wattometro, sottoponendo all'induzione corrispondente alla frequenza normale un determinato peso di lamiere. Nel risultato rimane naturalmente compresa anche l'energia, che si perde in causa delle correnti parassite. La permeabilità non può essere misurata in tal modo; la si può però determinare con sufficiente approssimazione dal fattore di potenza dei trasformatori già costruiti in base alla corrente a

vuoto. I trasformatori però che devono servire per questa misura non devono naturalmente avere alcuna connessura.

Un metodo molto semplice per provare le lamiere consiste nel tagliare le lamiere del campione nella forma necessaria al trasformatore e disporle in un rocchetto. Si inserisca quindi nel circuito un wattmetro e si determini così la potenza a vuoto. L'induzione si ha dalla tensione ai morsetti, dalla frequenza, dal numero degli avvolgimenti e dalla sezione del ferro secondo la formola

$$E = 4,44 \cdot n \cdot A \cdot B \cdot 10^{-8},$$

dove si trascura la resistenza del rocchetto, che può rendersi molto piccola. La perdita totale si ha dalla somma delle perdite per isteresi e per le correnti parassite. Se l'induzione rimane costante per un numero di periodi variabile, la perdita per correnti parassite varia col quadrato della frequenza. La si può quindi determinare separatamente dalla perdita per isteresi, facendo variare E proporzionalmente a ω , determinando poi ogni volta la perdita totale. Supponiamo di fare due misure alle frequenze ω_1 e ω_2 , e di trovare rispettivamente le perdite P_1 e P_2 , avremo

$$P_1 = h \omega_1 + f \omega_1^2$$

$$P_2 = h \omega_2 + f \omega_2^2$$

dove h e f sono coefficienti che dipendono dall'isteresi e dalle correnti parassite. Questi coefficienti possono venire determinati dalle due equazioni e si trovano quindi separatamente i valori delle perdite per isteresi e per le correnti parassite

$$P_h = h \omega_1$$

$$P_f = f \omega_1^2$$

per la frequenza ω_1 , e nello stesso modo per l'altra frequenza.

Nei metodi di ricerca ora descritti abbiamo supposto che la lamiera campione fosse tagliata nella forma voluta per la costruzione della carcassa del trasformatore. Ma però non è sempre comodo di far tagliare i pezzi in questa forma, perchè in tal caso sono necessari apparecchi speciali. È quindi meglio di eseguire l'esperienza sopra campioni di forma semplice, ossia a striscie, poichè queste possono venire tagliate con le forbici, che si trovano in qualunque stabilimento.

La figura 96 rappresenta un apparecchio per la prova delle lamiere dei trasformatori, che fu applicato a questo scopo da *Dolivo-Dobrowolsky* (1). L'apparecchio è formato schematicamente da due nuclei magnetici n s a forma di \square avvolti da due rocchetti. Questi nuclei sono costituiti da lamiere isolate e possono essere uniti fra di loro, direttamente o interponendovi il pezzo-campione A, costituito da striscie della lamiera

(1) *E. T. Z.* 1892, fasc. 30, pag. 406.

da provare, pure isolate fra di loro. Nel primo caso i rocchetti vengono inseriti in modo, che ambedue generino il flusso magnetico nello stesso senso; nel secondo caso si inseriscono in senso inverso, sicchè in n e s si abbiano poli conseguenti ed il flusso magnetico venga guidato attraverso al pezzo-campione. La commutazione avviene a mezzo dell'inseritore doppio B. Nel circuito vanno inseriti inoltre un wattometro, un dinamometro ed un voltmetro, il quale ultimo è indicato in figura con *Card.* Dapprima si determina coll'inserzione magnetica in serie dei rocchetti le perdite d'energia per vari valori dell'induzione, che vengono calcolati in base ai dati costruttivi dell'apparecchio ed alla tensione letta al voltmetro. Indi si interpone il campione, si inseriscono i magneti in parallelo

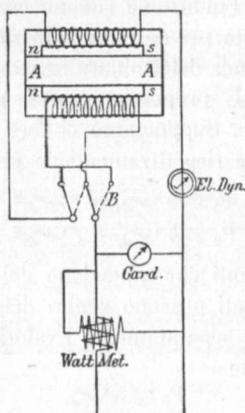


Fig. 96.

e si ripetono le misure. La sezione del campione deve essere all'incirca doppia di quella di ciascuno dei magneti, sicchè l'induzione è costante in tutto il sistema. Allora la differenza delle perdite rappresenta la perdita esistente nel campione. Questo metodo ha però il difetto che la dispersione magnetica varia notevolmente quando si introduce nel circuito il campione. Nell'inserzione magnetica in serie la dispersione è molto piccola. La tensione letta al voltmetro dà quindi veramente una misura dell'induzione. Quando invece si interpone il campione, tra le due superfici n e s deve prodursi una grande differenza di potenziale magnetico, per effetto della resistenza magnetica delle connesure e del campione. In conseguenza di ciò si ha dispersione, e l'induzione nel mezzo del nucleo magnetico è più grande che alle sue estremità, ed alle estremità è più grande che alla metà del campione. In questo caso adunque la tensione osservata non è più una misura esatta della induzione e la determinazione della perdita quale funzione dell'induzione non può essere completamente esatta.

Questo inconveniente è stato tolto nell'apparecchio costruito dall'autore per la prova delle lamiere. Il campione viene anche qui composto da striscie della lamiera da provare e costituisce il lato maggiore di un telaio rettangolare. Gli altri tre lati vengono formati da lamiere tagliate in forma di \perp . La figura 97 indica questa disposizione (1). I due lati più lunghi sono circondati da rocchetti ed il rocchetto superiore è fatto in guisa da permettere comodamente l'introduzione del campione. I rocchetti sono inseriti in modo da produrre un flusso magnetico dello stesso senso, di modo che non si ha affatto dispersione. La tensione viene letta in corrispondenza ai morsetti del rocchetto superiore ed è quindi una misura diretta per l'induzione nel campione. Dapprima si costruisce un campione

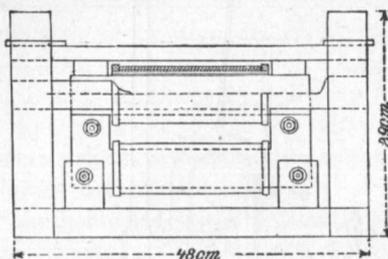


Fig. 97.

dello stesso materiale del nucleo fisso e si determina la perdita in funzione dell'induzione coll'aiuto di un wattometro e di un voltmetro. Questa perdita viene poi suddivisa tra i due nuclei in rapporto al loro peso, e si trova in questo modo la perdita per il nucleo fisso in funzione della induzione. Se ora si prende un campione qualunque e si determina la perdita totale si avrà la perdita nel campione dalla differenza tra la perdita totale e quella corrispondente al nucleo fisso. Anche in questo apparecchio la sezione del campione dev'essere uguale a quella del nucleo fisso. Un difetto di questo apparecchio sta nel fatto, che il peso del campione è minore della metà di quello di tutto il nucleo, e quindi un errore commesso nella misura riesce triplicato quando vien riferito al campione. Per evitare questo inconveniente la Casa *Oerlikon* costruisce l'intero telaio con la lamiera da provare. Le lamiere vengono tagliate in forma di \perp e vengono disposte in modo da costituire un telaio rettangolare. La preparazione del campione riesce più lunga, ma si ha il vantaggio di una esattezza maggiore di quella che dà l'apparecchio dell'autore.

Un altro apparecchio per determinare in modo rapido e comodo la perdita per isteresi nei campioni delle lamiere è dato dal prof. *Ewing* (2).

(1) *E. T. Z.* 1894, fasc. 19, pag. 265.

(2) *E. T. Z.* 1895, fasc. 19, pag. 292.

Il principio di quest'apparecchio è la determinazione puramente meccanica del lavoro che viene consumato nella lamiera da provarsi quando viene rovesciato il senso della magnetizzazione. I campioni delle lamiere vengono tagliati in striscie di 76 millimetri di lunghezza e 16 millimetri di larghezza, e vengono legati in un fascio che viene disposto nell'apparecchio.

Il cambiamento di direzione della magnetizzazione avviene a mezzo della rotazione di una manovella ed il risultato si legge a mezzo di un

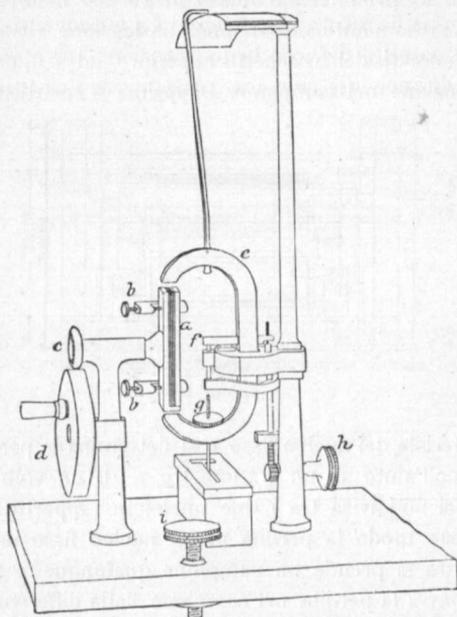


Fig. 98.

indice e di una scala. Per le lamiere sottili usate per i trasformatori sono sufficienti da 6 ad 8 striscie, che vengono poste nel supporto *a* (fig. 98) e fissate mediante i morsetti a vite *b*. Il supporto *a* viene posto in movimento di rotazione mediante la ruota a frizione *c* e la manovella *d*. Le estremità delle striscie di lamiera vengono così alternativamente fatte passare davanti ai poli di una calamita permanente, ed il lavoro meccanico, che viene consumato dall'isteresi, produce un movimento di rotazione, che fa deviare il magnete dalla sua posizione di riposo. Il magnete è montato sopra supporti a coltello, ed è contrappesato in modo, che l'angolo di deviazione dato dall'indice sulla scala dà una misura del movimento di rotazione. Siccome per ogni giro si consuma un valore determinato di lavoro, la deviazione è indipendente dalla velocità della rotazione, fino a

tanto che la velocità non è così grande da produrre correnti parassite. La deviazione del magnete è smorzata da un apposito freno disposto alla parte inferiore e che può venire regolato mediante il peso g , spostabile a mezzo di una vite.

Per trasportare l'apparecchio il magnete può essere sollevato dai suoi supporti a coltello mediante la vite h . Per disporre l'indice a zero si ha una vite laterale, e la vite di livello i . Per adoperare l'apparecchio il campione vien dapprima calibrato alla lunghezza prescritta, quindi lo si dispone nell'apparecchio. Si ruota dapprima nell'uno poi nell'altro senso, e si assume come deviazione totale la somma delle due letture. Questa è, con grande approssimazione, proporzionale alla perdita per isteresi del campione, anche se la permeabilità dei diversi campioni differisce entro vasti limiti, ciò che si spiega in causa del grande interfero esistente tra i poli dei magneti e le estremità del campione. La grandezza e la intensità del magnete sono scelte in modo che l'induzione per lo spessore normale del campione è di 4000 unità c. g. s.; essa può tuttavia esser resa maggiore diminuendo il numero delle striscie di lamiera e viceversa esser diminuita aumentando il numero delle lamiere.

Ewing trovò, che non è necessario di bilanciare esattamente il campione, perchè lo spostamento cambia di poco al variare del numero delle lamiere costituenti il campione. È raccomandabile di eseguire il campione di peso approssimativamente uguale a quello di 7 lamiere di circa 0,34 millimetri di spessore. Esperimentando quindi lamiere per armature di dinamo, che hanno uno spessore maggiore di quelle dei trasformatori, si dovrà disporre nell'apparecchio un campione composto da un numero corrispondentemente minore di lamiere.

L'apparecchio viene tarato eseguendo con esso esperienze sopra lamiere, la cui isteresi fu esattamente determinata mediante il metodo balistico. Ad ogni strumento vengono fatti generalmente due fascetti di lamiera-campione, insieme ad una tabella, che dà i valori dell'isteresi, ricavati per questi campioni col metodo balistico. Se si hanno da provare altre lamiere, si osserva dapprima la deviazione coi campioni normali e poi quella con le lamiere da provare. Il rapporto delle due deviazioni dà tosto anche il rapporto delle perdite per isteresi. In questo modo il risultato dell'esperienza si rende indipendente da qualunque variazione d'intensità del magnete permanente.

CAPITOLO NONO.

Disposizioni di sicurezza pei trasformatori. — Sottostazioni e trasformatori separati. — Elevatori di tensione. — Inserzione in serie. — Rocchetti d'induzione. — Rocchetti di compensazione. — Sistema a tre fili. — Trasformatore di compensazione. — Sistema di distribuzione di Scott.

Disposizioni di sicurezza pei trasformatori. — Venne già ricordato il grande vantaggio che si ha nell'impiego dei trasformatori, potendo in tal caso avere una tensione elevata nella linea ed una bassa tensione nella rete di distribuzione. Condizione indispensabile per un regolare esercizio è un isolamento sufficiente tra il circuito primario e quello secondario. Se questa condizione non è soddisfatta il vantaggio suddetto sarà illusorio e condurrà anzi all'inconveniente di provocare un senso ingiustificato di sicurezza. Ora in un trasformatore i due avvolgimenti sono necessariamente l'uno di fianco all'altro, e sussiste quindi sempre la possibilità che lo strato isolante tra i due avvolgimenti venga guastato e che si formi in tal guisa un passaggio alla corrente dal rocchetto primario a quello secondario. Poichè ora in un'estesa rete di distribuzione l'isolamento del circuito primario verso la terra non può essere assoluto, nel caso di un simile guasto il rocchetto secondario assumerà un potenziale, che differirà da quello della terra di una quantità che può variare, a seconda dell'entità del guasto, da alcune centinaia di volt alla totale tensione primaria; toccando quindi un punto del circuito secondario si può ricevere una scarica pericolosa. Per evitare questo pericolo è necessario adottare alcune disposizioni di sicurezza. Una di tali disposizioni consiste nel porre fra i due rocchetti una parete metallica in buona congiunzione con la terra. In caso di guasto dell'isolamento non avverrà allora più contatto fra il rocchetto primario e quello secondario, ma fra il primario e la terra, di modo che riesce impossibile un aumento di potenziale nel circuito secondario.

Fin tanto che si tratta di un difetto d'isolamento nei rocchetti stessi, questa disposizione è assolutamente sicura, se però il difetto si verifica nelle condutture d'alimentazione (quindi fuor degli avvolgimenti) è chiaro che la parete metallica interposta tra gli avvolgimenti non può rendere innocuo tale difetto. È certo che con disposizioni opportune si può rendere impossibile un contatto fra le condutture che fanno capo al trasformatore; siccome però vanno considerati anche quei casi in cui la costruzione

del trasformatore o l'ordinamento delle condutture è poco opportuno, è necessario trovare delle disposizioni di sicurezza anche per questi casi. Il mezzo più semplice consiste nel porre permanentemente a terra uno dei punti del circuito secondario. Preferibilmente si pone a terra il punto di mezzo dell'avvolgimento secondario, perchè allora la differenza di potenziale delle condutture delle lampade dalla terra riesce minima, e cioè uguale alla metà della tensione secondaria. Se ora in causa di un difetto d'isolamento si produce un contatto fra i due circuiti, il circuito primario verrà tosto messo a terra, con che è evitato ogni pericolo di contatto per le persone. All'opposto si è alquanto aumentato il pericolo d'incendio. Infatti se l'avvolgimento secondario è completamente isolato dalla terra, perchè possa aver luogo pericolo d'incendio si deve guastare l'isolamento

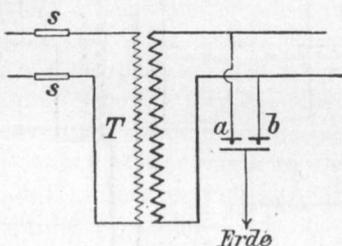


Fig. 99.

ad ambedue i fili della conduttura, mentre quando un punto dell'avvolgimento è a terra è sufficiente un guasto nell'isolamento di un unico conduttore per procurare pericolo d'incendio. Il grado di sicurezza è quindi ridotto alla metà.

Quest'inconveniente può evitarsi adottando il sistema usato da alcuni anni dalla società Thomson-Houston. L'apparecchio da essa adottato consiste in una piastra di metallo ed in due bottoni di metallo *a* e *b* (figura 99) isolati dalla piastra con un sottile strato isolante (carta paraffinata o mica). I bottoni di metallo sono congiunti ai conduttori del circuito secondario. Fin tanto che l'isolamento nel trasformatore è buono, fra *a*, *b* e la terra non sussiste che la differenza di potenziale corrispondente alla tensione secondaria, che non è sufficiente a rompere lo strato isolante. Se però avviene un difetto d'isolamento in un punto qualsiasi tra i due circuiti, il circuito secondario si porterà alla tensione del primario, brucierà lo strato isolante in *a* e *b* e si formerà corto circuito sul rocchetto secondario. La corrente primaria allora sale ad un valore tale, che le sicurezze *s s* fondono ed il trasformatore difettoso viene automaticamente escluso dalla rete primaria.

Nel sistema ideato da Major *Cardew*, frequentemente usato (fig. 100), viene impiegata l'attrazione elettrostatica a produrre un contatto con

la terra. Una laminetta di alluminio, formata da due dischi circolari uniti da un ponticello, è disposta in una scatola in modo che uno dei dischi appoggia su di una piastra congiunta a terra mentre l'altro si trova ad una piccola distanza sotto un disco metallico isolato e congiunto elettricamente al rocchetto secondario. Mediante una vite esistente nel coperchio della scatola si può regolare esattamente la distanza fra la laminetta di alluminio ed il disco di metallo. La laminetta ha dunque il potenziale della terra, mentre l'elettrodo E possiede il potenziale del circuito secondario, al quale è unito. Fin tanto che l'isolamento è buono ovunque, questo potenziale può al massimo raggiungere il valore corrispondente alla tensione secondaria, che è troppo piccolo per produrre

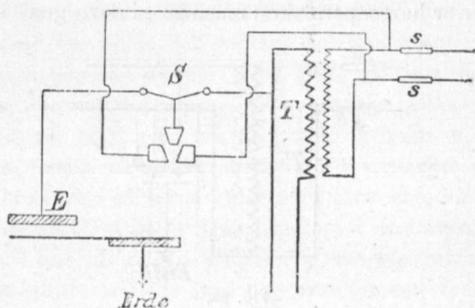


Fig. 100.

l'attrazione del disco E sulla laminetta. Se però si forma un difetto di isolamento, E assume un potenziale più elevato e per effetto dell'attrazione elettrostatica la laminetta d'alluminio verrà portata a contatto con E. Nella prima disposizione data da *Cardew* (1), nella condotta di congiunzione di E col trasformatore era inserita una sicurezza S, che nel fondere (per effetto del contatto della laminetta con E) liberava una molla od un peso, che produceva corto circuito fra i morsetti del primario, per cui fondevano le valvole s s del trasformatore, escludendolo così dalla condotta primaria. È però provato, che le sicurezze s s fondono, anche se viene ommesso l'apparecchio di corto circuito. Il disco E può essere apportato con una tale precisione, che già a 400 volt si produce infallibilmente contatto a terra e la fusione delle valvole s s. La disposizione data dal *Cardew* agisce quindi anche per un leggero difetto d'isolamento fra i due circuiti.

Il sistema di sicurezza del *Ferranti* è rappresentato schematicamente in figura 101. Esso agisce anche per i difetti che si stanno appena formando. Le condutture di distribuzione del trasformatore vengono congiunte

(1) *Inst. El. Engineers Journal*, vol. XVII, pag. 179.

coi rocchetti primari riuniti in serie di due piccolissimi trasformatori, i cui rocchetti secondari sono inseriti in parallelo. Il punto d'unione dei due rocchetti primari è posto a terra. Nel circuito esterno dei rocchetti secondari è inserito un filo fusibile, portante un peso di forma conica. Fin tanto che l'isolamento è ovunque buono, ambedue i rocchetti primari sono attraversati da correnti di eguale intensità, e sussiste perfetto equilibrio fra le f. e. m. dei rocchetti secondari. Se ora in un punto qualunque avviene un guasto nell'isolamento, cessa l'equilibrio ed il filo fusibile è attraversato

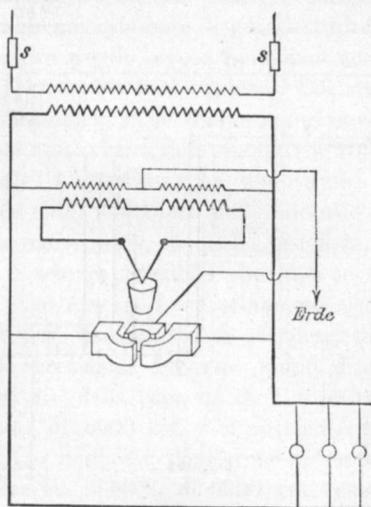


Fig. 101.
Erde = Terra.

da una corrente. Il peso conico cade e chiude in corto circuito le condutture di distribuzione ponendole contemporaneamente a terra. Indi fondono le sicurezze *ss* ed il trasformatore viene in tal guisa escluso dalla conduttura d'alimentazione.

Impiego dei trasformatori. — Il principale uso dei trasformatori è, come lo indica il loro nome, la trasformazione di un'alta tensione in una bassa, o viceversa. Le proprietà delle lampadine, come pure la necessità di un'assoluta sicurezza, portano come condizione indispensabile l'impiego della corrente a bassa tensione (100 a 250 volt), mentre nella linea è necessario l'impiego di un'alta tensione per avere un risparmio nelle condutture. Il trasformatore costituisce l'anello di giunzione che permette di adempiere contemporaneamente le due condizioni di avere: condutture economiche e bassa tensione agli apparecchi di consumo. Questo modo

d'impiego dei trasformatori è rappresentato schematicamente dallo schizzo in figura 102. C sono le sbarre raccogliatrici nella centrale, Ss le condutture d'alimentazione, TT i trasformatori e VV le condutture di distribuzione. Gli apparecchi di misura, interruttori, ecc., sono ommessi per semplicità.

Nello schizzo è supposto che ciascuna conduttura di alimentazione conduca la corrente ad alta tensione ad un unico trasformatore, e che la corrente secondaria venga condotta alle lampade a mezzo di una rete di distribuzione ramificata. Le condutture di distribuzione corrispondenti

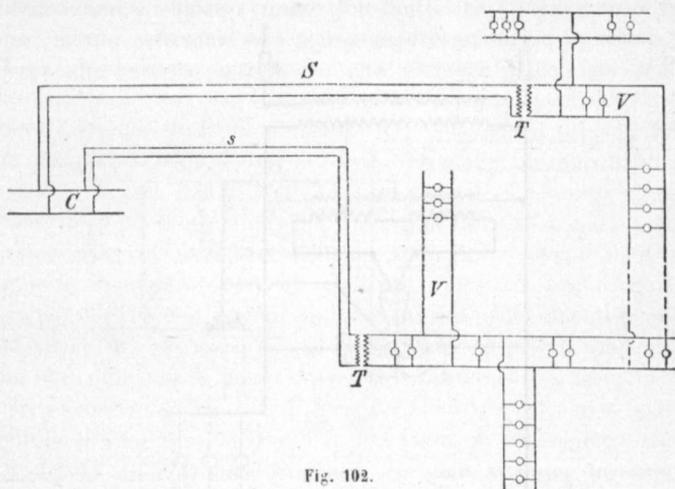


Fig. 102.

a ciascun trasformatore possono esser mantenute separate, oppure possono venir congiunte in parallelo, come è rappresentato nella figura con le linee punteggiate. Quest'ultimo sistema ha il vantaggio di poter escludere, nelle ore di minor consumo, alcuni dei trasformatori, tanto dalla conduttura d'alimentazione come pure da quella di distribuzione, diminuendo così le perdite dovute al lavoro a vuoto. D'altro canto però il concatenamento delle singole reti di distribuzione poco estese in un'unica grande rete è unito al pericolo, che un inconveniente prodottosi in una zona della città si ripercuota sulle altre zone. Per togliere questo pericolo i nodi devono essere provvisti di sicurezze fusibili. Il sistema schizzato in fig. 102 dicesi impianto di trasformatori con *sottostazioni*. L'alimentazione avviene in tal caso con pochi cavi ad alta tensione, la distribuzione invece è fatta con un'estesa rete di cavi per bassa tensione.

In opposizione a questo sistema si ha quello a *trasformatori separati*, secondo il quale ciascuna casa è provvista del proprio trasformatore e non si richiede quindi la rete secondaria di distribuzione a grossi cavi. Avendo luogo in tal caso la distribuzione ad alta tensione, il peso in

rame impiegato per la rete stradale è notevolmente minore di quello del caso precedente. In ciò consiste il vantaggio del sistema, esso però non è neppure scevro da difetti. In causa della maggiore lunghezza delle condutture ad alta tensione e delle molte diramazioni, l'isolamento riesce più difficile, inoltre l'alta tensione deve venire introdotta nelle case e la perdita di lavoro è maggiore. In tal caso non è più possibile di escludere alcuni trasformatori nelle ore di minor consumo, e poichè in tal caso abbiamo un gran numero di piccoli trasformatori, anche a pieno carico il rendimento non è così favorevole come nel sistema a sottostazioni, ove sono sufficienti pochi trasformatori di grande capacità.

Un esempio chiarirà meglio la cosa. Si abbiano complessivamente installate 100.000 lampade da 50 watt ciascuna. Col sistema a trasformatori separati la capacità complessiva dei trasformatori deve importare 5000 kilowatt. Effettivamente non avverrà mai che tutte le 100.000 lampade ardan contemporaneamente. L'esperienza ha dimostrato, che se si considera un'intera zona della città, il numero delle lampade contemporaneamente accese non supera mai il 60 % di quelle installate. Se però si tratta di una singola casa, è sempre possibile che tutte le lampade ardan contemporaneamente. Ciò avverrà forse solamente alcune volte all'anno, il trasformatore deve però esser scelto di grandezza tale che possa bastare anche in questi casi eccezionali. Dovremo quindi disporre un gran numero di piccoli trasformatori (della capacità di 2 a 10 kw. ciascuno) per una capacità complessiva di 5000 kw. Col sistema a sottostazioni invece è sufficiente un numero minore di trasformatori molto più grandi, la cui capacità complessiva sia il 60 % di 5000 kw., cioè 3000 kw. Come si può vedere dalla tabella a pagina 83 la perdita annuale ohmica è ben minore di quella dovuta all'isteresi. Per semplificare quindi il paragone fra i due sistemi considereremo solamente la perdita dovuta all'isteresi e supporremo che essa corrisponda al $2\frac{1}{2}$ % del carico totale per i piccoli trasformatori ed all' $1\frac{1}{2}$ % per quelli grandi. Per semplicità supporremo anche che tanto con l'un sistema che con l'altro non vengano esclusi singoli trasformatori nelle ore di minor consumo.

Avremo allora col sistema a trasformatori separati un consumo annuo utile di $5000 \times 300 = 1,5 \times 10^6$ kw.-ore, supponendo che ciascuna lampada resti accesa in media all'anno 300 ore. La perdita per isteresi coi trasformatori separati è di $5000 \times \frac{2,5}{100} = 125$ kw., quindi in un anno di $125 \times 8760 = 1,09 \times 10^6$ kw.-ore. Il lavoro totale fornito ai trasformatori sarà quindi, prescindendo dalla perdita ohmica $(1,5 + 1,09) 10^6 = 2,59 \times 10^6$ kw.-ore. Il rendimento annuale è quindi $1,5 : 2,59 = 58$ %, ed in realtà alquanto minore in causa della perdita ohmica nei trasformatori e nelle condutture.

Nel caso delle sottostazioni abbiamo lo stesso consumo utile d'energia, ma molto meno perdite. Per l'isteresi vanno perduti $3000 \times \frac{1,5}{100} = 45$ kw., ossia in un anno 392.000 kw.-ore. L'energia totale fornita importa quindi in un anno $(1,5 + 0,392) 10^6 = 1,892 \times 10^6$ kw.-ore, ed il rendimento annuale è dell'1,5:1,892 = 79 %; in realtà alquanto minore per le ragioni anzidette. Se calcoliamo in ambedue i casi il 2 % circa per perdita ohmica nei trasformatori e condutture, il paragone tra i due sistemi è dato dalla seguente tabella:

	Trasformatori separati	Sottostazioni
Lavoro fornito alle lampade	1.500.000	1.500.000
Perdite	1.120.000	422.000
La centrale deve sviluppare	2.620.000	1.922.000
Rendimento in %	57	78

Calcolando a 12 centesimi le spese di produzione del kw.-ora alla centrale, la perdita dovuta all'isteresi, tradotta in danaro, importa, col sistema a trasformatori separati, L. 134.400, e col sistema delle sottostazioni L. 50.640. Le spese di produzione sono quindi superiori di circa L. 84.000; nel caso dei trasformatori separati, le spese d'impianto invece sono in tal caso minori. Vogliamo calcolare di quanto deve essere minore la spesa d'impianto perchè il sistema sia più conveniente di quello con sottostazioni. In tal caso le spese di manutenzione, quelle per interessi ed ammortizzazione dei cavi e trasformatori devono dare un vantaggio di più di 84.000 lire a favore del sistema a trasformatori separati. Per queste quote possiamo calcolare il 10 % del capitale d'impianto. Il costo dei piccoli trasformatori si può calcolare a L. 84, quello dei grandi a L. 66 il kilowatt. Avremo quindi

coi trasformatori separati L. 420.000, ossia all'anno L. 42.000
 con le sottostazioni » 198.000, » » » 19.800.

La differenza di L. 22.200 è a vantaggio del sistema a sottostazioni e vanno quindi unite alle L. 84.000, il che fa L. 106.200. A parità dunque dei due sistemi questa somma deve corrispondere al 10 % del costo maggiore dei cavi nel sistema a sottostazioni. Questo costo in più importa quindi

$$106.200 : 0,1 = 1.062.000 \text{ Lire}$$

ossia L. 10,62 per lampada installata. Se il calcolo delle spese d'impianto dimostra che la spesa per la rete di distribuzione importa più di L. 10,62 in più per lampada installata nel caso delle sottostazioni, converrà scegliere il sistema a trasformatori separati. Se avessimo scelto una percentuale minore del 10 % per isteresi ed ammortizzazione avremmo ottenuto una somma maggiore di L. 10,62. Così pure questa somma sarebbe risultata

maggiore se avessimo calcolato come spese di produzione del kilowatt più di 12 centesimi. Inoltre è chiaro che il costo per la rete nei due sistemi, e quindi la loro differenza, aumenta se la potenzialità della centrale è piccola e le lampade sono molto sparse. Veniamo quindi alle seguenti conclusioni generali:

La distribuzione a mezzo di trasformatori separati è più conveniente di quella con sottostazioni nelle condizioni seguenti:

Forza a buon mercato, impianto piccolo, lampade molto sparse, cavi cari e loro quota d'ammortizzazione elevata.

Le sottostazioni sono invece da preferirsi quando la forza è cara, l'impianto è grande, le lampade sono spesse, i cavi a buon prezzo e con una piccola quota per interessi ed ammortizzazione.

Elevatore di tensione. — Negli impianti a corrente alternata con lunghe condutture d'alimentazione vengono alle volte impiegati, oltre ai

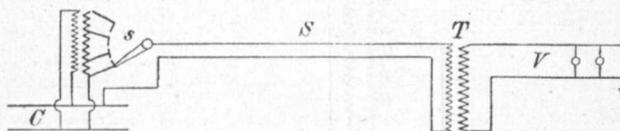


Fig. 103.

trasformatori delle sottostazioni, pure dei piccoli trasformatori nella centrale stessa, il cui compito è quello di elevare la tensione nella conduttura d'alimentazione corrispondente, di un valore uguale alla perdita ohmica di tensione nella conduttura di distribuzione e nel trasformatore a cui essa fa capo. I trasformatori vennero usati contemporaneamente a questo scopo da *Stillwell* in America e dall'autore in Inghilterra, e sono conosciuti sotto il nome di "Booster". La disposizione di questo apparecchio è rappresentata in figura 103.

C rappresenta le sbarre raccogliatrici della centrale, S è una delle condutture d'alimentazione, T il corrispondente trasformatore e V la conduttura di distribuzione da esso alimentata. Il trasformatore per elevare la tensione B ha il rocchetto primario inserito direttamente sulle sbarre raccogliatrici. L'avvolgimento secondario invece è diviso in gruppi ed unito al conduttore S a mezzo di un inseritore multiplo s, mentre l'altro conduttore della linea S è unito direttamente alla corrispondente sbarra raccogliatrice. Gli apparecchi di misura e controllo sono, come prima, ommessi nello schizzo per semplicità. Il trasformatore B, che deve elevare la tensione, viene quindi permanentemente magnetizzato ed il suo avvolgimento secondario è calcolato in modo, che è sufficiente a compensare la massima perdita di tensione. A pieno carico vengono inserite tutte le spire del

rocchetto secondario in serie con la condotta d'alimentazione disponendo la leva *s* dell'inseritore nella sua posizione più alta. A carico minore la leva *s* verrà corrispondentemente abbassata, di modo che entrerà in azione solamente una parte del rocchetto secondario. Se la leva è disposta nella posizione rappresentata in figura il rocchetto secondario è completamente escluso e la tensione al principio della condotta d'alimentazione è precisamente uguale a quella che si ha alle sbarre raccogliatrici. Questa posizione corrisponde al minimo consumo di corrente; se il consumo cresce, la leva verrà a tratti portata sui contatti superiori, di modo che la tensione si mantiene pressochè costante in tutte le condizioni di carico. Poichè la perdita di tensione nelle condutture d'alimentazione dipende dall'intensità della corrente, la posizione della leva può venir regolata a mano in base alle indicazioni dell'amperometro; possono venir anche disposti dei fili

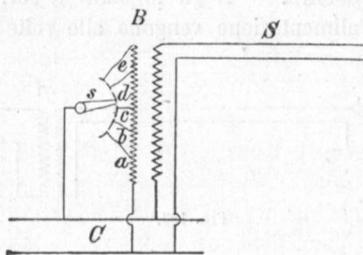


Fig. 104.

piloti che servono ad indicare, a mezzo di voltometri nella centrale, la tensione che si ha nelle sottostazioni, e si può quindi regolare la posizione della leva in base alle indicazioni del corrispondente voltmetro. In questo caso la posizione dell'inseritore può anche esser ottenuta automaticamente a mezzo di un *relais* e di un elettromotore. Va osservato che la leva di manovra, come negli inseritori d'elementi di una batteria d'accumulatori, dev'esser costituita di due parti isolate tra loro e congiunte a mezzo di una resistenza ohmica od induttiva, che impedisce la formazione di un corto circuito su uno dei gruppi di spire del rocchetto secondario durante il passaggio della leva da un contatto a quello successivo.

La necessità di far passare la totale corrente attraverso l'inseritore multiplo porta una diminuzione nella sicurezza dell'esercizio, perchè un guasto qualsiasi all'inseritore obbliga ad escludere dal servizio l'intera condotta d'alimentazione ed il trasformatore a cui essa fa capo. Per evitare questo pericolo si può costruire il trasformatore elevatore di tensione in una forma alquanto diversa, come è rappresentata in figura 104. Secondo questa disposizione la condotta principale non viene interrotta da alcun inseritore, ma essa è unita stabilmente col rocchetto secondario

del trasformatore, mentre l'inseritore multiplo viene disposto sul rocchetto primario. Il rocchetto primario è diviso nei gruppi di spire *a*, *b*, *c*, *d*, *e*. Il primo gruppo (*a*) deve contenere tante spire, che l'induzione non superi i limiti stabiliti dal riscaldamento dell'apparecchio. Per la posizione più bassa della leva *s* l'induzione è massima e quindi è un massimo pure la f. e. m. indotta nel rocchetto secondario del trasformatore. Se solleviamo la leva, cresce il numero di spire primarie e diminuisce quindi corrispondentemente l'induzione e l'aumento di tensione è minore. È quindi possibile anche in questo caso, disponendo opportunamente la leva dell'inseritore, di mantenere costante la tensione nella rete di distribuzione con un'approssimazione sufficiente in pratica. Secondo questa disposizione il circuito principale *S* non viene interrotto da alcun contatto

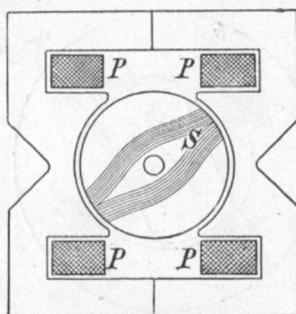


Fig. 105.

od inseritore. Quest'ultimo è disposto sul circuito primario del trasformatore *B* e può quindi esser costruito solamente per una piccola intensità di corrente; esso risulta perciò meno costoso che nel caso precedente (fig. 103). All'opposto il trasformatore riesce alquanto maggiore, perchè il solo gruppo *a* deve contenere tante spire quante ne contiene l'intero rocchetto in figura 103, e ad esso si aggiungono gli altri gruppi che possono essere formati da filo sottile. Come s'è già detto questa costruzione ha però il grande vantaggio che un guasto all'inseritore non porta l'esclusione della condotta d'alimentazione.

Si ha infine una terza costruzione di elevatori di tensione nei quali non sono necessari inseritori nè nel circuito primario nè in quello secondario. La costruzione dell'apparecchio è del tutto simile a quella di una solita dinamo bipolare. Tanto la carcassa che il nucleo del tamburo consistono di lamierini, ed i rocchetti d'eccitazione *P P* (fig. 105), costituiscono l'avvolgimento primario, che viene inserito direttamente sulle sbarre raccoglitrice. L'avvolgimento secondario *S* è disposto sull'armatura e viene inserito a mezzo di condutture flessibili in serie colla linea d'alimentazione.

Sull'albero dell'armatura è calettata una ruota elicoidale, che può esser fatta girare a mezzo di una vite perpetua, a mano od automaticamente, di 90° . In tal modo può variarsi a volontà la posizione angolare del rocchetto S a seconda dell'innalzamento di tensione che si vuole ottenere. Se il rocchetto è verticale, esso è attraversato dalla maggior parte delle linee di forza e l'aumento di tensione è quindi massimo. Girando a mezzo della vite perpetua l'armatura di 90° in modo da disporre il rocchetto orizzontalmente, le linee di forza involgono il rocchetto ma non lo attraversano e l'aumento di tensione è quindi nullo. Disponendo il rocchetto in una posizione intermedia, solamente una parte delle linee di forza involgono il rocchetto mentre le rimanenti lo attraversano, producendo così un determinato aumento di tensione. Qualora sia possibile la rotazione

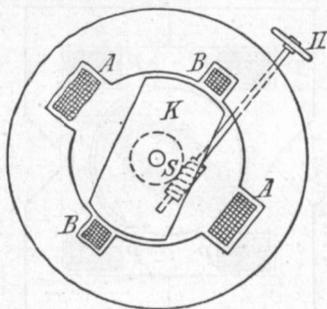


Fig. 106.

dell'armatura per un angolo maggiore di 90° , l'apparecchio può servire per ottenere tanto un aumento che una diminuzione di tensione. In confronto alle due costruzioni precedentemente descritte quella rappresentata in figura 105 ha due vantaggi. In primo luogo abbiamo nei due circuiti solamente giunzioni fisse senza inseritori ed in secondo luogo la tensione può esser regolata meccanicamente al suo giusto valore anziché a scatti e solo approssimativamente, come succede coll'impiego di un inseritore.

Nell'apparecchio ora descritto l'attacco del rocchetto S deve esser fatto a mezzo di anelli di contatto o con condutture flessibili. La figura 106 rappresenta un'altra costruzione, basata sullo stesso principio, ove però non si hanno che condutture fisse. La parte mobile è costituita da un nucleo K di lamiera senza avvolgimento che serve a guidare il flusso di forza prodotto dal rocchetto A attraverso al rocchetto B, in un senso o nell'altro. Il nucleo può essere girato a mezzo di un volantino H e del meccanismo a vite perpetua S. A seconda della sua posizione, verrà alzata od abbassata la tensione della corrente che attraversa il rocchetto B. Il rocchetto A è inserito in derivazione al generatore mentre il rocchetto B

è in serie con la condotta d'alimentazione. Anche in questo caso la regolazione della tensione può farsi esattamente ed a piacere. La figura 107 rappresenta la vista esterna di un tale regolatore di tensione, come viene costruito dalla General Electric Company.

Per alzare od abbassare la tensione di una corrente trifase si può inserire in serie con la corrispondente condotta le tre fasi dell'indotto di un motore trifase. L'indotto però in tal caso non ruota, ma viene disposto in una determinata posizione a mezzo di un volantino e di un

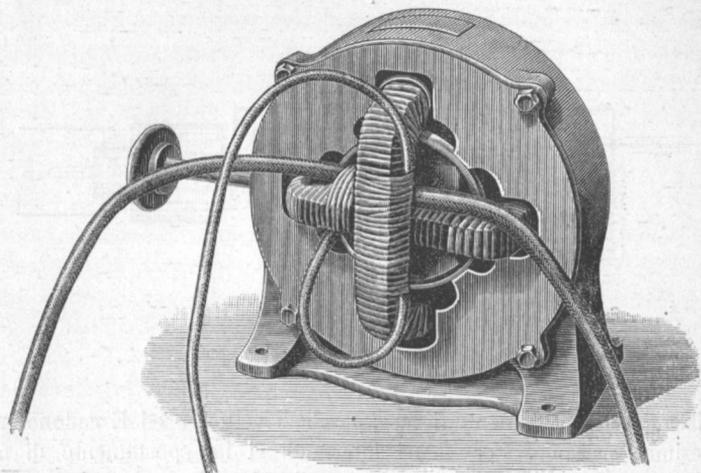


Fig. 107.

meccanismo a vite perpetua. A seconda della posizione dell'indotto la forza elettromotrice in esso indotta agisce concordemente o contrariamente a quella del generatore. La f. e. m. prodotta nell'indotto ha sempre lo stesso valore e la regolazione non avviene come nella figura 105 per effetto di una variazione del flusso di forza, ma in causa dello spostamento di fase di una costante f. e. m. L'avvolgimento induttore del motore trifase è in derivazione sul generatore, il campo rotante è quindi costante. Durante la sua rotazione, esso taglia i tre avvolgimenti dell'indotto ed induce in ciascuno di essi la stessa f. e. m., i tre massimi della f. e. m. però non si producono contemporaneamente, ma con uno spostamento reciproco di un terzo di periodo. Che il massimo della f. e. m. in una delle fasi dell'indotto avvenga contemporaneamente al massimo della f. e. m. del generatore, dipende dalla posizione reciproca fra indotto ed induttore. Questa posizione però può venire variata a mezzo del volantino e si può quindi portare la f. e. m. dell'indotto in una fase comunque spostata rispetto alla f. e. m. del generatore. Sia E la tensione del generatore ed e

quella contemporanea dell'indotto del motore, è chiaro che la tensione nella conduttura può esser portata ad un valore qualunque E , compreso tra $E + e$ ed $E - e$, come si riconosce facilmente dal piccolo diagramma della figura 108. Il raggio del cerchio punteggiato rappresenta la tensione dell'indotto. A seconda della posizione dell'indotto, e trovasi in posizione tale, che la tensione nella conduttura viene aumentata o diminuita. Effettivamente si ha pure un piccolo spostamento di fase della corrente e questo è positivo o negativo a seconda che e giace da una parte o dall'altra dell'orizzontale. Solamente per i valori massimo e minimo di E ,

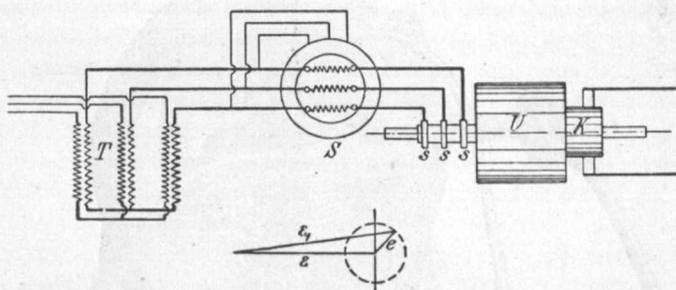


Fig. 108.

sparisce questo spostamento di fase, perchè i vettori e ed E cadono nella medesima direzione. Per valori intermedi si ha spostamento di fase. Questo però non è uno svantaggio, perchè detto spostamento è per se stesso piccolo, ed inoltre perchè questo piccolo valore può essere utilizzato, scegliendo opportunamente la posizione di e , per diminuire il primitivo spostamento di fase. Come si vede il motore trifase con indotto fisso non è altro che un trasformatore, il cui flusso di forza anzichè oscillare in un telaio rettangolare, ruota in un telaio cilindrico.

L'impiego di un tale trasformatore per regolare la tensione di un radrizzatore è rappresentato in figura 108. T è il trasformatore principale, che riceve la corrente ad alta tensione da una conduttura d'alimentazione e fornisce col suo avvolgimento secondario la corrente per l'azionamento del radrizzatore alla tensione corrispondente a quella desiderata nel circuito a corrente continua. A seconda della costruzione del radrizzatore la tensione concatenata della corrente alternata importa il 60 al 66 % della tensione richiesta per la corrente continua. Il rapporto di trasformazione può venir modificato solo in piccola parte a mezzo dell'eccitazione del campo del radrizzatore. Volendo variare la tensione della corrente continua è necessario variare la tensione della corrente alternata ed all'uopo serve il trasformatore di regolazione S . Il cerchio

esterno rappresenta il suo induttore, quello interno il suo indotto. I tre avvolgimenti sono rappresentati con tre rocchetti paralleli tra loro. In realtà questi rocchetti od avvolgimenti non hanno questa posizione geometrica, ma la loro inserzione è a stella senza unione al punto neutro, oppure a triangolo senza unione agli angoli; ho scelto però la rappresentazione più semplice per evitare gli incroci dei fili. U è l'indotto del radriizzatore, s sono i suoi anelli di contatto e K il suo collettore. È evidente che sull'indotto del trasformatore regolatore deve agire un considerevole momento torcente, perchè qualora esso non fosse trattenuto dalla ruota elicoidale dovrebbe ruotare come l'armatura di un motore. Negli apparecchi grandi è quindi necessaria, specialmente in una direzione, una forza considerevole per trattenere l'indotto. Per evitare questa difficoltà, si può disporre di fianco due di questi trasformatori accoppiando meccanicamente i loro indotti (Questa disposizione venne usata per la prima volta nell'impianto di Paderno dalla ditta *Siemens & Halske*). Disponendo quindi gli induttori in modo che i due campi girino in senso inverso, i momenti torcenti che agiscono sugli indotti si equilibreranno e sarà quindi necessaria una piccola forza per mantenere ferme le armature. È chiaro che anche questo apparecchio può esser fatto agire a mano oppure automaticamente a mezzo di un *relais* e di un elettro-motore.

Inserzione in serie. — I trasformatori possono anche essere utilmente impiegati in circuiti a intensità costante per inserzione di lampade in

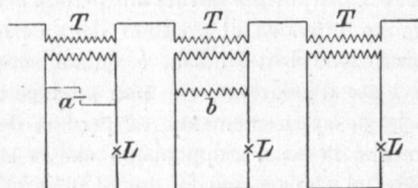


Fig. 109.

serie. Inserendo le lampade stesse in serie, l'isolamento di ogni singola lampada dovrebbe corrispondere alla tensione totale, ciò che praticamente non è possibile di ottenere in circuiti estesi. Alimentando però le lampade con trasformatori inseriti in serie, è sufficiente che l'isolamento dei trasformatori corrisponda alla tensione complessiva; l'isolamento delle lampade invece può corrispondere solamente alla tensione di funzionamento delle lampade stesse. La disposizione è rappresentata in figura 109. T rappresentano i trasformatori ed L le lampade. La condotta di ritorno non è disegnata. Questa disposizione ha tuttavia un inconveniente. Se per un guasto al filamento di carbone di una lampadina, per la caduta

dei carboni in una lampada ad arco o per un'altra causa qualunque viene interrotto il circuito secondario di un trasformatore, se il trasformatore è di costruzione ordinaria, in esso cresce notevolmente l'induzione nel ferro e la tensione primaria di reazione. La corrente primaria, in causa delle altre lampade, deve esser mantenuta costante, il che è solamente possibile aumentando corrispondentemente la tensione della macchina. In conseguenza di ciò il trasformatore posto fuori di servizio deve notevolmente riscaldarsi e finalmente bruciare. Per evitare ciò è necessario aprire al circuito secondario un'altra via oltre quella attraverso la lampada; questo può ottenersi in due modi. Possiamo disporre in *a*, come in figura 99, una sicurezza automatica, consistente di due elettrodi, separati, in via normale, da un sottile foglio di carta paraffinata o di mica. Fin tanto che la lampada arde fra gli elettrodi agisce la tensione normale corrispondente alla lampada, cui resiste perfettamente lo strato isolante. Se però la corrente attraverso la lampada viene interrotta, cresce la tensione e si produce una scarica attraverso il coibente. Gli elettrodi si toccano e chiudono in corto circuito il rocchetto secondario. In tal modo si evita il pericolo di un abbruciamento del trasformatore.

Un altro metodo per ottenere lo stesso scopo, consiste nell'impiego di un rocchetto d'induzione *b*, inserito parallelamente alla lampada. Allora attraverso questo rocchetto passa una corrente che è proporzionale alla tensione ai morsetti (in questo caso alla tensione della lampada), ed in ritardo su di essa di circa 90°. L'energia consumata nel rocchetto d'induzione è quindi esclusivamente dovuta alle perdite nel ferro e ohmica; essa è quindi di molto inferiore al prodotto della corrente per la tensione. Con una costruzione ben studiata è quindi sempre possibile di disporre di un rocchetto d'induzione, che non produce una notevole perdita d'energia, anche se apparentemente va perduta della corrente. Un esempio chiarirà meglio la cosa. Supponiamo che la lampada consumi 35 volt e 20 ampère ed abbia come fattore di potenza 80%. L'energia effettivamente consumata è quindi 560 watt. Il rocchetto d'induzione sia costruito in modo che a 35 volt sia pure attraversato da 20 ampère, ma con una perdita d'energia di soli 20 watt. Il fattore di potenza sarà quindi $20 : (35 \times 20) = 2,85\%$. Disegnando il diagramma vettoriale si trova, che il trasformatore deve fornire una corrente di 36 ampère. Se ora la lampada viene esclusa dal circuito, il rocchetto d'induzione deve lasciar passare tutti i 36 ampère, ciò che porta un aumento di tensione fino a $35 \times \frac{36}{20} = 63$ volt. Nella stessa proporzione il trasformatore viene sollecitato anche magneticamente, cioè con un aumento dell'80%. Questo aumento di sollecitazione non è però così considerevole da far temere conseguenze dannose.

Talvolta avviene che un trasformatore sia impiegato ad alimentare un certo numero di lampade inserite in serie, nel qual caso è necessario mantenere costante la intensità della corrente secondaria variando il numero delle lampade. Questo fatto può raggiungersi mantenendo costante la corrente primaria e disponendo in serie gli avvolgimenti primari dei singoli trasformatori. Quest'inserzione però richiede l'impiego di disposizioni di sicurezza, come venne più su ricordato. Volendo evitare tali disposizioni si può inserire l'avvolgimento primario in derivazione sul circuito primario, in questo caso però un trasformatore con piccola dispersione magnetica non si presterebbe, perchè un tale trasformatore mantiene costante la tensione e non l'intensità della corrente, mentre coll'inserzione delle lampade in serie è appunto l'intensità della corrente che dev'essere mantenuta costante e la tensione deve invece variare col numero delle lampade inserite. Questa condizione può venire approssimativamente adempiuta, costruendo espressamente il trasformatore in modo, che esso abbia

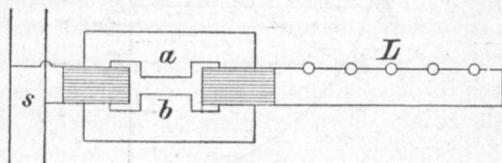


Fig. 110.

molta dispersione magnetica. In una tale disposizione (fig. 110), la carcassa del trasformatore (1) è dotata di sporgenze *a* e *b*, fra le quali si stabilisce un considerevole campo di dispersione, quando i due rocchetti sono attraversati dalla corrente. Il rocchetto primario è inserito in derivazione sulla condotta d'alimentazione *s*, ed il rocchetto secondario è unito alla condotta *L* delle lampade. Le lampade sono inserite tutte in serie, ciascuna di esse però può essere messa in corto circuito e così posta fuori di servizio. È senz'altro chiaro, che a circuito secondario aperto il campo di dispersione tra *a* e *b* deve essere quasi trascurabile, perchè le linee di forza possono seguire il loro naturale percorso attraverso il rocchetto secondario. Se però questo rocchetto è attraversato da una corrente, le linee di forza vengono respinte e scelgono la via attraverso le sporgenze *a* e *b* ed attraverso l'aria. Quanto più intensa è la corrente e tanto maggiore è il numero delle linee di forza respinte dal rocchetto, cioè tanto minore è la f. e. m. indotta nel rocchetto secondario. Chiudendo in corto circuito una lampada, a f. e. m. costante, in causa della diminuita resistenza dovrebbe salire l'intensità della corrente. L'aumento

(1) Vedi anche la figura 84.

dell'intensità della corrente produce tuttavia un aumento del campo di dispersione ed una diminuzione corrispondente della f. e. m.; si otterrà così, almeno approssimativamente, una regolazione ad intensità costante nel circuito secondario. I limiti entro cui ciò si verifica, si possono determinare con un diagramma vettoriale (fig. 111). Sia OA la corrente ed OE_2 la tensione ai morsetti secondari a pieno carico (numero massimo di lampade). Il carico è ammesso non induttivo. Sia poi E_2E_1 il vettore della f. e. m. dovuta alla autoinduzione ed alla resistenza, allora OE_1 rappresenterà il vettore della tensione ai morsetti primari. La lunghezza della linea E_2E_1 è proporzionale all'intensità della corrente. Se ora vengono chiuse in corto circuito tante lampade, che è sufficiente solamente la metà della tensione per l'alimentazione della condotta delle lampade,

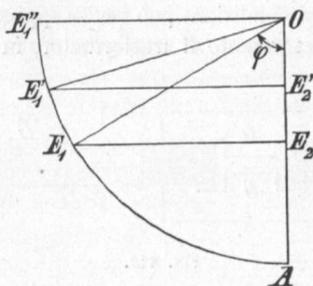


Fig. 111.

il punto E_2 si sposta in E'_2 ed E_1 in E'_1 . La corrente è quindi proporzionale al tratto $E'_2E'_1$ quindi alquanto maggiore di prima. Se l'intera condotta delle lampade viene chiusa in corto circuito, E_2 coincide con O e la intensità della corrente è proporzionale ad OE''_1 . L'aumento della intensità della corrente da pieno carico al corto circuito è quindi dato dal rapporto tra E_2E_1 ed OE''_1 , ed è chiaro, che con un'opportuna costruzione del trasformatore per una forte dispersione (per cui φ risulta grande), possiamo rendere piccolo quanto vogliamo l'aumento dell'intensità della corrente quando diminuisce il carico. Il trasformatore però diviene relativamente grande e costoso. Anche il suo rendimento risulta minore che in un tipo con piccola dispersione, che si presta per l'alimentazione di lampade inserite in parallelo. Va anche osservato, che questo modo di regolazione ad intensità costante è molto meno efficace quando le lampade possiedono autoinduzione, ciò che si può tosto riconoscere dal fatto, che nel diagramma della figura 111 il vettore OE_2 non si mantiene verticale ma diventa inclinato e quindi la differenza fra le lunghezze E_2E_1 ed OE''_1 riesce notevolmente maggiore.

Rocchetti d'induzione. — Con lampade inserite in parallelo i rocchetti d'induzione costituiscono un mezzo molto comodo di regolare la tensione della lampada. Se la lampada richiede una tensione minore di quella che regna fra i fili d'alimentazione della lampada stessa, si può moderare in certo qual modo la tensione eccedente inserendo un rocchetto d'induzione. Lo stesso scopo si può veramente raggiungere anche con una resistenza ohmica, ma in tal caso si verifica una perdita d'energia eguale al prodotto dell'intensità della corrente per la tensione assorbita dalla

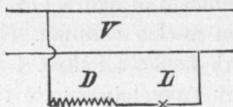


Fig. 112.

resistenza. Impiegando invece un rocchetto d'induzione in luogo di una semplice resistenza ohmica la perdita d'energia apparente è eguale a questo prodotto, ma la perdita effettiva in causa dello spostamento di fase è molto minore.

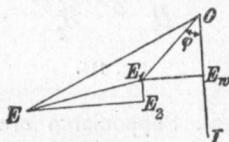


Fig. 113.

L'uso di un rocchetto d'induzione è rappresentato schematicamente nella figura 112. *V* è la conduttura di distribuzione, *D* il rocchetto d'induzione ed *L* la lampada. La figura 113 rappresenta il diagramma vettoriale corrispondente. *OI* è l'intensità della corrente ed *OE_w* la componente attiva della tensione. Il tratto *OE₁* rappresenta la tensione che ha luogo fra i morsetti della lampada, mentre φ è lo spostamento di fase. Ove si trattasse di una lampadina ad incandescenza *E₁* ed *E_w* coinciderebbero, perchè $\varphi = 0$. Con una lampada ad arco invece ha luogo spostamento di fase ed *OE₁* è maggiore di *OE_w*. La tensione necessaria a coprire le perdite che si verificano nel rocchetto d'induzione è rappresentata dal vettore *E₁E₂* e la sua forza controelettromotrice da *E₂E*. Il vettore *E₁E* rappresenta quindi la tensione ai morsetti del rocchetto d'induzione ed *OE* è il vettore della tensione fra i conduttori della rete di distribuzione.

Rocchetti di compensazione. — La disposizione schizzata in figura 112 si applica quando una lampada ad arco deve venire alimentata da un circuito a corrente alternata la cui tensione è maggiore di quella di funzionamento

della lampada. Per un arco a corrente alternata è sufficiente una tensione di 30 a 35 volt. Si potrebbe quindi inserire in serie tre di queste lampade in un circuito a 110 volt. Se però non è necessaria che una lampada, la tensione eccedente deve venire assorbita da un rocchetto di induzione nel modo prima indicato.

Supponiamo ora che tra i due fili della conduttura abbia luogo la tensione corrispondente a due lampade inserite in serie, cioè di circa 65 volt. Perchè possa ardere separatamente l'una o l'altra lampada, si può usare la disposizione indicata in figura 114. D_1 e D_2 sono due avvolgimenti sovrapposti con un nucleo comune. Nella figura essi sono per semplicità disegnati l'uno di fianco all'altro. I due rocchetti sono riuniti nel punto o ed il senso dell'avvolgimento è tale che una corrente che scorre da sinistra a destra in D_1 induce in D_2 una f. e. m. agente da

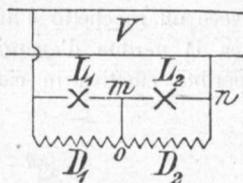


Fig. 114.

destra a sinistra e viceversa. Supponiamo ora che una delle lampade, p. es. L_1 sia esclusa, allora la corrente attraversa il rocchetto D_1 fino al punto o ove le si presentano aperte due vie, l'una attraverso D_2 e l'altra attraverso la lampada L_2 . È chiaro che la prima di queste vie non è accessibile alla corrente, perchè la f. e. m. indotta in D_2 è opposta alla sua direzione e produce essa pure una corrente che attraversa la lampada. I due rocchetti possono quindi venire considerati come un trasformatore il cui rapporto di trasformazione è 1:1 ed ove D_1 è l'avvolgimento primario e D_2 quello secondario. Supponiamo che le lampade consumino 12 ampère, allora, ammesso un rendimento del 100% nel trasformatore, attraverso il rocchetto D_1 passerebbe una corrente di 6 ampère ed attraverso D_2 passerebbe una corrente eguale ma di direzione opposta. Le due correnti si sommano in o e così la lampada L_2 riceve una corrente di 12 ampère. In n questa corrente si suddivide un'altra volta e cioè 6 ampère vanno al rocchetto D_2 e 6 ampère vanno all'altro polo della conduttura. Poichè il rendimento dell'apparecchio dev'essere alquanto minore del 100%, D_2 porterà un po' meno della metà della corrente della lampada, ovvero, ciò che torna lo stesso, la conduttura deve dare un po' più della metà della corrente della lampada. La differenza in più serve a coprire le perdite.

È quindi possibile, coll'inserire in parallelo un trasformatore, rendere indipendenti due lampade pur essendò inserite in serie. Il trasformatore porta tre morsetti $p o n$, dei quali o è comune ai due rocchetti. Esso agisce in tal caso come una disposizione elettromagnetica di compensazione fra due circuiti. Lo stesso principio si può anche applicare a più di due circuiti. Così, p. es., in figura 115 sono inserite in serie tre lampade alimentate dalla condotta V . Il trasformatore è in tal caso provvisto di tre rocchetti avvolti l'uno sull'altro ed aventi un nucleo comune. La corrente della lampada sia ancora di 12 ampère e sieno escluse le lampade L_2 ed L_3 .

Allora attraverso D_2 e D_3 scorre una corrente di poco più di 4 ampère, la quale induce in D_1 una corrente poco inferiore ad 8 ampère, che si somma alla corrente primaria, di modo che la lampada viene alimentata con la corrente normale di 12 ampère. Questi trasformatori

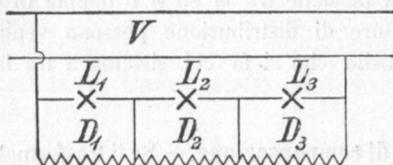


Fig. 115.

sono molto usati per l'alimentazione di lampade ad arco in installazioni private, perchè essi permettono di riunire i vantaggi dell'inserzione in serie con l'indipendenza delle singole lampade. Anche la capacità del trasformatore è minore di quella di un trasformatore per ciascuna lampada, come risulta dalle seguenti considerazioni. Sia e la tensione nella condotta di distribuzione e P l'energia richiesta da una lampada quando consuma la corrente normale i . Allora l'energia fornita dal trasformatore per $\cos \varphi = 1$ secondo la disposizione della figura 114 è $e \times \frac{i}{2} = \frac{P}{2}$, mentre quella di due trasformatori separati sarebbe $2 \times \frac{e}{2} \times i = P$. Con altre parole: il trasformatore comune a due lampade inserite in serie non contiene più materiale di un comune trasformatore per una lampada inserita in parallelo. Secondo la disposizione della figura 115 il trasformatore deve essere costruito per la tensione e e la corrente di intensità $\frac{2}{3} i$. L'impiego di materiale corrisponde quindi ad una capacità di $\frac{2}{3} P$, mentre l'energia assorbita da tre trasformatori separati sarebbe $3 \times \frac{i}{3} \times e = P$. L'impiego di un trasformatore comune è quindi conveniente anche in questo caso.

Sistema a tre fili. — Trasformatori con avvolgimento secondario combinato possono venire anche convenientemente usati per distribuire la corrente secondo il sistema a tre fili. L'avvolgimento primario, che riceve la corrente ad alta tensione dalla condotta d'alimentazione s (fig. 116), porta solamente due morsetti p, q . L'avvolgimento secondario invece porta tre morsetti m, o, n , dei quali o è comune ai due ponti della rete

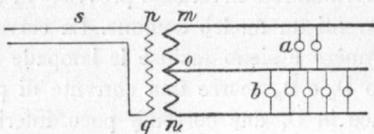


Fig. 116.

di distribuzione. La tensione tra m ed n è doppia di quella dei circuiti a e b , e le condutture di distribuzione possono venir fatte più sottili analogamente a quello che si fa col sistema a tre fili per la corrente continua.

Trasformatore di compensazione. — Se il trasformatore è posto ad una certa distanza dalla propria zona d'alimentazione, non è necessario condurre il filo neutro fino al trasformatore, ma si può ottenere la compensazione fra i due ponti del sistema a tre fili mediante uno speciale

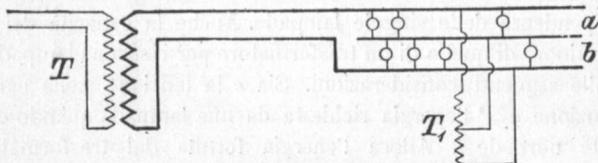


Fig. 117.

trasformatore di compensazione analogo a quello della figura 114 posto nel luogo di consumo. L'impianto consta quindi del trasformatore principale T posto nella sotto-stazione (fig. 117), e di un piccolo trasformatore di compensazione T_1 , che può essere disposto nel centro della zona d'alimentazione. La capacità di questo trasformatore non è necessario che sia maggiore della metà della differenza tra la carica dei due circuiti. Sia i_a l'intensità massima della corrente nel circuito a ed i_b l'intensità della corrente che ha luogo contemporaneamente nel circuito b , allora uno dei rocchetti del trasformatore di compensazione deve assorbire la corrente $\frac{i_a - i_b}{2}$ mentre l'altro rocchetto deve fornire una corrente d'eguale intensità. Se e è la tensione in ciascuno dei due circuiti, l'energia for-

nita dal trasformatore di compensazione è $\frac{i_a - i_b}{2} e$. In quel momento l'energia fornita dal trasformatore principale è invece $\frac{i_a + i_b}{2} 2e$; siccome però è anche possibile che in certi istanti ambedue i circuiti portino il massimo carico il trasformatore principale deve essere costruito per la capacità $2 i_a e$. Se indichiamo con p il rapporto fra la differenza di carico ed il carico massimo di un circuito, cioè se $i_b = (1 - p) i_a$, il trasformatore di compensazione deve essere costruito per la capacità $\frac{p}{2} i_a e$, e la sua grandezza starà a quella del trasformatore principale nel rapporto di $2 : \frac{p}{2} = 4 : p$. Se le differenze di carico sono quindi del 100, 50, 20 e 10 % il trasformatore di compensazione dovrebbe avere rispettivamente $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{40}$ della capacità del trasformatore principale. Si vede adunque che con un trasformatore di compensazione relativamente molto piccolo si può evitare il filo neutro tra la zona d'alimentazione e la sottostazione.

Sistema di distribuzione Scott. — Un altro impiego dei trasformatori viene fatto per trasformare un sistema bifase in trifase e viceversa. La disposizione rappresentata in figura 118 è quale venne indicata da *C. F. Scott* (1).

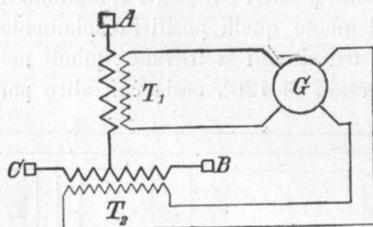


Fig. 118.

G rappresenta un generatore bifase, sui due circuiti del quale sono inseriti i rocchetti primari di due trasformatori separati T_1 e T_2 . I rocchetti secondari, come lo indica la figura, sono uniti tra loro e portano tre morsetti A, B, C per le condutture esterne. Poichè le correnti primarie in T_1 e T_2 sono spostate tra loro di 90° , le f. e. m. nei due rocchetti secondari sono pure spostate di 90° . La f. e. m. agente nel circuito esterno A B si compone quindi di due componenti e cioè di quella che si forma nel rocchetto secondario di T_1 , e di quella che si forma nella metà del

(1) *The Electrician*, aprile 6, 1894.

rochetto secondario di T_2 . Sieno OA e BO in figura 119 queste componenti, BA ne sarà la risultante, cioè la f. e. m. fra B ed A. Analogamente rappresenta CA la f. e. m. agente fra C ed A. La f. e. m. fra B e C è BC. È senz'altro chiaro, che scegliendo opportunamente il numero delle spire

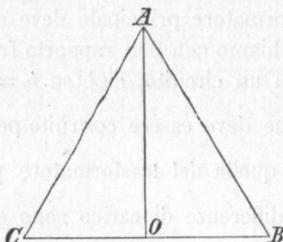


Fig. 119.

dei rocchetti secondari si può far in modo che le tre risultanti riescano eguali in grandezza. Perchè ciò abbia luogo deve essere $OB = \frac{1}{2} AB$.

Allora $OA = AB \sqrt{\frac{3}{4}}$, cioè $OA = 0,867 AB$, e la figura 119 risulta un triangolo equilatero. In un diagramma vettoriale quindi le tre f. e. m. si annullano in intervalli di 60° , cioè due volte ciascuna in un intero periodo. Analogamente i massimi positivi e negativi si seguono in intervalli di 60° , e se consideriamo solamente quelli positivi o solamente quelli negativi, in intervalli di 120° . I tre circuiti si trovano quindi nelle identiche condizioni di fase in intervalli di 120° , ossia con altre parole, esiste tra essi

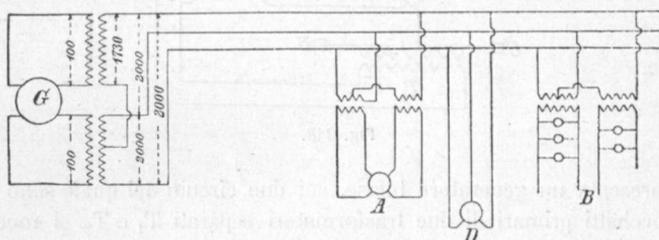


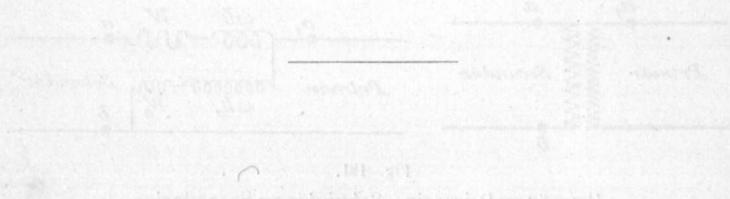
Fig. 120.

uno spostamento di fase di 120° . Come si vede adunque per mezzo della disposizione speciale dei trasformatori la corrente bifase è stata trasformata in corrente trifase.

Il vantaggio che attribuisce lo Scott al suo sistema, è che la produzione e consumo della corrente può venir fatta con due fasi, mentre il trasporto può essere a tre fasi; il primo di questi fatti facilita la regolazione

quando si ha esercizio misto di motori e lampade, mentre il secondo fatto permette un'economia nella condotta di trasmissione. La disposizione dell'impianto secondo lo Scott è rappresentata in figura 120.

G è un generatore bifase, la cui tensione di 100 volt viene trasformata nei trasformatori a 2000 e 1720 volt, di modo che fra due qualunque dei fili della condotta d'alimentazione sussiste la tensione di 2000 volt. Nel luogo di consumo viene nuovamente trasformata la corrente trifase a seconda del bisogno in corrente bifase a 100 volt per l'alimentazione di motori o di lampade (A e rispett. B) oppure viene impiegata direttamente la corrente trifase per l'azionamento di motori, D. Ad onta del concatenamento dei circuiti la regolazione a tensione costante nelle lampade non offre maggiori difficoltà, che se le lampade fossero alimentate direttamente dal generatore.



CAPITOLO DECIMO

Il trasformatore ed i suoi circuiti. — Costanti elettriche delle condutture. — Risonanza. — Aumento di tensione per risonanza. — Fulminazione di cavi in reti estese.

Il trasformatore ed i suoi circuiti. — Un trasformatore non trova mai impiego da se solo, ma solamente in unione ad altri apparecchi. Esso costituisce in certo qual modo l'anello di congiunzione fra due circuiti, ciascuno dei quali può contenere f. e. m. resistenza, autoinduzione e capacità. A seconda che queste proprietà sono più o meno sviluppate l'una rispetto all'altra, anche la condizione di lavoro del trasformatore verrà alterata, e

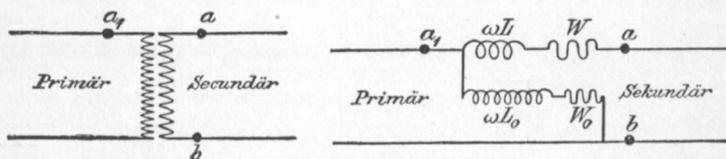


Fig. 121.

Primär = Primario. *Sekundär* = Secondario.

quindi per studiare il suo modo di comportarsi, non dobbiamo considerarlo come apparecchio in se stesso, ma come parte di un intero sistema. Per una tale considerazione è opportuno rappresentare in modo semplice le proprietà elettriche del trasformatore. Per ottenere tale rappresentazione supporremo che il rapporto di trasformazione sia di 1 : 1. Tale premessa è lecita, se consideriamo ciascuno dei due circuiti a sè. Se però il rapporto di trasformazione è 1 : 1, i due circuiti possono venire uniti elettricamente ed il trasformatore può essere sostituito da un gruppo di rocchetti, dotati di resistenza e di induttanza, disposti in modo e di grandezza tale, che le condizioni di lavoro nei due circuiti sieno esattamente le medesime di quelle che si hanno con l'interposizione di un vero trasformatore avente il rapporto di trasformazione 1 : 1. La parte sinistra della figura 121 rappresenta il vero trasformatore, quella a destra invece rappresenta la disposizione equivalente di induttanza e resistenza.

In ambedue i casi ab sono i morsetti del circuito alimentato o secondario fra i quali sussiste la tensione e . La corrente a vuoto sia i_0 , la sua

componente attiva sia i_h e la sua componente oziosa i_μ . La corrente trasmessa nel circuito alimentato sia i . Nel vero trasformatore verrà trasformata in calore l'energia

$$P_c = e i_h = \omega_1 i_h^2$$

cioè, quest'energia verrà consumata per riscaldare il ferro. La perdita ohmica a vuoto è così piccola, che possiamo senz'altro trascurarla, ovvero supporla inclusa nella perdita dovuta all'isteresi. Per tener conto di queste perdite anche nella disposizione segnata nella parte destra della figura 121, dobbiamo supporre inserita una resistenza W_0 fra i conduttori del circuito primario. La sua grandezza risulta dalla condizione

$$W_0 i_0^2 = e i_h.$$

Se ωL_1 è l'induttanza nel rocchetto primario del vero trasformatore a vuoto, avremo

$$e = i_\mu \omega L_1.$$

Per ottenere lo stesso effetto di L_1 nella disposizione equivalente al trasformatore, dobbiamo inserire l'induttanza ωL_0 in serie con W_0 . Le grandezze W ed ωL_0 si determinano con la seguente considerazione. Nella disposizione equivalente e è la risultante della componente oziosa $e_s = \omega L_0 i_0$ e della componente attiva $e_w = W_0 i_0$. Nel vero trasformatore i_0 è la risultante della componente oziosa i_μ e della componente attiva i_h . Avremo quindi

$$W_0 i_0^2 = e i_h$$

$$W_0 = \frac{e}{i_0} \cdot \frac{i_h}{i_0}.$$

I valori di i_0 ed i_h per una data tensione primaria vanno calcolati secondo il procedimento indicato al capitolo IV. Se P indica il carico primario in k. v. a. e λ il valore della corrente a vuoto in percento della corrente normale, in modo cioè da avere

$$\lambda = 100 \frac{i_0}{i}$$

avremo $P = e i 10^{-3}$ e $\frac{1}{i_0} = \frac{100}{\lambda i}$

$$\frac{1}{i_0} = \frac{100}{\lambda P} \frac{e}{1000}$$

$$W_0 = \frac{1}{\lambda P} \left(\frac{e}{1000} \right)^2 \left(\frac{i_h}{i_0} \right) 10^5 \dots \dots \dots (28)$$

Così pure abbiamo

$$i_0 e_s = i_\mu e$$

$$\omega L_0 i_0^2 = i_\mu e$$

$$\omega L_0 = \frac{e}{i_0} \frac{i_\mu}{i_0}$$

$$\omega L_0 = \frac{1}{\lambda P} \left(\frac{e}{1000} \right)^2 \left(\frac{i_\mu}{i_0} \right) 10^5 \dots \dots \dots (29)$$

Fino a tanto che si tratta del funzionamento a vuoto è quindi possibile in base ai dati del vero trasformatore, cioè la tensione e la corrente a vuoto con le sue componenti, calcolare la resistenza ed induttanza della disposizione equivalente.

In modo analogo queste costanti possono venire determinate per il funzionamento sotto carico. Nella figura 121 esse sono indicate con W ed ωL . Se W_1 è la resistenza nel rocchetto primario, W_2 quella nel secondario ed n_1, n_2 i corrispondenti numeri di spire, W riferito al circuito primario sarà dato da

$$W = W_1 + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 W_2 \dots \dots \dots (30)$$

Per determinare l'induttanza ωL facciamo il seguente ragionamento. Quando si abbia una perdita di tensione induttiva

$$e_{s1} + \frac{n_1}{n_2} e_{s2} = e_s$$

sarà

$$\omega L i = e_s$$

In questa formola i è la corrente primaria che si può calcolare dalla relazione

$$i = \frac{1000 P}{e}$$

È opportuno esprimere in percento la perdita induttiva di tensione, di modo che se σ rappresenta la percentuale avremo

$$\sigma = 100 \frac{e_s}{e}$$

$$\omega L i = \frac{\sigma e}{100}$$

$$\omega L \frac{1000 P}{e} = \sigma \frac{e}{100}$$

$$\omega L = \frac{\sigma}{P} \left(\frac{e}{1000}\right)^2 10 \dots \dots \dots (31)$$

Un esempio chiarirà meglio l'impiego di questa formola. A tal uopo consideriamo un trasformatore da 20 k. v. a. per $\lambda = 45$; tensione primaria 3000 volt, rapporto di trasformazione 25 (quindi per il funzionamento a vuoto 3000 : 120 v.), corrente a vuoto 3,3 %, perdita nel ferro 300 watt e perdita ohmica a pieno carico 300 watt. La perdita induttiva di tensione sia del 4 % a pieno carico. A parità di perdita ohmica nei due avvolgimenti abbiamo $W_1 = 3,37$; $W_2 = 0,0054$. Per questo trasformatore le costanti elettriche riferite al circuito primario sono le seguenti:

$P = 20$	$\lambda = 3,3$	$\sigma = 4$
$\frac{e}{1000} = 3$	$i = 6,67$	$W = 6,75$
$i_0 = 0,22$	$i_h = 0,1$	$i_\mu = 0,196$

Pel funzionamento a vuoto W_0 si calcola dalla (28)

$$W_0 = 6200 \text{ ohm}$$

ed ωL_0 dalla (29)

$$\begin{aligned} \omega L_0 &= 12100 \text{ ohm} \\ L_0 &= 43 \text{ henry.} \end{aligned}$$

Il trasformatore a vuoto agisce quindi come un rocchetto avente la resistenza ohmica di 6200 ohm ed un coefficiente d'autoinduzione di 43 henry. Questo rocchetto è posto in derivazione sulla conduttura d'alimentazione. In serie con uno dei conduttori si ha inoltre un secondo

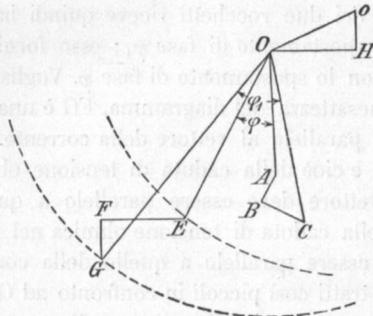


Fig. 122.

rocchetto avente la resistenza ohmica W ed il coefficiente d'autoinduzione L . Questi due ultimi valori si ricavano dalle equazioni (30) e (31)

$$\begin{aligned} W &= 6,75 \text{ ohm} \\ \omega L &= 18 \text{ -} \\ L &= 0,064 \text{ henry.} \end{aligned}$$

Se il rapporto di trasformazione fosse di 1 : 1, nel circuito secondario si avrebbe una tensione, che si può determinare togliendo in senso vettoriale dalla tensione di 3000 volt, quella tensione che va perduta nel rocchetto ($W, \omega L$). La corrente primaria si potrebbe ottenere sommando in senso vettoriale alla corrente secondaria di 6,67 ampère la corrente a vuoto di 0,22 ampère. Poichè però il rapporto di trasformazione è effettivamente di 25 : 1, la corrente secondaria risulta di $25 \times 6,67 = 166,75$ ampère e la tensione secondaria è soltanto $1/25$ di quella indicata più sopra.

Che la disposizione rappresentata in figura 121 di due rocchetti inseriti l'uno in derivazione e l'altro in serie con la conduttura, sostituisca perfettamente il vero trasformatore, risulta senz'altro dal diagramma vettoriale. Sia OA in figura 122 la corrente fornita agli apparecchi di consumo, OE la sua tensione e φ lo spostamento di fase esistente, che dipende naturalmente soltanto dal carattere degli apparecchi di consumo.

Facciamo

$$EF = \omega L i$$

$$FG = W i.$$

Allora OG rappresenta la tensione esistente fra i morsetti $b a$, in figura 121, ed è pure eguale alla tensione fra i punti $a b$ pel funzionamento a vuoto.

Tracciamo

$$AB = i_n$$

parallelo ad OG e

$$BC = i_\mu$$

normale ad OG, allora OC rappresenta la corrente che attraversa il morsetto a_1 . Il gruppo dei due rocchetti riceve quindi la corrente OC e la tensione OG con lo spostamento di fase φ_1 ; esso fornisce la corrente OA e la tensione OE con lo spostamento di fase φ . Vogliamo ancora far presente una piccola inesattezza del diagramma. FG è una componente attiva e va quindi segnata parallela al vettore della corrente. Ora FG in realtà consta di due parti, e cioè della caduta di tensione ohmica nel rocchetto secondario, il cui vettore deve essere parallelo a quello della corrente secondaria OA e della caduta di tensione ohmica nel rocchetto primario, il cui vettore deve essere parallelo a quello della corrente primaria OC. Però AB e BC sono tratti così piccoli in confronto ad OA, che i vettori OC ed OA cadono molto approssimativamente nella stessa direzione e possiamo quindi senz'altro segnare FG parallelo al vettore OA. Un errore analogo abbiamo tollerato anche nel dedurre il metodo per determinare graficamente la caduta di tensione. Ed infatti la figura 122 è in parte una ripetizione del diagramma indicato in figura 76, come risulta evidente, quando si tiri OH eguale e parallelo ad FE ed $H o$ eguale e parallelo a GF. I cerchi segnati, aventi per centro rispettivamente O ed o corrispondono esattamente ai cerchi segnati in figura 76 per un vero trasformatore.

Costanti elettriche delle condutture. — Ogni conduttura ha resistenza, autoinduzione e capacità. Tutte queste proprietà sono proporzionali alla lunghezza della conduttura. L'influenza dell'autoinduzione cresce coll'aumentare dell'intensità della corrente, quella della capacità invece aumenta con la tensione.

Per determinare l'autoinduzione di un cavo concentrico dobbiamo calcolare il flusso di forza nell'interno dello spazio anulare fra conduttore interno ed esterno. Se r_1 è il raggio esterno del conduttore interno ed r_2 il raggio interno del conduttore esterno, quando si trascuri il flusso di forza nella massa stessa del conduttore, l'induzione B alla distanza r dal centro del cavo è data da

$$B = \frac{4\pi i}{2\pi r},$$

dove r varia tra i limiti r_1 ed r_2 . Il flusso di forza su l cm. di lunghezza è

$$N = l \int_{r_1}^{r_2} B dr$$

$$N = 2 l i \log_{\text{nat}} \frac{r_2}{r_1}.$$

Indicando con L il coefficiente d'autoinduzione, si ha

$$N = L i.$$

$$L = 2 l \log_{\text{nat}} \frac{r_2}{r_1}$$

in unità del sistema assoluto. Per scopi pratici è opportuno esprimere L in henry e la lunghezza del cavo in km. e si introducano anche i logaritmi decimali in luogo di quelli naturali. Risulta

$$L = 4,6 l \log \frac{r_2}{r_1} 10^{-4} \text{ henry.} \quad \dots \quad (32)$$

Un cavo concentrico è un condensatore le cui armature sono cilindri concentrici. La sua capacità in microfarad è data dalla seguente formola, ben nota dalla teoria dell'elettricità,

$$K = \frac{0,024 l \varepsilon}{\log \frac{r_2}{r_1}} \text{ microfarad,} \quad \dots \quad (33)$$

dove ε indica la costante dielettrica della sostanza isolante. Questa varia fra 3 e 4,5. Nella formola (33) l si intende in km.

Per condutture aeree di raggio r disposte parallelamente alla distanza d , lo Steinmetz (1) ha determinato i valori di L e K , e cioè:

$$L = 9,2 l \log \frac{d}{r} 10^{-4} \text{ henry} \quad \dots \quad (34)$$

$$K = \frac{0,012 l}{\log \frac{d}{r}} \text{ microfarad} \quad \dots \quad (35)$$

Questa formola è stata determinata con la premessa che d sia abbastanza grande in confronto ad r . Nei cavi a conduttori attorcigliati però questa condizione non si verifica e l'espressione

$$K = \frac{0,012 l \varepsilon}{\log \frac{d}{r}} \text{ microfarad}$$

non dà in tal caso che un valore approssimato per la capacità.

Paragonando queste formole si vede, che nei cavi concentrici l'autoinduzione è molto minore che nelle condutture aeree, ma che in queste

(1) *E. T. Z.*, 1893, pag. 478.

ultime la capacità è molto minore che nei cavi concentrici. Per avere un'idea dell'ordine di grandezza di questi valori, abbiamo riunito nella seguente tabella le costanti elettriche di una conduttura lunga 10 km. e della sezione di 50 mm². La distanza dei fili nella conduttura aerea è ammessa di 60 cm. La frequenza sia 50, quindi $\omega = 314$.

Lunghezza semplice della conduttura 10 km.	Cavi concentrici	Conduttura aerea
Resistenza dell'intera conduttura in ohm	7	7
L in henry	$1,65 \times 10^{-3}$	20×10^{-3}
ωL in ohm	0,52	6,28
Capacità reciproca in microfarad	2,5	0,055
A 3000 volt la corrente di carica in ampère è	2,34	0,052

Come indica questa tabella, nei cavi concentrici la resistenza induttiva scompare quasi completamente in confronto alla resistenza ohmica, mentre nelle condutture aeree la corrente di carica è quasi trascurabile in confronto all'intensità della corrente che può esser fatta passare in una conduttura di 50 mm² di sezione. All'opposto la corrente di carica in un cavo concentrico non è così piccola da poterla senz'altro trascurare, specialmente quando il cavo è alimentato da un trasformatore elevatore della tensione. In tal caso l'autoinduzione del trasformatore è inserita in serie con la capacità del cavo e si formano fenomeni speciali che si indicano in generale col termine risonanza e che in condizioni speciali possono divenire pericolose sia per il cavo che per il trasformatore.

Risonanza. — Per spiegare il fenomeno della risonanza con un semplice esempio, vogliamo considerare il cavo concentrico precedente e di volerlo provare con una tensione di 6000 volt (1). Poichè la tensione alle sbarre raccogliatrici della Centrale non può esser di molto superiore a quella di funzionamento normale cioè di 2000 volt, dobbiamo alzare la tensione a mezzo di un trasformatore. La frequenza sia 50, come si usa generalmente nelle centrali tedesche. Questo trasformatore deve dare dal circuito secondario la corrente di carica a 6000 volt. Secondo la tabella riportata più sopra, la corrente di carica a 3000 v. è dell'ordine di grandezza di 2,34 ampère; alla tensione di 6000 v. essa importerà quindi circa 4,7 amp., ed è quindi necessario per la prova del cavo un trasformatore della capacità di 28 k. v. a. Supponiamo di avere a disposizione per la prova un trasformatore da 24 k. v. a. e di poter sovraccaricare quest'ultimo per poco tempo fino a 30 k. v. a. Per semplificare la ricerca vogliamo introdurvi il concetto dei rocchetti equivalenti, cui abbiamo fatto cenno al principio di questo capitolo. La disposizione può in tal caso ritenersi rappresentata dalla figura 123.

(1) Una tale prova corrisponde alle norme di sicurezza del *Verein deutscher Ingenieure*, § 1 d.

Il rocchetto ($W_0, \omega L_0$) è ommesso nello schizzo, perchè esso carica solamente la macchina M nella centrale, mentre non ha nessuna influenza sull'azione reciproca fra cavo e rocchetto ($W, \omega L$) che sola ci interessa pel momento.

Sia K la capacità del cavo in microfarad, esso assorbirà una corrente di carica, che secondo la formola (23) è data da

$$i = K \omega e 10^{-6} = 4,68.$$

Questa corrente attraversa anche il rocchetto ($W, \omega L$). Il trasformatore, che è sostituito dal rocchetto ($W, \omega L$) abbia una perdita ohmica

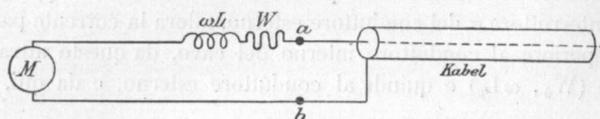


Fig. 123.

dell'1 $\frac{1}{2}$ % ed una perdita induttiva di tensione del 4 %. Avremo quindi per

$$i = 4 \qquad P = 24 \qquad \sigma = 4 \qquad P_v = 360 = W i^2,$$

$$W = 360 : 4^2$$

$$W = 22,5 \text{ ohm}$$

ed ωL si può calcolare dalla (31)

$$\omega L = 60 \text{ ohm.}$$

La corrente di carica di 4,68 ampère genera quindi in W una perdita ohmica di tensione di 105 volt ed in ωL un aumento di tensione di circa 280 v. di modo che la macchina può dare solamente 5720 v. perchè il cavo riceva esattamente 6000 v. Il trasformatore dovrebbe sopportare per breve tempo anche una intensità di corrente molto maggiore, quando il cavo venisse allungato. In tal caso dovrebbe aumentare anche la differenza fra la tensione del generatore e quella al cavo, fenomeno questo, che venne osservato per la prima volta nel cavo concentrico Ferranti fra Deptford e Londra e che venne perciò anche chiamato effetto Ferranti. Sarebbe stato più giusto di chiamare questo fenomeno risonanza, perchè esso deriva effettivamente da una risonanza fra capacità ed autoinduzione.

Aumento di tensione per effetto della risonanza. — Nell'esempio ora trattato, l'aumento di tensione era trascurabile. Ciò dipende dal fatto, che l'induttanza del trasformatore e la capacità del cavo erano piccole. Si possono dare però dei casi in cui le condizioni non sono così favorevoli. Si abbia una centrale con un'estesa rete di cavi concentrici, e consideriamo anzitutto uno dei cavi alla cui estremità sia inserito un trasformatore. Il carico nel circuito secondario sia uguale a zero. Nella disposizione

equivalente possiamo allora omettere il rocchetto ($W, \omega L$) e basta che consideriamo il rocchetto ($W_0, \omega L_0$). Il cavo è dotato di capacità non solo fra il conduttore interno e quello esterno, ma anche fra il conduttore esterno e la copertura di piombo; poichè però la copertura di piombo non è isolata dalla terra il conduttore esterno è dotato di capacità verso la terra. Quest'ultima varia, a seconda delle dimensioni del cavo, fra 0,6 ed 1,5 microfarad per km. In figura 124 sieno S le sbarre raccogliatrici della centrale, T il trasformatore inserito all'estremità del cavo, C_1 la capacità del conduttore esterno verso la terra e C_2 la capacità del complesso degli altri conduttori esterni della rete primaria verso la terra. Supponiamo ora aperto l'interruttore a del conduttore esterno, allora la corrente passa dalla sbarra superiore al conduttore interno del cavo, da questo attraverso al rocchetto ($W_0, \omega L_0$) e quindi al conduttore esterno, e da qui, essendo

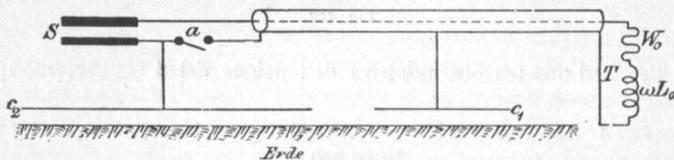


Fig. 124.

Erde = Terra.

aperto l'interruttore a , attraverso al condensatore C_1 alla terra, ed infine dalla terra, attraverso al condensatore C_2 alla sbarra inferiore. Le due capacità sono quindi inserite in serie con il rocchetto ($W_0, \omega L_0$). La capacità di due condensatori inseriti in serie, come è noto è data da

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Ora C_1 è la capacità di un solo cavo, mentre C_2 è la capacità di tutti gli altri cavi assieme; C_1 è quindi sempre piccolo in confronto a C_2 e possiamo porre con sufficiente approssimazione:

$$C = C_1.$$

I conduttori esterni dell'intera rete agiscono quindi come se fossero messi a terra, e l'isolazione del conduttore esterno escluso deve resistere all'intera tensione corrispondente alla corrente di carica. Questa tensione però può essere grandemente aumentata per effetto di risonanza ed è in ciò che sta il pericolo che il conduttore esterno si scarichi a terra. Per formarsi un'idea della importanza di tale pericolo consideriamo una rete formata da 100 km. di cavi concentrici ad alta tensione. La tensione primaria sia di 3000 volt e la frequenza di 45. La capacità dei conduttori esterni verso il piombo dipende dalla costante della sostanza isolante,

dal suo spessore e dalla sezione del cavo. Senza entrare in calcolazioni noiose per un caso particolare, ammettiamo, che la capacità importi 1 microfarad per ogni kilometro. Vogliamo inoltre supporre, che il trasformatore inserito sul cavo il cui conduttore esterno è interrotto, abbia una capacità di 20 chilovolt-ampère, e che le sue costanti elettriche abbiano i valori indicati a pag. 196. Per stabilire ora in quali condizioni può verificarsi un aumento pericoloso nella tensione, conviene determinare, per vari valori della tensione ai morsetti, la capacità, che è necessaria, perchè la corrente di carica riesca eguale alla corrente primaria a

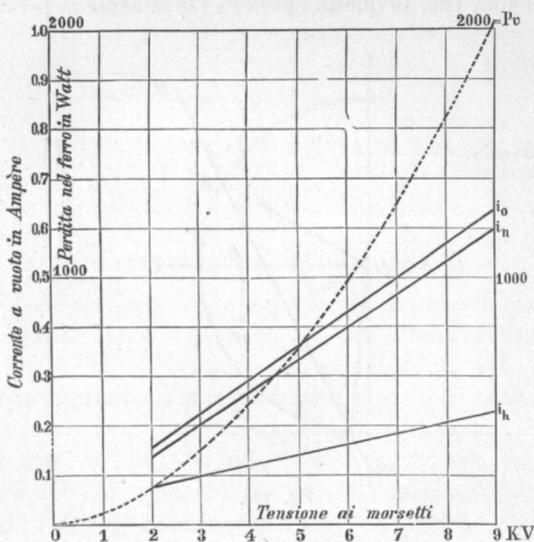


Fig. 125.

Trasformatore da 20 k. v. a. a 3000 volt, $\omega = 45$.
Perdita nel ferro 300 watt, 3,3 % di corrente a vuoto.

vuoto per quella tensione ai morsetti. Per far ciò supponiamo, che la tensione del generatore (che corrisponde alla combinazione del trasformatore e della capacità) importi in tutti i casi 3000 volt, che sia cioè costante. Questa supposizione corrisponde a quello che si verifica in pratica, perchè nelle centrali moderne i generatori sono così grandi che la loro tensione ai morsetti non viene menomamente modificata, per effetto dei fenomeni di cui ora si tratta.

Come venne già ricordato più sopra, supponiamo, che la rete secondaria inserita all'estremità del cavo, che possiamo considerare in questo caso come indipendente, non sia affatto caricata. Questo caso è possibile, se per esempio il cavo indipendente alimenta una parte della città ove

vi sono principalmente ville, ove in certe epoche non si richiede corrente nè per lampade nè per motori; lo stesso caso può però presentarsi, quando per la posa di un nuovo cavo la rete secondaria deve venire esclusa dal trasformatore.

Conoscendo le proprietà magnetiche del ferro del trasformatore, si possono calcolare per ogni tensione ai morsetti la corrente a vuoto e le perdite e quindi anche lo spostamento di fase della corrente a vuoto. Il calcolo è così semplice, che non è necessario seguirlo in tutti i suoi dettagli. Per una data qualità di ferro si ottengono i valori rappresentati graficamente in figura 125. In questa figura P_v rappresenta la perdita del ferro

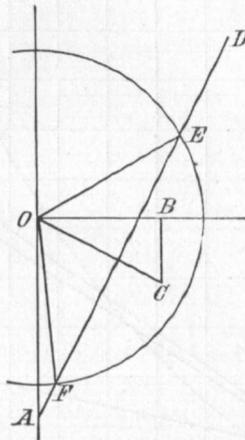


Fig. 126.

a vuoto, i_0 la intensità della corrente a vuoto; i_h la sua componente attiva ed i_μ la sua componente oziosa. Nel valore di P_v non si è tenuto conto della perdita nel rame perchè di poco conto.

Per determinare ora la capacità corrispondente ad una qualsiasi tensione ai morsetti, p. es. 3500 v. si fa nel modo seguente. Si segni in una scala qualunque (fig. 126) $OA = 3500$ volt ed in un'altra scala qualunque per le correnti $OB = 0,23$ ampère. Quest'ultimo è il valore della componente oziosa della corrente a vuoto ricavato dal diagramma della figura 125. Essa è normale ad OA . La componente attiva BC è parallela ad OA . Nel nostro caso è $BC = 0,11$. Il tratto OC rappresenta la corrente a vuoto e deve essere quindi normale al vettore della tensione del condensatore. Con tale condizione resta determinata la posizione AD di questo vettore. La sua lunghezza è determinata dalla condizione, che la tensione del generatore deve essere di 3000 volt. Se quindi tracciamo un cerchio di centro O e con raggio di 3000 unità, i suoi punti di incontro E ed F con la

retta AD sono vertici dei triangoli delle forze il cui lato comune OA dà la tensione ammessa di 3500 volt. La tensione tra il conduttore esterno ed il piombo è quindi o

$$AE = 5700 \text{ volt}$$

o

$$AF = 575 \text{ volt.}$$

Un altro valore non è possibile quando la tensione ai morsetti è di 3500 volt. Perchè possa tuttavia aver luogo l'uno o l'altro di questi valori la capacità del conduttore esterno verso il piombo deve avere un valore determinato. La corrente di carica secondo la formola (23) è data da

$$i = C e \omega 10^{-6},$$

e quindi nel nostro caso

$$0,26 = 282 C e 10^{-6}.$$

Da questa formola la capacità C può essere calcolata in microfarad.

Per

$$e = 5700 \quad \text{risulta} \quad C = 0,161$$

e per

$$e = 575 \quad \quad \quad C = 1,60.$$

In modo analogo può venire determinata la capacità corrispondente a qualsiasi altra tensione ai morsetti. Per valori della tensione ai morsetti maggiori a 3000 volt si ottengono sempre due valori della capacità, uno minore, cui corrisponde la maggiore delle tensioni fra conduttore esterno e piombo, ed uno maggiore, cui corrisponde la tensione minore. Per la tensione ai morsetti di 3000 volt il valore maggiore della capacità è infinito. Questo è chiaro perchè una capacità infinita corrisponde ad un corto circuito fra conduttore esterno, piombo e sbarra raccogliitrice dei conduttori esterni. In tal caso però fra il conduttore esterno ed il piombo non ha luogo alcuna tensione e nel diagramma i punti A ed F coincidono. Veramente quando il conduttore esterno sia isolato questo caso non può succedere perchè la capacità non può essere infinita. Esso tuttavia si verifica quando vien messo a terra il conduttore esterno in un suo punto qualunque, p. es., nella centrale. Con ciò si dà un mezzo facile di evitare il pericolo di fulminazione del cavo. Per tensioni ai morsetti minori di 3000 volt AF risulta negativo, cioè la capacità dovrebbe essere negativa ossia un'autoinduzione, il che naturalmente non è possibile. Per questi valori va quindi considerato solamente AE.

Eseguito la costruzione per diversi valori della tensione ai morsetti e riportando graficamente i risultati si ottiene la curva segnata in figura 127. Le capacità sono riportate come ascisse e le tensioni fra i conduttori esterni ed il piombo sono riportate come ordinate. Per rendere più chiara la rappresentazione è segnata anche la curva della tensione ai morsetti

del trasformatore. Effettivamente dovrebbe venir fatta ancora una correzione per tener conto della circostanza che C_1 non è infinitamente piccolo in confronto a C_2 e quindi $C < C_1$. Di questa correzione però non ne terremo conto, perchè praticamente è indifferente, che il conduttore esterno abbia rispetto al piombo una tensione di 6000 o di 6100 volt, perchè ambedue sono egualmente pericolose.

Poichè, secondo la nostra ipotesi, il cavo non alimenta che il trasformatore da 20 kilovolt-ampère, è sufficiente un cavo i cui conduttori hanno 16 mm² di sezione. Il valore medio più sopra ammesso di 1 microfarad è in questo caso troppo elevato. La capacità del cavo importerà

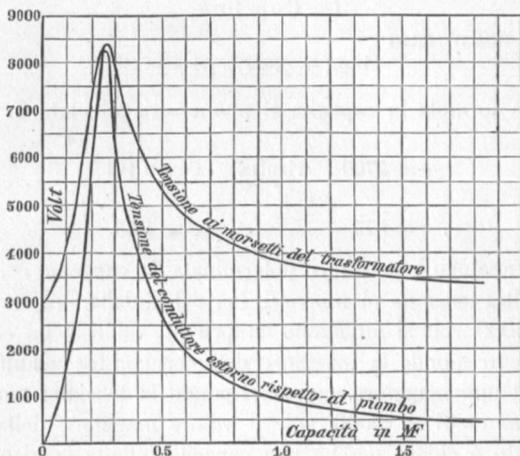


Fig. 127.

Trasformatore da 20 k. v. a., 3,3 0/0 di corrente a vuoto.
300 watt perdita nel ferro, 3000 volt, $\omega = 45$.
Funzionamento a vuoto. Conduttore esterno dapprima escluso,
indi congiunto all'estremità del trasformatore.

circa 0,6 microfarad per chilometro. Se consideriamo come pericolosa una tensione di 5000 volt fra il conduttore esterno ed il piombo, la figura 127 mostra che la capacità pericolosa varia fra i limiti di 0,13 e 0,35 microfarad e quindi la lunghezza pericolosa del cavo considerato è di 215 a 580 metri. Il pericolo massimo si avrebbe con un cavo di 420 metri di lunghezza, perchè esso verrebbe assoggettato ad una tensione di più di 8000 volt.

È generale l'opinione che il pericolo di fulminazione non esista nei cavi a conduttori attorcigliati; ciò però non è vero; il pericolo è effettivamente minore ma non trascurabile. I cavi a conduttori attorcigliati si distinguono da quelli a conduttori concentrici, primo, perchè tutti i con-

duttori sono egualmente bene isolati, e secondo, perchè hanno una molto minore capacità. Un cavo costruito per 3000 volt deve poter resistere alla prova con una tensione di 6000 volt e probabilmente resisterà anche per tensioni maggiori. In un cavo concentrico invece non si potrebbe caricare il conduttore esterno ad una tale tensione. È difficile calcolare la capacità di uno dei conduttori verso il piombo in un cavo a conduttori attorcigliati, per l'azione modificatrice degli altri conduttori. Essa è però certamente molto minore di quella del conduttore esterno di un cavo concentrico equivalente. Se essa importa ad esempio soltanto un quinto di questa, allora per un limite di tensione di 6000 volt, la lunghezza pericolosa del cavo, impiegandone uno a conduttori attorcigliati, importerebbe 1400 a 2000 metri. Se la lunghezza è minore o maggiore, non vi è pericolo di fulminazione quando venga escluso un conduttore al principio del cavo; se però per caso la lunghezza del cavo sta appunto

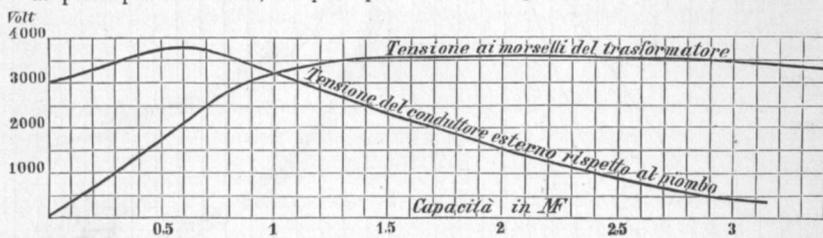


Fig. 128.

Trasformatore da 20 k. v. a. 3,3 0/0 di corrente a vuoto. 300 watt perdita nel ferro; 3000 volt, $\omega = 45$. Carico $1/10$ del normale. Nel secondario $\cos \varphi = 0,9$. Il principio del cavo è connesso al generatore soltanto col conduttore interno, quello esterno è escluso. Alla estremità il cavo è congiunto con ambedue i conduttori al trasformatore.

nei limiti anzidetti, esiste sempre il pericolo. Per evitarlo è necessario inserire od escludere i due conduttori sempre contemporaneamente. Ora può avvenire, che in seguito ad un corto circuito nella rete secondaria, uno dei conduttori venga escluso in conseguenza della fusione di una delle valvole in principio del cavo; in conseguenza di ciò si può stabilire una condizione pericolosa. Anche i cavi a conduttori attorcigliati non sono quindi assolutamente sicuri contro il pericolo di fulminazione, a meno di usare l'avvertenza di disporre al principio del cavo sicurezze molto più forti di quelle al termine del cavo stesso. I cavi concentrici possono venir protetti disponendo le sicurezze solamente sui conduttori interni, non però su quelli esterni, di modo che solamente i primi possono venire esclusi.

Finora abbiamo ammesso, che la rete secondaria sia esclusa dal trasformatore inserito all'estremità del cavo e che non sia unita agli altri cavi secondari. Vogliamo ora supporre che la rete secondaria non sia unita agli altri cavi secondari ma che costituisca una specie d'isola ali-

mentata dal trasformatore ed avente un certo carico. In tal caso si hanno condizioni molto più favorevoli. Anche un piccolissimo carico è sufficiente ad evitare un pericoloso innalzamento di tensione fra conduttore esterno e piombo quando quello venga escluso. La figura 128 rappresenta le curve di tensione del trasformatore e del conduttore esterno nell'ipotesi che sul circuito secondario si abbia un decimo del carico normale e che il fattore di potenza nel circuito secondario sia 0,9. Le curve si ottennero con la costruzione indicata in figura 126, con la sola differenza, che in tal caso OC non rappresenta soltanto la corrente a vuoto, ma la risultante

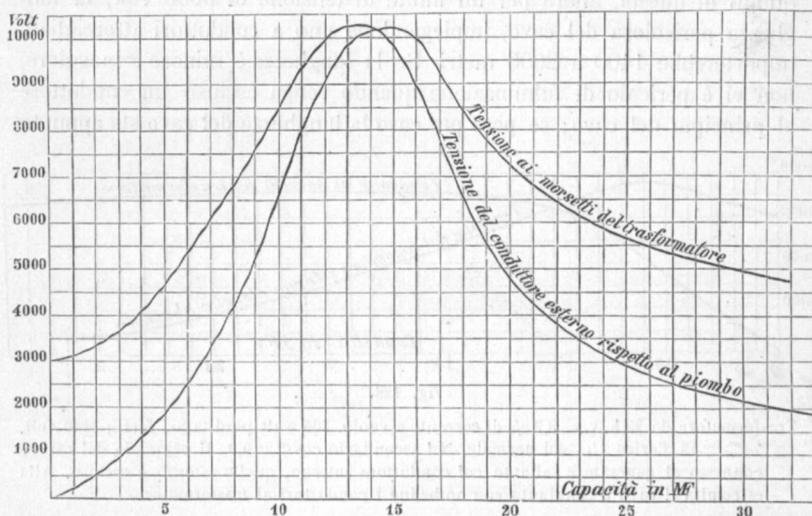


Fig. 129.

All'estremità del cavo è inserito un trasformatore da 20 k. v. a. che alimenta un motore da 20 cavalli. L'induttanza del motore riferita al rochetto primario con $\cos \varphi = 0,8$ è $\omega L = 270$. Si presuppone che all'avviamento sia $\cos \varphi = 0,3$ e che fonda la valvola del conduttore esterno al principio del cavo. Il trasformatore ha il 3,3 0/0 di corrente a vuoto; $1\frac{1}{2}$ 0/0 = 300 watt di perdita nel ferro. Esso è caricato del solo motore,

della corrente a vuoto e di quella pel carico ammesso. Come risulta dalla figura 128, il massimo della tensione nel conduttore esterno è di 3800 volt. Questa tensione si verifica in un cavo di 1 chilometro di lunghezza se esso è concentrico ed in uno di 5 chilometri di lunghezza se esso è a conduttori attorcigliati. Questa condizione può essere considerata come non pericolosa. La ragione della diminuzione del pericolo anche per un piccolo carico è il piccolo spostamento di fase ($\cos \varphi = 0,9$) nella rete secondaria. Poichè ora un piccolo spostamento di fase diminuisce il pericolo, è supponibile che un grande spostamento di fase lo aumenti,

come effettivamente avviene. Supponiamo che il cavo non venga usato per l'illuminazione di una zona di una città ma per l'alimentazione di un motore. Il motore che viene alimentato dal trasformatore da 20 chilovolt-ampère abbia a pieno carico un fattore di potenza 0,8. La sua induttanza (riferita al circuito primario) avrà il valore 270. Nell'avviamento il fattore di potenza sia 0,3. Se all'avviamento fonde la valvola di sicurezza del conduttore esterno, si produrrà una condizione pericolosa. La figura 129 rappresenta le curve della tensione per questo caso; esse sono costruite nello stesso modo usato negli esempi precedenti. Le lunghezze pericolose per il cavo sono molto maggiori di quelle precedenti. Per distanze moderate e cavi a conduttori attorcigliati non vi è quindi alcun pericolo ed i cavi concentrici possono essere anche in questo caso protetti lasciando senza sicurezza il conduttore esterno.

Finora abbiamo ammesso che trasformatore e cavo sieno congiunti alla rimanente rete solamente per mezzo della capacità di quest'ultima, e che si formi risonanza ed una tensione pericolosa per effetto di una interruzione nel conduttore esterno. Per evitare questo fenomeno basta seguire la nota regola, e cioè:

Inserire dapprima il conduttore esterno;

Escludere dapprima il conduttore interno.

Oppure si può evitare sempre il pericolo, omettendo sia l'interruttore che la sicurezza nel conduttore esterno. In quest'ultimo caso non si può formare risonanza nel modo fin qui considerato, può però formarsi un altro genere di risonanza quando venga posto a terra il conduttore interno.

Fulminazione di cavi in reti estese. — Nella figura 130 rappresentino P ed S i rocchetti primario e secondario di un trasformatore in una sottostazione a rete secondaria ininterrotta. J sia il conduttore interno ed A quello esterno del cavo d'alimentazione di questa sottostazione. Questa sottostazione è unita con le altre sottostazioni a mezzo di cavi primari. J_1 rappresenti tutti i conduttori interni ed A_1 quelli esterni di questi cavi di giunzione. Le altre sottostazioni non sono rappresentate; alcune di queste od anche tutte sono unite mediante cavi alla centrale. J_2, A_2 sieno i conduttori interni ed esterni dei cavi della rete secondaria di distribuzione che vanno alla sottostazione vicina. Se ora J viene interrotto a bella posta o per fusione della sicurezza s, P non rimarrà senza tensione perchè per mezzo di J_1 rimane congiunto alle altre condutture d'alimentazione. Anche fondendo s ed s_1 , P non rimarrà senza tensione perchè questo rocchetto viene alimentato dal rocchetto secondario S, che, a sua volta viene alimentato dalle altre sottostazioni per mezzo dei conduttori J_2 ed A_2 . Perchè P rimanga senza tensione, devono venire interrotte le comunicazioni tanto dalla parte primaria, che da quella secondaria.

Supponiamo che in D, per esempio nella scatola d'attacco del trasformatore, avvenga un contatto a terra. Allora le sicurezze s , s_1 ed s_2 fonderanno. Il fatto di fondere prima l'una o l'altra è perfettamente indifferente, perchè il contatto a terra permane anche dopo la fusione delle sicurezze. L'alimentazione del trasformatore avviene ora dalla parte del secondario ed il suo rocchetto primario viene trasformato in una sorgente di corrente alternata, soggetta ad induttanza e resistenza. Il percorso della corrente è ora il seguente: Dal punto della figura segnato superiormente con *terra* (che corrisponde al mantello di piombo dell'intera rete dei cavi) la corrente passa in D, attraverso P in A_1 e, per mezzo della capacità G di tutti i conduttori esterni verso il piombo, ritorna alla

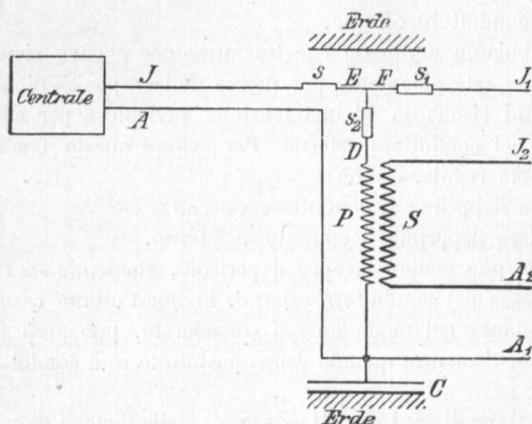


Fig. 130.

Erde = Terra.

terra segnata inferiormente nella figura. Va osservato che in questo caso l'induttanza è molto minore che nei casi prima trattati, perchè essa deriva unicamente dalla dispersione magnetica nel trasformatore; all'opposto la capacità è in questo caso molto maggiore ed è cioè quella dell'intera rete dei cavi. Può quindi prodursi risonanza e formarsi una condizione pericolosa per l'intera rete dei cavi. Che questo avvenga o meno, dipende dal carico della rete secondaria e dalla portata della valvola. Se il carico è grande ed i conduttori J_2 ed A_2 sono debolmente assicurati, è probabile che la corrente che arriva in S venga interrotta prima ancora della fusione delle sicurezze s_2 ed s_1 , e con ciò rimane evitato ogni pericolo. La probabilità che le sicurezze secondarie fondano presto, è aumentata naturalmente da un forte carico locale, ed in questo senso varia anche il pericolo di fulminazione dall'importanza e distribuzione del carico. In questo modo

però non è possibile ottenere alcuna protezione contro la fulminazione, perchè non è possibile disporre le sicurezze con la necessaria precisione. Ora si potrebbe asserire che non è necessaria una esatta scelta delle sicurezze, perchè trattandosi di un contatto a terra in P e conseguentemente di un corto circuito in S, le valvole in S_2 A_2 devono fondere in ogni caso. Ciò succede anche in realtà, ma le sicurezze richiedono un certo tempo per fondere. Nel capitolo terzo abbiamo svolto la legge secondo la quale si può calcolare il tempo che richiede un trasformatore per raggiungere una certa temperatura. Questa legge non vale soltanto per trasformatori, ma, come è naturale, per qualsiasi oggetto riscaldato dal passaggio della corrente, quindi anche per le sicurezze. Se w è la resistenza della piastrina fusibile, i l'intensità della corrente, T la temperatura di fusione, c una costante, che dipende dalla capacità calorimetrica della piastrina e dei suoi morsetti, e K un fattore che rappresenta l'azione refrigerante, il tempo che trascorre fra la formazione del corto circuito e l'interruzione della corrente è dato in base alla formola (11) da:

$$t = -2,3 \frac{c}{k} \log \left(1 - \frac{kT}{w i^2} \right).$$

Grande precisione nella determinazione di t non è necessaria, perchè se t supera la durata di pochi periodi, esso è sufficiente a produrre nel frattempo risonanza con pericolose conseguenze. Un calcolo approssimato dimostra, che una sicurezza fonde per effetto di una corrente doppia di quella normale in 100 secondi (non è conveniente adottarla più debole per considerazioni pratiche), per una corrente 20 volte quella normale richiede sempre 0,7 secondi e per corrente 50 a 60 volte la normale richiede 0,13 secondi per fondere. Anche in queste condizioni limiti quindi passerebbero sempre 6 periodi prima che si interrompa la corrente e questi sono più che sufficienti perchè succedano intanto inconvenienti. Noi possiamo dire quindi, che le sicurezze non hanno nessuna utilità per proteggere i cavi contro la fulminazione. Lo stesso vale naturalmente anche per la sicurezza s_2 . Finora abbiamo supposto, che il corto circuito avvenga in D (fig. 130), se però esso si forma al di là di quella sicurezza, cioè in E od F, non si ha neppure alcuna protezione rispetto alla risonanza, se le sicurezze s ed s_1 fondono prima di s_2 .

Queste considerazioni mostrano, che ad onta di disporre le sicurezze dei conduttori interni ed ometterle su quelli esterni, può intervenire ugualmente risonanza. Questa risonanza è però anche pericolosa? Per rispondere a questa domanda, riprendiamo l'esempio precedente di una rete i cui conduttori esterni hanno complessivamente una capacità di 100 microfarad. Noi avevamo considerato un trasformatore di 20 chilo-volt-ampère. La perdita nel ferro a tensione normale era di 300 watt e la perdita

ohmica a carico normale anche di 300 watt, la perdita ohmica di tensione ammessa importava quindi l' $1\frac{1}{2}\%$. La perdita di tensione induttiva era $\sigma = 4\%$. Riferendo questi valori al rocchetto primario a pieno carico si ha:

$$\begin{aligned}e_w &= W \cdot 6,7 = 45 \\e_s &= \omega L \cdot 6,7 = 120 \\e &= \sqrt{45^2 + 120^2} = 128.\end{aligned}$$

Se facciamo quindi arrivare ai morsetti secondari la corrente ad una tensione che è il

$$100 \cdot \frac{128}{3000} = 4,26\%$$

della normale tensione ai morsetti, nel rocchetto primario chiuso in corto circuito si produrrà una corrente dell'intensità normale.

Le equazioni mostrano che quanto più grande è il trasformatore tanto minori sono l'induttanza e la resistenza. Per trasformatori similmente costruiti, questi valori possono quindi venire considerati come inversamente proporzionali alla potenzialità dei trasformatori stessi. Se P è la potenzialità in chilo-volt-ampère, avremo in generale per trasformatori dello stesso tipo e della stessa tensione

$$\begin{aligned}W &= \frac{134}{P} \\ \omega L &= \frac{360}{P},\end{aligned}$$

dove W ed ωL sono da considerarsi come riferiti al circuito primario.

Supponiamo ora, che il contatto a terra del conduttore interno si formi in prossimità di un trasformatore in cui sia $P = 20$. Per determinare la tensione del conduttore esterno verso la terra procediamo come segue: Ammettiamo che si abbia una qualunque corrente di carica, assolutamente ad arbitrio, p. es. 40 ampère. La componente attiva è

$$40 \cdot \frac{45}{128} = 14$$

e la componente oziosa è

$$40 \cdot \frac{120}{128} = 37,5.$$

Nella figura 131 è riportato $OA = 37,5$, $AB = 14$ ed $OB = 40$. La tensione ai morsetti dev'essere normale ad OA e la sua grandezza è determinata dalla relazione

$$e = 128 \cdot \frac{40}{6,7}$$

cioè $e = 764$ volt, nella quale determinazione non si è tenuto calcolo della perdita nel ferro in causa della sua poca importanza. In tal modo

si ottiene il vettore della tensione ai morsetti $OD = 764$. Perchè ora una corrente di 40 ampère possa caricare il condensatore è necessaria una tensione che risulta dalla relazione:

$$i = \omega C e 10^{-6}$$

cioè di 1420 volt. Tracciamo quindi una normale ad OB e riportiamo su di essa $OE = 1420$. Risulta quindi $DE = 750$ volt, che rappresenta la tensione che deve venir fornita al complesso formato dalla rete e dal trasformatore, perchè la corrente assorbita sia di 40 ampère. In tal caso però nel rocchetto P non si avrà più una tensione di 750 volt, ma una molto maggiore. Se la rete secondaria non avesse alcuna resistenza, in s si avrebbe la tensione normale secondaria e quella trasformata in P sarebbe data da $DE = 3000$ volt. In causa della resistenza nei cavi secondari, la tensione è alquanto minore. La riduzione della tensione si

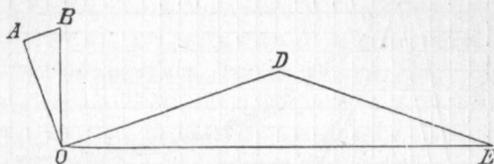


Fig. 131.

può determinare solo approssimativamente. Se le condutture di giunzione fra le sottostazioni sono di dimensioni tali, che la perdita di tensione importi l' $1\frac{1}{2}\%$ e se con la sottostazione considerata ne sono congiunte altre tre, il trasformatore verrà alimentato da tre cavi. La perdita al carico normale di 6,7 ampère (primario) importerebbe quindi solamente $\frac{1}{3}$ di $1,5\%$, cioè il $0,5\%$. Ora il carico non è però di 6,7 ampère, ma circa di

$$40 \cdot \frac{3000}{750} = 160 \text{ ampère}$$

e quindi la perdita del

$$0,5 \cdot \frac{160}{6,7} = 12\%$$

La tensione d'alimentazione è quindi $3000 \cdot 0,88 = 2640$ volt.

Nell'ammettere l'intensità della corrente di carica di 40 ampère non abbiamo quindi scelto la giusta. Dalla figura 131 è però molto facile il determinare gli esatti valori della corrente e della tensione. Basta, per ciò fare, variare la scala in modo, che DE rappresenti 2640 volt. Il fattore di ingrandimento è quindi

$$\frac{2640}{750} = 3,5$$

e la tensione nel conduttore esterno importerà $3,5 \times 1420 = 5000$ volt, la tensione ai morsetti sarà in cifra tonda 2800 volt e la corrente di

147 ampère. Questa intensità corrisponde a 22 volte quella normale. Questa corrente richiederà per far fondere le sicurezze il tempo corrispondente a 25 periodi completi, che è più che sufficiente perchè con la tensione di 5000 volt i conduttori esterni si scarichino a terra contemporaneamente in più punti.

Un analogo fenomeno si può presentare anche con cavi a conduttori attorcigliati: il pericolo però in tal caso è di gran lunga minore. Per avere la stessa capacità la rete dei cavi dovrebbe avere un'estensione di circa 500 km. Allora però la resistenza dei cavi di giunzione di per sè abbasserebbe la tensione e si impiegherebbero inoltre trasformatori

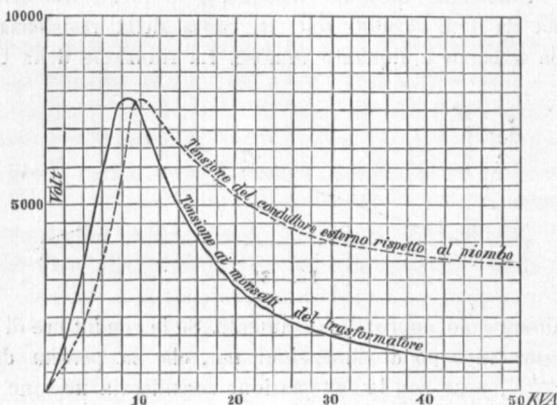


Fig. 132.

molto più grandi, l'induttanza dei quali è notevolmente inferiore. In una rete di 100 km. di cavi la capacità importerebbe circa 20 microfarad e, eseguendo il calcolo per questo caso e considerando un trasformatore da 20 chilo-volt-ampère, si troverebbe che la corrente importa solamente 10 ampère e la tensione in cifra tonda 3000 volt. In tal caso non esiste quindi pericolo di fulminazione; perchè ciò avvenga la tensione di funzionamento dovrebbe superare di molto i 3000 volt, oppure la potenzialità del trasformatore dovrebbe essere molto diminuita.

Per una rete a cavi concentrici, come è stato già indicato, si può calcolare la tensione dei conduttori esterni verso la terra per diverse grandezze di trasformatori e disegnare quindi la curva della figura 132, che rappresenta il pericolo di fulminazione del cavo in funzione della grandezza della sottostazione.

Come si vede, per trasformatori molto piccoli e per trasformatori molto grandi non esiste alcun pericolo. Se consideriamo come prima, una tensione di 5000 volt fra il conduttore esterno e la terra, come ten-

sione limite per il pericolo di scariche a terra, non si possono adottare stazioni di trasformatori la cui potenza sia compresa fra i 7 ed i 22 kilovolt-ampère. È però bene ampliare di alquanto anche questi limiti, perchè il metodo seguito per la loro determinazione non permette di fare assegnamento su di una grande esattezza. Nell'interesse della semplicità e facilità di trattazione abbiamo fatto alcune ipotesi che non corrispondono esattamente alla realtà. Così, ad esempio, l'induttanza, per i valori molto alti dell'intensità della corrente di corto circuito, ha probabilmente un valore diverso da quello che ha per piccole intensità di corrente e così pure si modifica la resistenza. Inoltre la resistenza dei cavi di giunzione è stata valutata senza tener conto della densità della corrente e di altro ancora. Il tenere esatto conto di tutti questi fattori non avrebbe però alcun valore pratico, perchè non possiamo sapere, se i 5000 volt corrispondono effettivamente alla tensione limite per il pericolo di fulminazione del cavo. Ad una piccola variazione di questo valore però, corrisponde, come lo mostra la figura 132, una grande variazione nella grandezza pericolosa del trasformatore. Non ha quindi alcun valore il determinare quest'ultima con grande esattezza.

Poichè i fenomeni qui considerati hanno azione sulla zona pericolosa sempre per effetto di correnti di carica troppo forti e mai troppo deboli, si farà bene in generale a non scegliere troppo alta la tensione d'esercizio. Una perdita molto piccola nel ferro o nel rame del trasformatore aumenta il pericolo, non però nelle stesse proporzioni di una intensa corrente a vuoto e di una forte perdita di tensione induttiva. Si dovrà quindi in primo luogo far in modo che la costruzione del trasformatore sia eseguita secondo questo punto di vista.

CAPITOLO UNDECIMO

Descrizione ed illustrazione di diversi tipi di trasformatori.

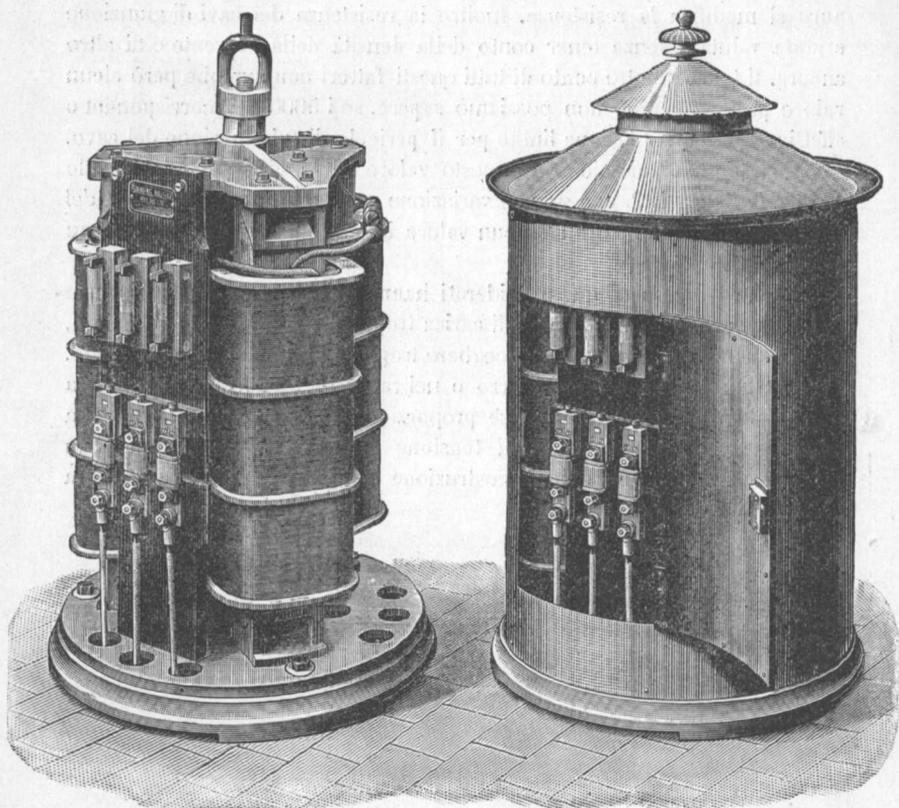


Fig. 133.

Per dare al lettore un'idea generale delle particolarità costruttive dei trasformatori, abbiamo qui riprodotto le illustrazioni di una serie di tipi costruiti da varie Ditte.

La Società Anonima *Siemens & Halske* di Berlino costruisce trasformatori monofasi e trifasi del tipo a nucleo. La figura 133 rappresenta un

trasformatore trifase con e senza involucro. I nuclei sono disposti secondo la figura 16 e sono pressati sui gioghi a mezzo di piastre in ghisa con sporgenze inclinate. I morsetti e le sicurezze sono montati su tavolette fissate pure alle piastre in ghisa. I conduttori entrano nel trasformatore passando attraverso fori praticati nella piastra di base. La figura 134 rappresenta un

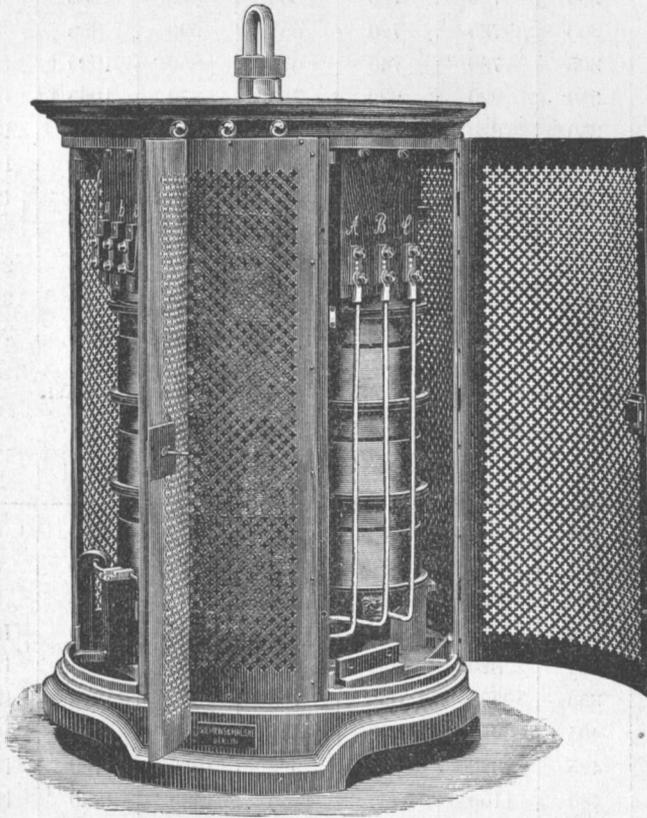


Fig. 134.

trasformatore trifase con involucro di lamiera forata, che permette l'accesso all'aria ed è quindi adatto solamente per la posa in locali asciutti. Per posa all'aperto deve venir usata la costruzione rappresentata dalla figura 133 con involucro perfettamente chiuso. Per corrente alternata monofase i trasformatori sono di costruzione analoga; essi hanno però due nuclei invece di tre. Le figure 135 e 136 unitamente alle tabelle seguenti danno le dimensioni esterne di questi apparecchi per le diverse capacità.

TABELLA DELLE DIMENSIONI DEI TRASFORMATORI TRIFASI.

Le dimensioni sono espresse in millimetri.

Kw.	a	b	c	d	e	f	g
2,5	235	595	595	530	630	760	850
5	300	720	720	655	690	855	940
7,5	300	720	720	655	690	855	940
10	305	730	740	675	850	1020	1110
15	350	820	830	765	870	1065	1150
20	350	820	830	765	1070	1265	1350
30	405	980	1020	885	1250	1515	1660
50	425	1020	1060	925	1500	1730	1900
75	490	1160	1200	1065	1540	1855	2025
100	490	1160	1200	1065	1540	1855	2025
150	550	1300	1320	1185	1840	2155	2285
200	610	1400	1440	1305	2150	2455	2625

TABELLA DELLE DIMENSIONI DEI TRASFORMATORI MONOFASI.

Le dimensioni sono espresse in millimetri.

Kw.	a	b	c	d	e	f	g
1	210	510	530	475	470	590	675
2,5	240	590	590	530	610	745	830
5	295	720	710	665	660	825	910
7,5	300	730	740	675	820	990	1075
10	350	820	830	765	870	1065	1160
15	350	820	830	765	1070	1265	1360
20	405	980	1020	885	1245	1500	1635
30	425	1020	1060	925	1500	1750	1880
50	480	1160	1200	1065	1540	1830	1960
75	480	1160	1200	1065	1540	1830	1960
100	540	1300	1320	1185	2070	2145	2280
150	610	1400	1440	1305	2140	2455	2285

La Società Anonima di Elettricità già *Schuckert & C°* di Norimberga costruisce trasformatori monofasi del tipo a mantello e trasformatori trifasi del tipo a nucleo. I primi sono rappresentati dalle figure 137 (2 kw) e 138 (40 kw); i secondi dalla figura 139 (10 kw). Negli apparecchi per corrente monofase i rocchetti sono completamente incassati nel ferro e sono

protetti sopra e sotto da appositi involucri. Questi ultimi sono fissati a mezzo di forti bulloni, che comprimono nello stesso tempo fra loro le lamiere. Lateralmente le lamiere sono pure compresse a mezzo di ferri

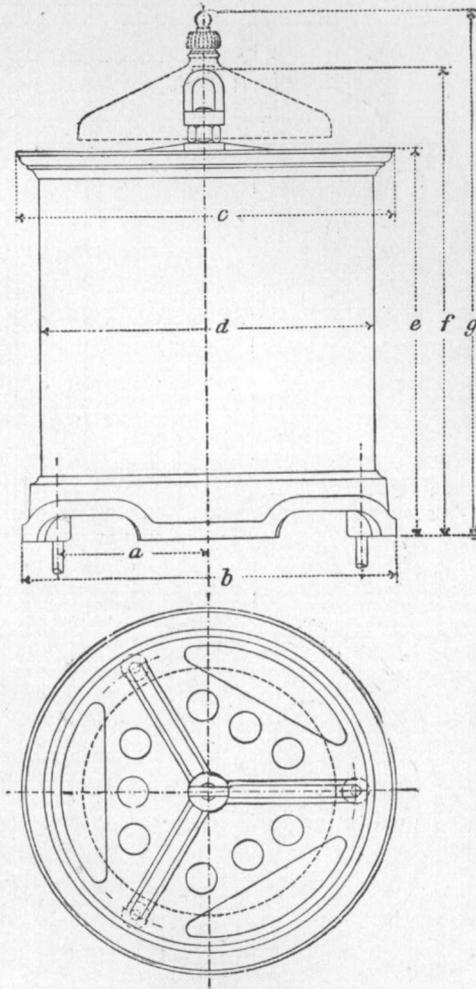


Fig. 135.

ad angolo e bulloni. Nei trasformatori per corrente trifase l'avvolgimento è suddiviso su ciascun nucleo in una serie di rocchetti schiacciati per diminuire la dispersione magnetica. I rocchetti sono protetti da un mantello esterno di forma cilindrica, che è ommesso però nella figura. I conduttori sono introdotti attraverso il coperchio a mezzo di scatole a stoppa.

La Società Anonima Berlinese per la fabbricazione di macchine, già *L. Schwartzkopff*, costruisce trasformatori monofasi del tipo a mantello con lungo nucleo (vedi fig. 12 d), essa tiene però la sezione del

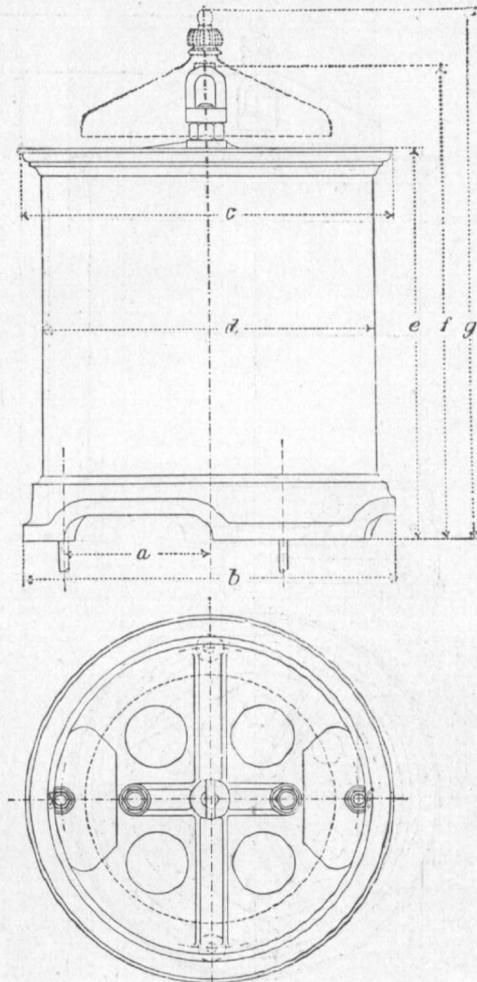


Fig. 136.

mantello considerevolmente maggiore di quella del nucleo per diminuire le perdite per isteresi. La carcassa viene tenuta a posto per mezzo di due forti telai in ghisa e con bulloni, come lo indica la figura 140. I rocchetti disposti nel mezzo vengono protetti da guasti eventuali mediante lamiere forate (fig. 141).

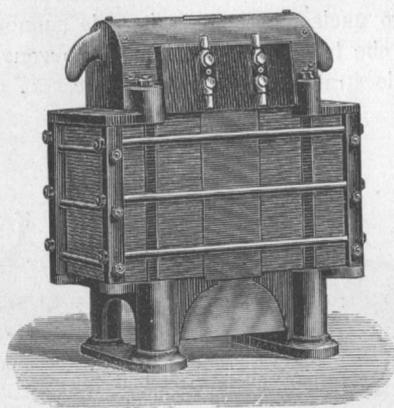


Fig. 137.

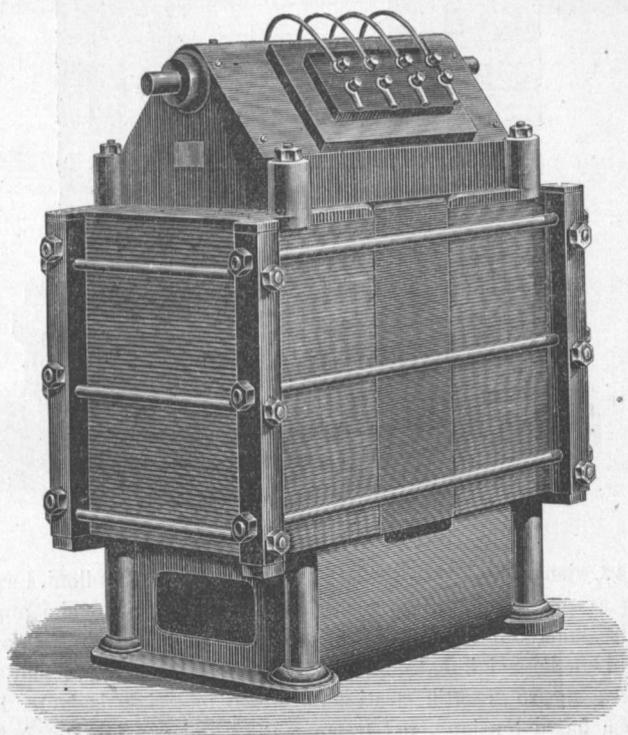


Fig. 138.

La Ditta *Siemens Brothers & Co* di Londra costruisce pure trasformatori a mantello a lungo nucleo, però per evitare le connessure, costruisce le lamiere in modo, che le giunzioni di uno strato vengono ricoperte dalle lamiere intere dello strato successivo. La carcassa, come lo indica la

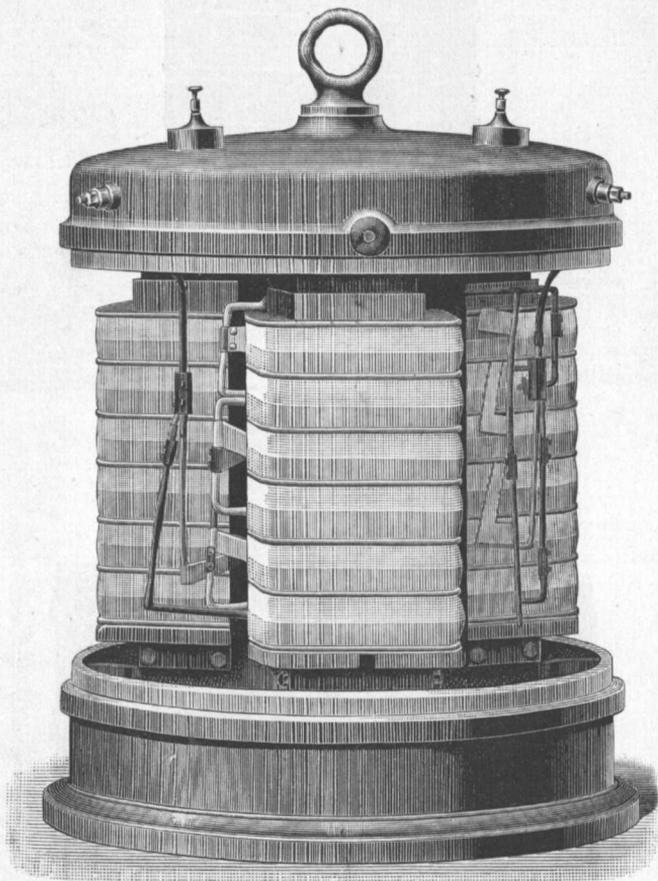


Fig. 139.

figura 142, viene tenuta a posto da telai in ghisa e da bulloni. I rocchetti vengono avvolti su cilindri di materiale isolante speciale, che non soffre per il riscaldamento. Il cilindro è provvisto di flange in legno. I singoli strati dell'avvolgimento ad alta tensione sono pure separati l'uno dall'altro a mezzo di sottili strati dello stesso materiale isolante. L'avvolgimento a bassa tensione, nel trasformatore qui considerato, è formato da una serie di fili avvolti parallelamente tra loro e riuniti a mezzo di

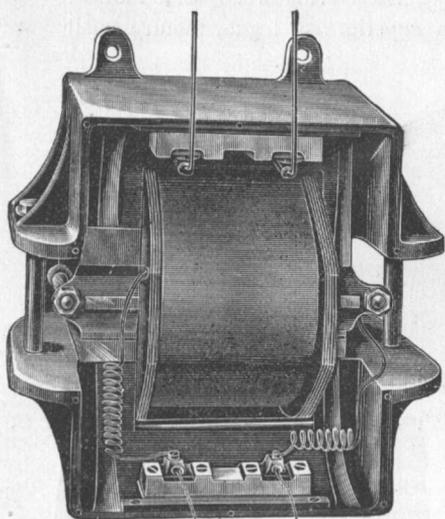


Fig. 140.

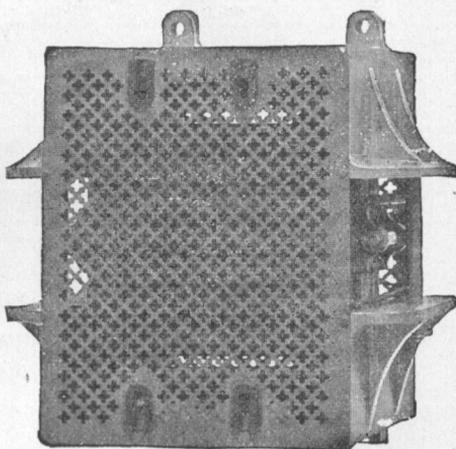


Fig. 141.

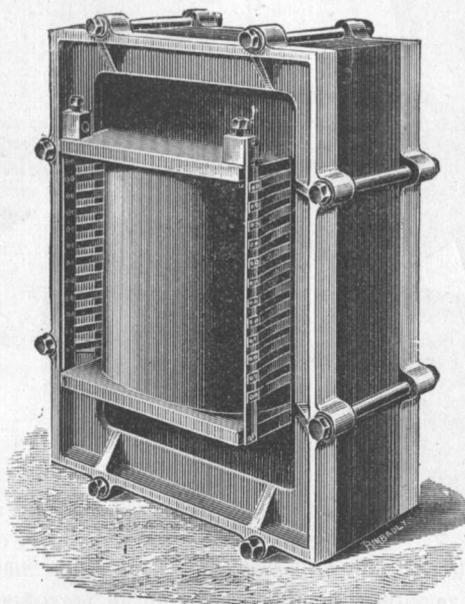


Fig. 142.

sbarre che mettono capo ai morsetti del trasformatore. Questi morsetti sono fissati direttamente sulla flangia superiore di legno, mentre quelli

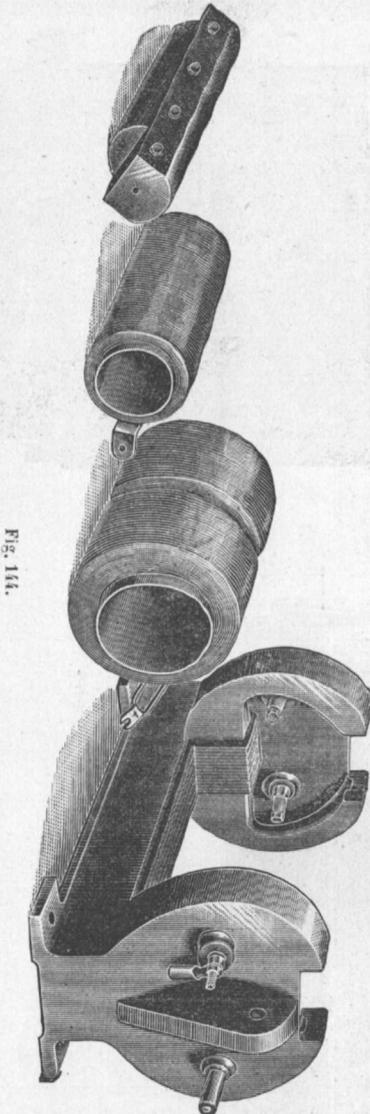


Fig. 144.

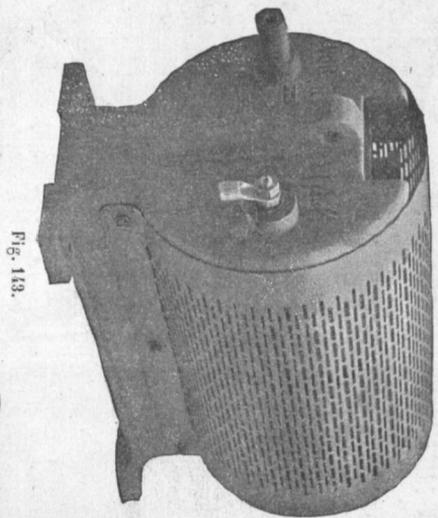


Fig. 143.

dell'avvolgimento ad alta tensione sono fissati sulla medesima flangia, ma dalla parte opposta e con l'interposizione di pezzi speciali isolanti di ebanite.

La Ditta *Brown, Boveri & C°* di Baden (Svizzera) costruisce trasformatori monofasi, che non appartengono nè al tipo a nucleo, nè a

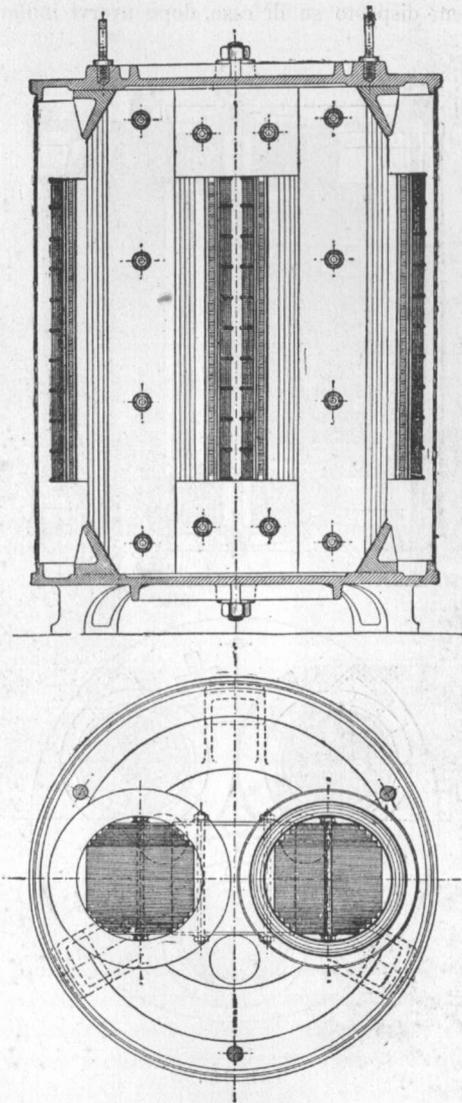


Fig. 145.

quello a mantello, ma in certo qual modo all'uno e all'altro. I rocchetti sono montati su di un nucleo, che è unito da una sola parte ad un circuito magnetico per mezzo di un giogo in forma di \square . La

figura 144 mostra i dettagli di questa costruzione. Le lamiere del giogo sono serrate fortemente alla base inferiore fra i pezzi frontali dell'involucro, ed il nucleo viene disposto su di esse, dopo avervi infilato i rocchetti, e

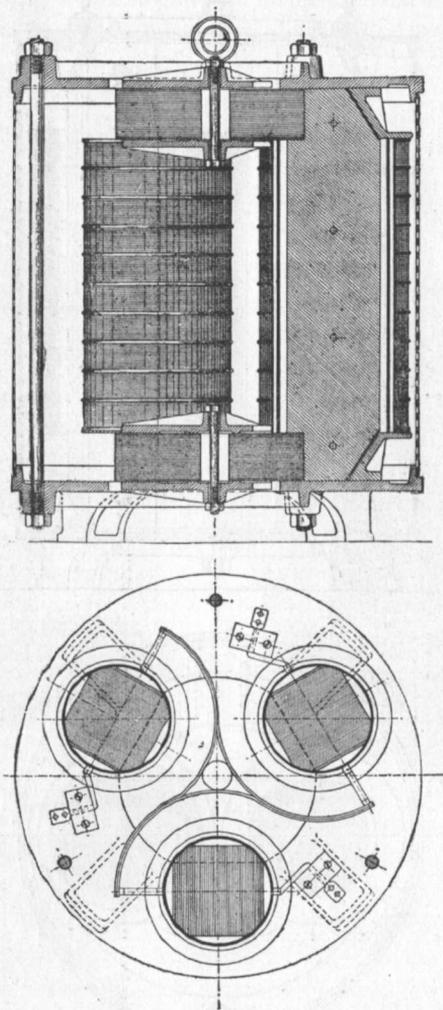


Fig. 146.

quindi fissato all'involucro a mezzo di bulloni. I rocchetti vengono costruiti separatamente, di modo che possono venir infilati l'uno sull'altro. La giunzione con la conduttura vien fatta a mezzo di viti ed asticine, le quali ultime attraversano le pareti laterali dell'involucro passando per fori

isolati. Il nucleo è pressochè cilindrico ed è alquanto smussato alle estremità per aumentare la superficie di contatto con le lamiere del giogo. I rocchetti, come lo mostra la figura 143, sono protetti da azioni meccaniche a mezzo di lamiera forata. Per impianti a corrente polifase questa Ditta usa un gruppo di trasformatori monofasi opportunamente inseriti.

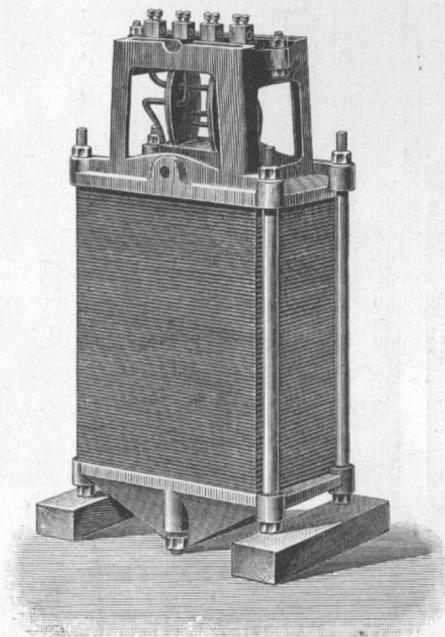


Fig. 147.



Fig. 148.

La Società Anonima di Elettricità già *W. Lahmeyer & C°* di Francoforte sul Meno costruisce trasformatori a nucleo tanto per corrente monofase che trifase. Il tipo di costruzione è rappresentato dalle figure 145 e 146; il trasformatore monofase è destinato ad una capacità di 30 kw. e quello trifase ad una di 40 kw. ed il rapporto di trasformazione è in ambedue i trasformatori da 5000 a 110 volt. Causa l'elevata tensione primaria i rocchetti primari sono suddivisi in molte parti, ed in tal modo si ottiene la massima sicurezza contro eventuali scariche dall'avvolgimento primario. Per ottenere una certa economia nel filo, i nuclei sono

di sezione quadrata con spigoli smussati. I rocchetti sono avvolti indipendentemente l'uno dall'altro ed infilati l'uno sull'altro. Le altre particolarità di costruzione sono facilmente rilevabili dal disegno.

La Società *Brush Electrical Engineering Co. Ltd.* di Londra costruisce i trasformatori ideati da William Mordey, che appartengono al tipo a mantello. Il modo di comporre la carcassa è già stato descritto al terzo capitolo. Le lamiere sono tenute a posto a mezzo di telai in ghisa e

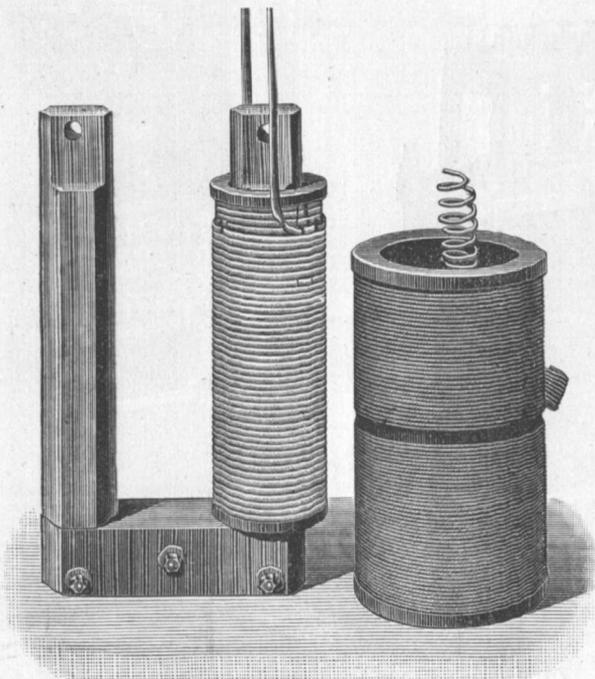


Fig. 149.

bulloni, come lo indica la figura 147, e sono quindi disposte in una cassa (fig. 148). Il telaio superiore porta un pezzo destinato a fissare una forte piastra di porcellana, sulla quale vengono disposti i morsetti, le sicurezze ed un interruttore primario. Il manubrio dell'interruttore sporge dalla parete della cassa proprio sotto al coperchio (fig. 148), di modo che il trasformatore può venir escluso dalla linea primaria senza aver bisogno di toglierne il coperchio.

Le condutture vengono introdotte attraverso a scatole a stoppa di materia isolante. La perdita di tensione a carico non induttivo indicata dalla Ditta è del $2\frac{1}{2}\%$ per qualsiasi capacità di trasformatore. La perdita per isteresi per una frequenza $\omega = 100$ varia secondo le indica-

zioni della Ditta fra il 6 % per il tipo più piccolo di 750 watt ed il 0,75 % per il tipo più grande di 50 kw. La seguente tabella dà il peso, compresa la cassa, per le diverse grandezze di trasformatori.

Capacità in kw.	1,5	3	6	12	24	50
Peso in kg.	132	247	359	559	863	2038

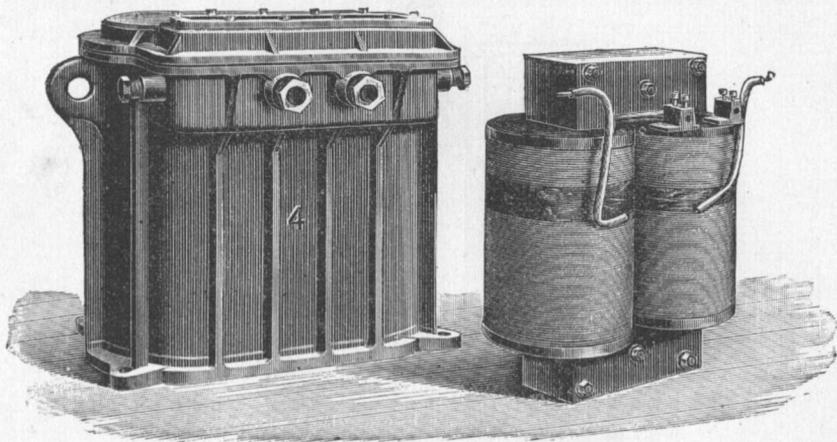


Fig. 150.

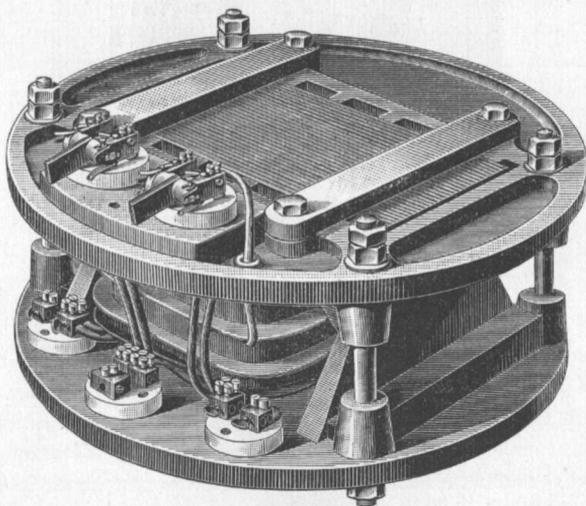


Fig. 151.

Gli avvolgimenti primario e secondario sono separati da uno strato metallico congiunto alla terra, di modo che riesce impossibile un passaggio della corrente ad alta tensione nei rocchetti a bassa tensione (vedi Capitolo nono, *Disposizioni di sicurezza*).

La Ditta *Johnson & Phillips* di Londra costruisce il trasformatore ideato dall'autore. Le particolarità di questa costruzione si possono rilevare dalle figure 42 a 46, e non richiedono quindi una speciale descrizione. La figura 149 rappresenta le parti di un trasformatore da 2 kw., e

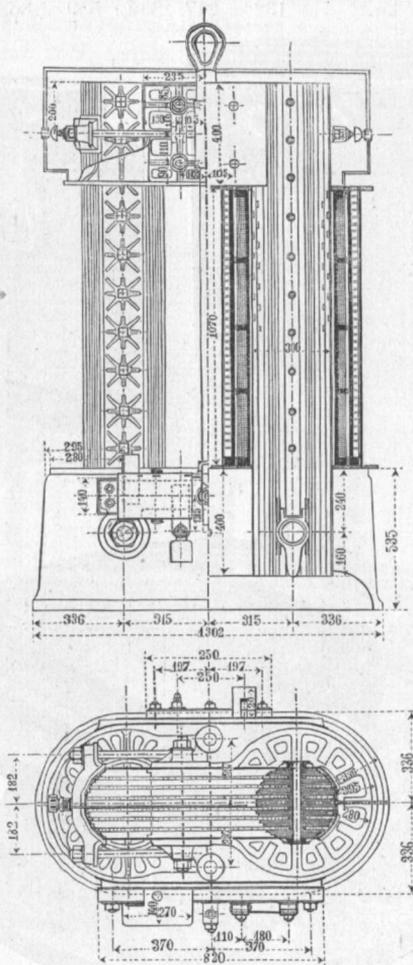


Fig. 151 a) b),

la figura 150 la vista complessiva di un trasformatore da 10 kw. e della corrispondente cassa.

La Casa *Ganz & C^o* di Budapest costruisce trasformatori a mantello con nucleo corto (fig. 151). La carcassa è composta di lamiere tagliate in forma di E, che sono fissate a mezzo di forti piastre e compresse mediante bulloni.

Le piastre sono circolari, di modo che il trasformatore può venir rotolato sul suolo senza pericolo di guastarlo. I morsetti sono montati su zoccoli di porcellana e quelli dell'avvolgimento primario sono provvisti di sicurezze fusibili. I fili sono avvolti su appositi rocchetti di cartone, ottenendo così un perfetto isolamento. I rocchetti sono suddivisi per diminuire la dispersione; ne risultano rocchetti schiacciati in forma di dischi.

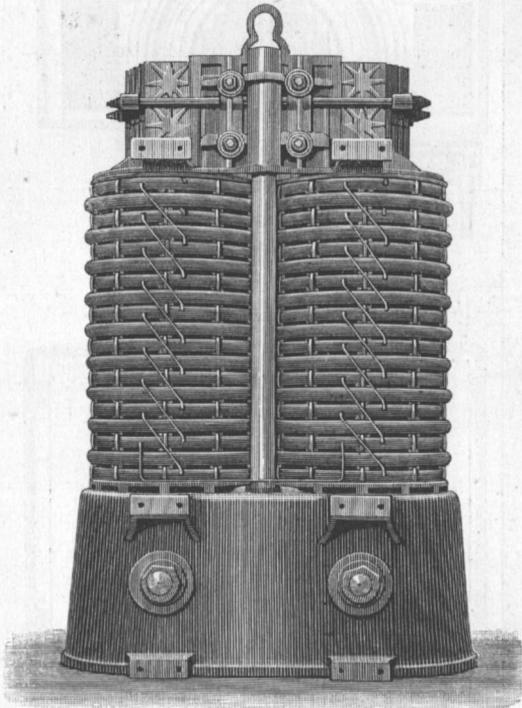


Fig. 131 c).

[Attualmente la Ditta *Ganz & C°* di Budapest, oltre al tipo di trasformatori qui sopra descritto, che adotta per capacità fino 50 k. v. a. per corrente monofase e trifase, costruisce pure trasformatori di tipo diverso per capacità da 100 a 600 e più k. v. a.

Questi trasformatori sono del tipo a nucleo ed hanno la carcassa della forma rappresentata in figure 15 e 18, a seconda che servono per corrente monofase o trifase. Le lamiere che la costituiscono sono tagliate di larghezza decrescente, in guisa che le colonne del nucleo, su cui sono infilati i rocchetti, si avvicinano alla forma cilindrica. Alcune lamiere nell'interno della carcassa sono ripiegate in modo da lasciare dei canali, che servono

a facilitare la circolazione dell'aria. Il giogo inferiore è racchiuso in un basamento in ghisa in forma di campana; il giogo superiore ed i nuclei

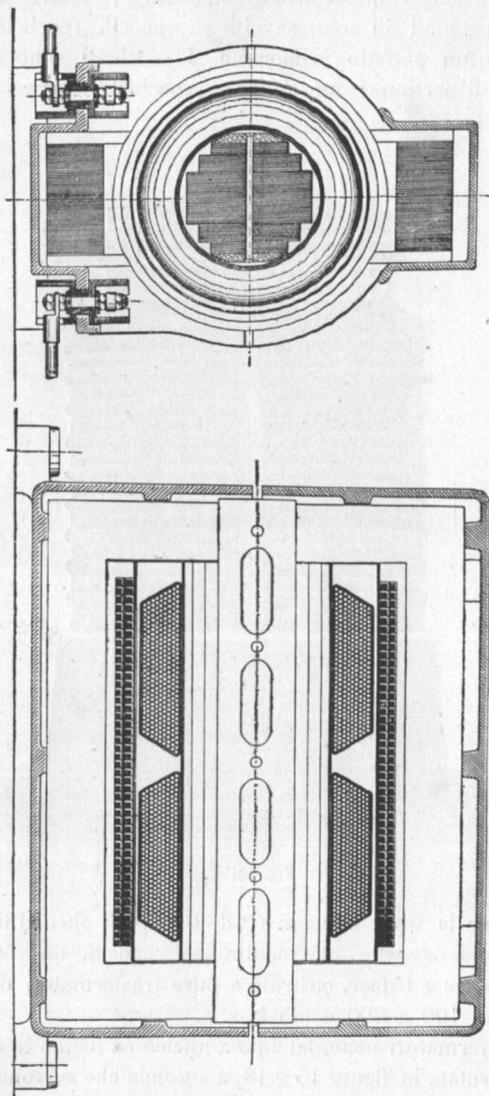


Fig. 152.

sono pure serrati fortemente a mezzo di piastre e di viti, ed infine due grossi bulloni tengono unito saldamente il giogo superiore al basamento in ghisa.

I rocchetti primari e secondari sono infilati alternativamente sui nuclei e tra di essi sono lasciati vani sufficienti per il passaggio dell'aria. Questi trasformatori sono costruiti espressamente per essere ventilati artificialmente, iniettando l'aria sotto la campana di base a mezzo di un apposito ventilatore. Le figure 151 *a-b*) rappresentano la costruzione della carcassa e la figura 151 *c*) la vista di un trasformatore per corrente monofase di questo tipo, della capacità di 200 k. v. a.].

(Nota dei traduttori).

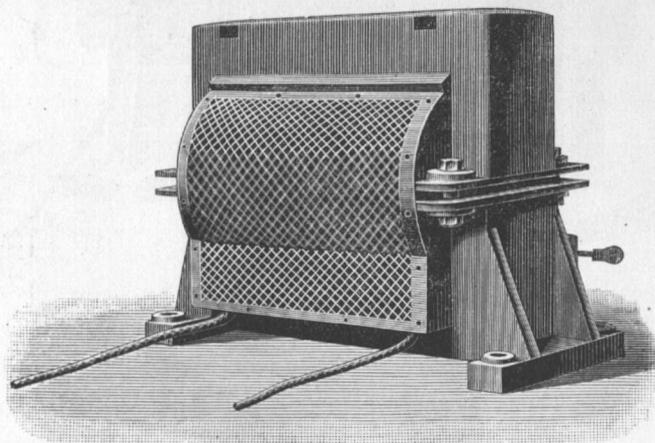


Fig. 153.

La Fabbrica di macchine *Oerlikon* costruisce trasformatori sia monofasi che trifasi; i primi del tipo a mantello a lungo nucleo ed i secondi del tipo a nucleo. La figura 152 indica la costruzione di un trasformatore monofase comune. Il nucleo è formato da lamiere di diversa larghezza, disposte in modo, che la sezione del nucleo si avvicina alla circolare. Le lamiere vengono fissate a mezzo di piastre d'ottone e bulloni, ed il nucleo è smussato alle estremità in modo, che le unioni al giogo in forma di \square hanno luogo su tutta la larghezza.

I rocchetti sono indipendentemente avvolti su cilindri di carta, le cui dimensioni sono scelte in modo, che i rocchetti possono venirvi comodamente infilati. I gioghi sono mantenuti fra le due metà di una cassa in ghisa e sono compressi contro il nucleo a mezzo di bulloni. I rocchetti sono protetti da azioni esterne con lamiere forate che chiudono la cassa da ambe le parti, come lo indica la figura 153. La figura 154 rappresenta una costruzione analoga, ma senza lamiere di protezione.

Per corrente trifase la stessa Ditta costruisce due tipi di trasformatori, l'uno a gioghi circolari (fig. 155 e 156), e l'altro a gioghi diritti (fig. 157).

Teoricamente la prima disposizione è preferibile, perchè in tal modo la lunghezza del percorso magnetico è eguale per tutte e tre le fasi e

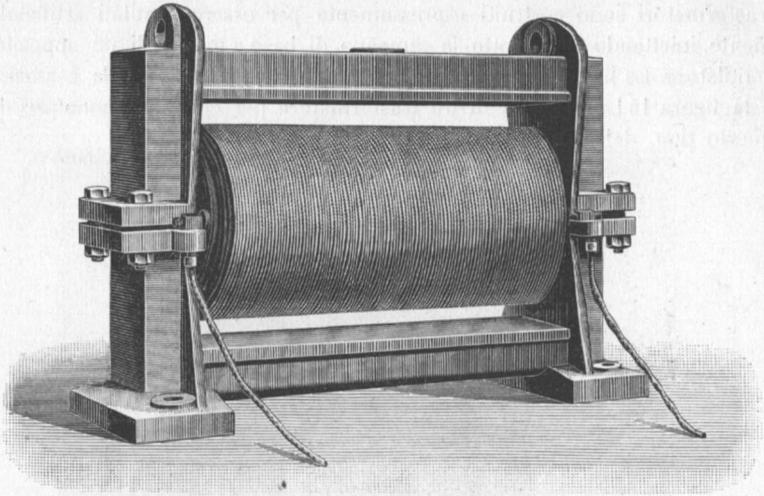


Fig. 151.

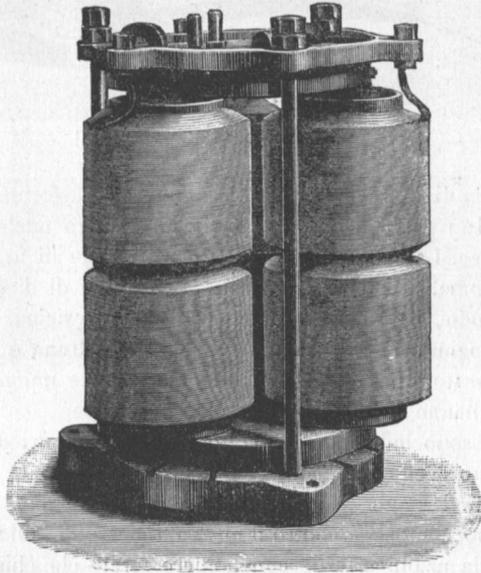


Fig. 155.

si ha quindi una perfetta simmetria; in pratica però questo vantaggio non è notevole. La resistenza magnetica del giogo stesso, in confronto a quella delle connessure, è così piccola, che la mancanza di simmetria,

cioè la diversità di lunghezza del percorso magnetico nel tipo rappresentato dalla figura 157 non ha alcuna importanza. D'altro canto quest'ultima costruzione è di esecuzione alquanto più comoda.

La *Electric Construction Company Ltd.* di Wolverhampton è stata una delle prime Società inglesi che si è occupata della costruzione di trasformatori, usando il tipo a mantello, che continua tuttora a fabbricare. Mentre

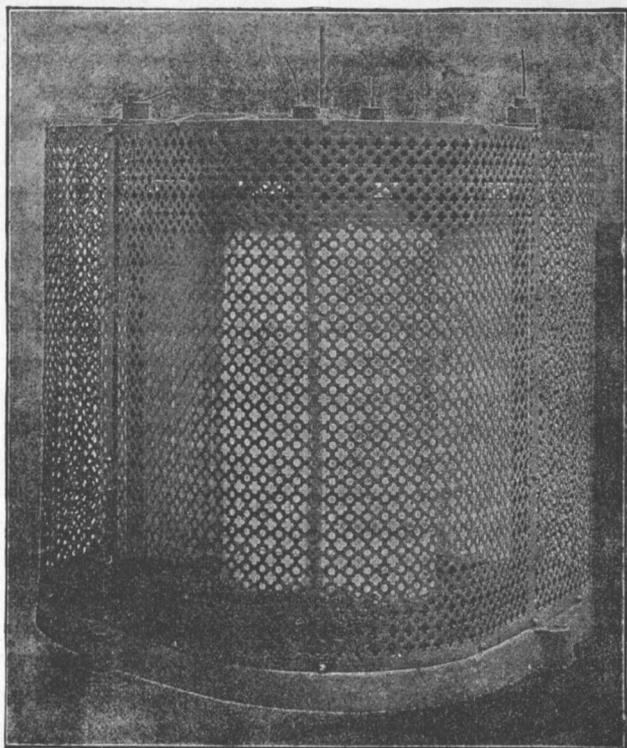


Fig. 156.

nei suoi primi tipi si avvicinava molto alle costruzioni americane, essa ha introdotto attualmente interessanti innovazioni, che hanno lo scopo di ottenere una migliore utilizzazione del materiale e un rendimento più elevato. La fig. 158 rappresenta un trasformatore da 10 kw. e la fig. 159 uno da 40 kw. I rocchetti sono in forma di lunghi rettangoli, cioè la carcassa è lunga in confronto allo spessore dei nuclei, e nel maggiore di questi tipi è stata fatta una prova per ottenere la potenza voluta, impiegando una piccola quantità di lamiera. A questo scopo le sezioni dei rocchetti furono scelte in modo che essi riempiono completamente un anello a sezione circolare.

Le finestre delle lamiere non sono quindi rettangolari ma circolari e le lamiere stesse sono dischi circolari. Tutti i dischi hanno eguale diametro interno; il loro diametro esterno è invece diverso e nella costruzione delle carcasse vengono impiegati alternativamente una serie di dischi più grandi ed una di dischi più piccoli, con che viene notevolmente ingrandita la superficie refrigerante della carcassa. La trasmissione



Fig. 157.

del calore all'esterno è anche aumentata per il fatto, che l'involucro è provvisto alla parte interna di numerose e sottili nervature. Questi trasformatori vengono tenuti verticali e l'involucro viene fatto tanto alto, che alla parte superiore rimane uno spazio sufficiente per disporvi un interruttore bipolare, le valvole di sicurezza e la disposizione di Cardew per impedire il passaggio della corrente ad alta nel circuito a bassa tensione.

La *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft* di Berlino costruisce trasformatori monofasi e polifasi del tipo a nucleo. I nuclei sono di sezione tale, che lo spazio circolare intorno ai rochetti riesce bene utilizzato. La

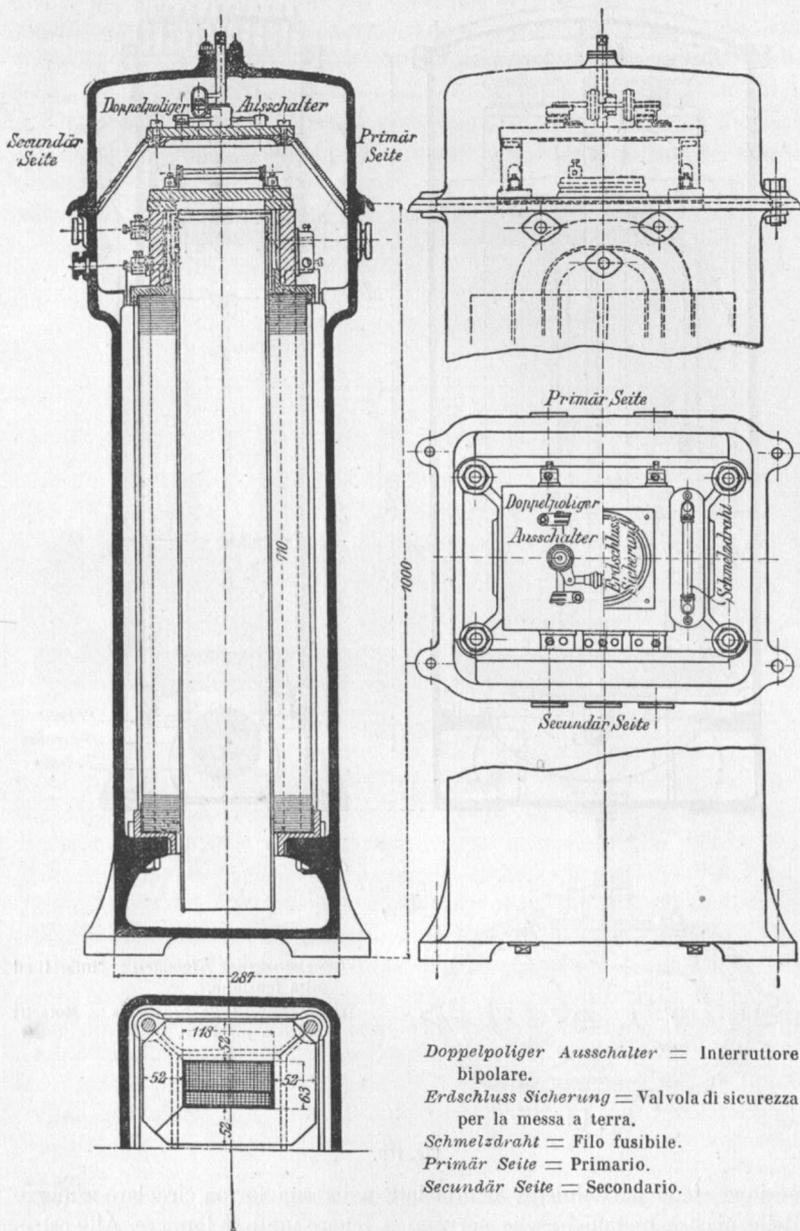
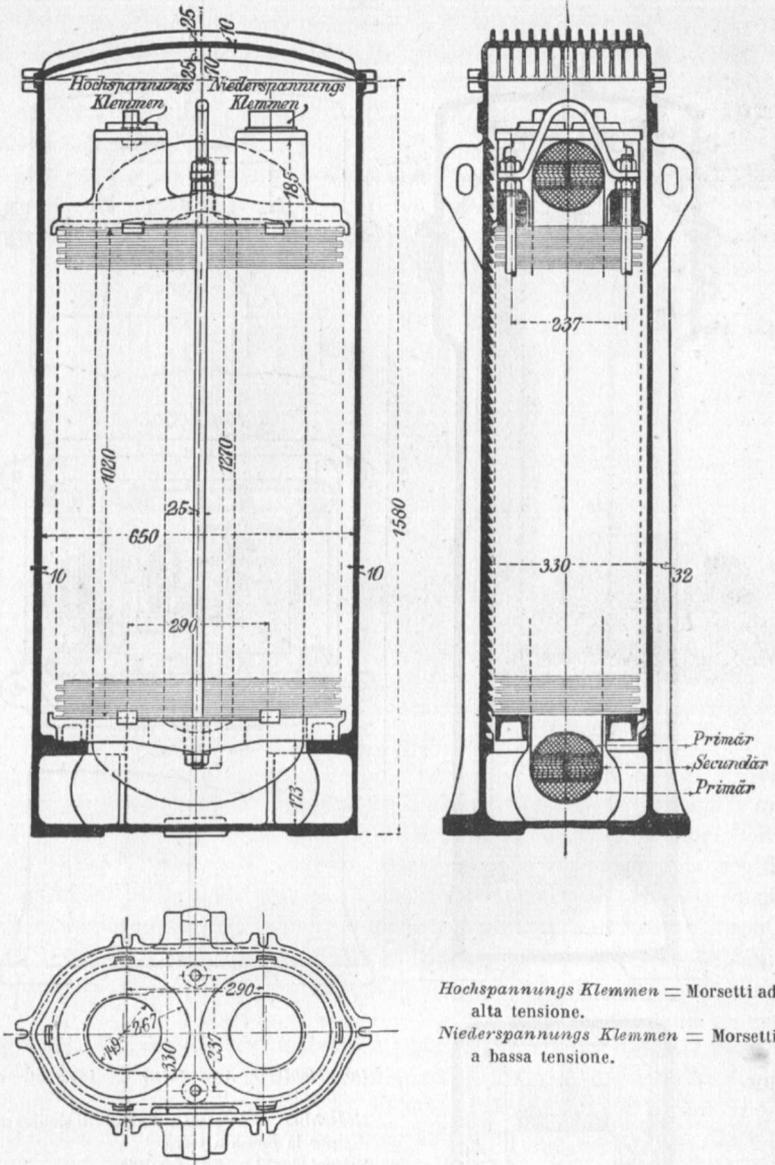


Fig. 138.



Hochspannungs Klemmen = Morsetti ad alta tensione.

Niederspannungs Klemmen = Morsetti a bassa tensione.

Fig. 159.

sezione viene parzialmente completata nella sua forma circolare a mezzo delle piastre metalliche che servono a tenere unite le lamiere. Alle estremità i nuclei sono intagliati per tenere le giunzioni di lunghezza eguale

alla totale larghezza del nucleo. I gioghi sono pure fermati da piastre laterali e bulloni e sono di sezione rettangolare o quadrata. I rocchetti secondari nei piccoli trasformatori non vengono avvolti su cilindri di carta, ma vengono semplicemente infilati sui nuclei ben isolati, ciò che riesce possibile per il fatto che i nuclei sono di sezione pressochè circolare. Con ciò si rende minima la lunghezza media degli avvolgimenti. I rocchetti primari vengono avvolti su cilindri di micanite e vengono infilati sui rocchetti secondari col minimo gioco possibile. La differenza

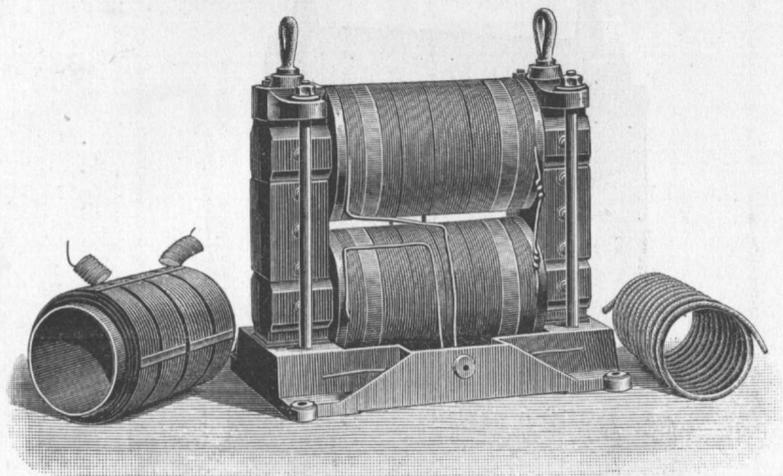


Fig. 160.

fra il raggio esterno dei rocchetti secondari e quello interno dei rocchetti primari importa soltanto circa 5 mm. In conseguenza di ciò la dispersione magnetica e la perdita di tensione sono molto piccole. La figura 160 rappresenta un trasformatore da 10 kw. e le parti del medesimo. Questo apparecchio venne provato dal signor v. Dolivo-Dobrowolsky in riguardo alla dispersione magnetica secondo il metodo dell'autore. La resistenza ohmica porta una perdita di tensione del 2 ‰, mentre la tensione complessiva a corto circuito importa solamente il 4 ‰ della tensione normale d'esercizio. La perdita di tensione determinata in base a queste cifre a mezzo del diagramma vettoriale risulta a pieno carico

per $\varphi = 0^\circ$	del 2,3 ‰
» $\varphi = 60^\circ$	» 4,0 ‰
» $\varphi = 90^\circ$	» 3,9 ‰

La figura 161 rappresenta un trasformatore trifase e le parti del medesimo. Questo tipo ha la capacità di 40 kw. e viene impiegato nell'impianto di illuminazione con corrente trifase della città di Strasburgo. Per

rendere ancora minore la perdita di tensione, i rocchetti non sono disposti l'uno dentro l'altro, ma uno di fianco all'altro in forma di dischi schiacciati; e se ne hanno molti per ciascun avvolgimento. La tensione a corto circuito importa soltanto il 3 % della tensione d'esercizio; la perdita di tensione anche per carico di motori non può quindi superare il 3 %. I rocchetti di ambedue i circuiti sono avvolti su sostegni di micanite, con

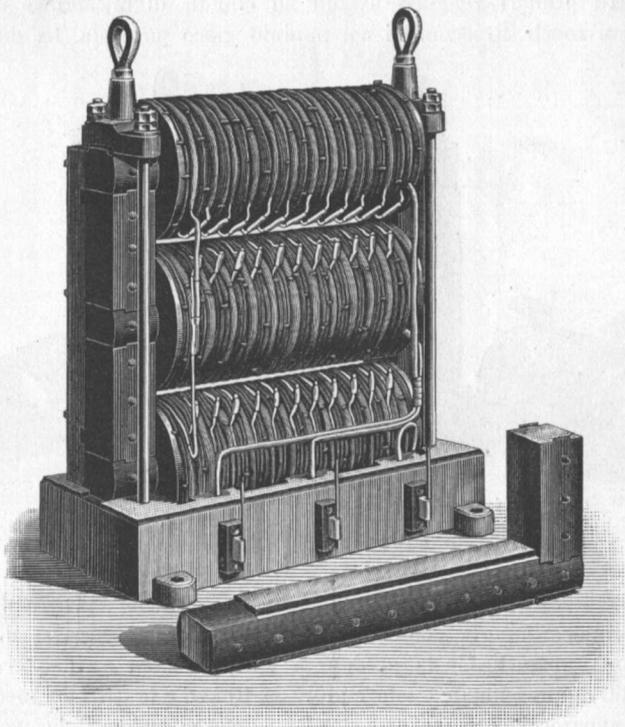


Fig. 161.

che si raggiunge un perfetto isolamento. Ambedue i tipi di trasformatori qui rappresentati sono coperti da lamiere di protezione forate; queste lamiere furono però ommesse nelle figure, per poter rappresentare più chiaramente la costruzione.

I tipi più moderni costruiti dalla *Westinghouse Electric & Manufacturing Company* di Pittsburg sono rappresentati nelle figure 162 a 164. La figura 162 rappresenta il tipo normale adottato per scopi d'illuminazione, che vengono costruiti per capacità fino 30 kw. Il nucleo è corto ed il suo spessore, misurato in senso normale alle lamiere, è pure relativamente piccolo, di modo che una parte abbastanza grande dei roc-

chetti rimane libera ed è quindi raffreddata dall'aria. Per rendere ancora più attivo il raffreddamento, i rocchetti sono ripiegati in questa parte allontanandoli l'uno dall'altro, così l'aria non si trova in contatto soltanto con le superfici esterne dei rocchetti; ma può penetrare anche tra essi. La carcassa viene tenuta assieme mediante forti telai in ghisa e per proteggere i rocchetti ai due lati sono disposte delle lamiere forate. Una di

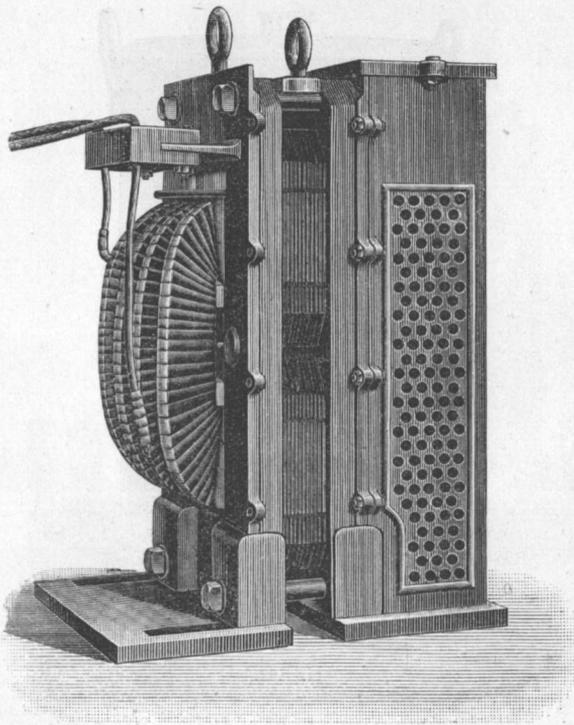


Fig. 162.

queste lamiere venne omissa nella figura. Le altre due figure rappresentano i trasformatori da 100 kw., che sono impiegati nell'impianto alla cascata del Niagara. Il rapporto di trasformazione è di 2000 a 150 volt, l'avvolgimento però è eseguito in modo, che esso può venire parzialmente modificato ed è per questo scopo che si ha un secondo paio di morsetti primari. Gli avvolgimenti primari e secondari sono divisi in quattro rocchetti per ciascuno. I secondi sono riuniti fra loro in parallelo, i primi invece in serie. Nel mezzo trovansi due rocchetti primari poi trovansi da ciascun lato due rocchetti secondari e da ultimo di nuovo un rocchetto primario da ciascuna parte. I rocchetti, come abbiamo già

detto, sono ripiegati allontanandoli l'uno dall'altro, il raffreddamento però non è provocato dall'aria, ma mediante olio; per cui il trasformatore viene racchiuso entro un recipiente cilindrico (fig. 163). Le condutture vengono introdotte attraverso a scatole a stoppa. Per raffreddare rapidamente l'olio nell'interno del recipiente, vicino alla parete è disposto un serpentino refrigerante attraversato da una corrente d'acqua fredda.

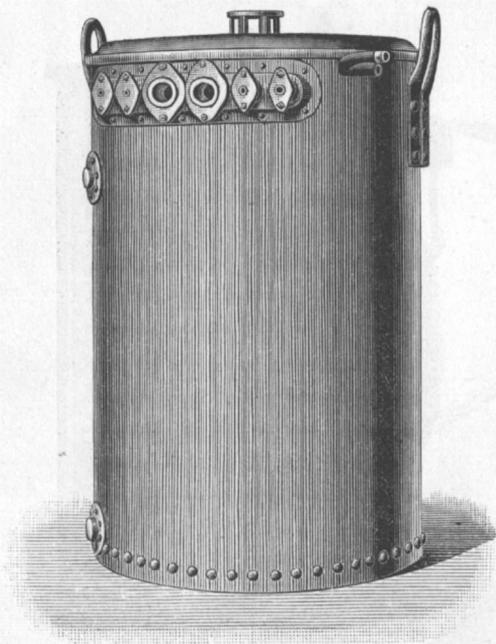


Fig. 163.

La *Union Elektricitäts-Gesellschaft* di Berlino ha fornito per le sottostazioni di trasformazione della *London Central Railway* trasformatori rappresentati dalla figura 165. Ciascun trasformatore è costruito per un carico di 910 ampère e 330 volt. Nucleo e mantello, come pure i rocchetti sono dotati di abbondanti spazi d'aria per la ventilazione, che si può regolare mediante saracinesche disposte nell'involucro. L'avvolgimento è suddiviso in quattro rocchetti primari e quattro secondari. I rocchetti primari sono tutti inseriti in serie, quelli secondari sono inseriti due in serie e due in parallelo. In ambedue gli avvolgimenti viene impiegato del nastro nudo di rame e precisamente nell'avvolgimento primario esso ha 2,28 mm. di spessore ed 8,6 mm. di larghezza, nell'avvolgimento secondario invece ha 3,05 mm. di spessore e 16,5 mm. di larghezza. Nel pri-

mario si hanno due conduttori e nel secondario sei, inseriti in parallelo tra loro. Gli avvolgimenti sono isolati tra loro con carta oleata e mica. I rocchetti finiti sono avvolti con un nastro di cotone gommato per uno spessore di 3 mm. e riescono così isolati tra loro ed isolati pure dalla

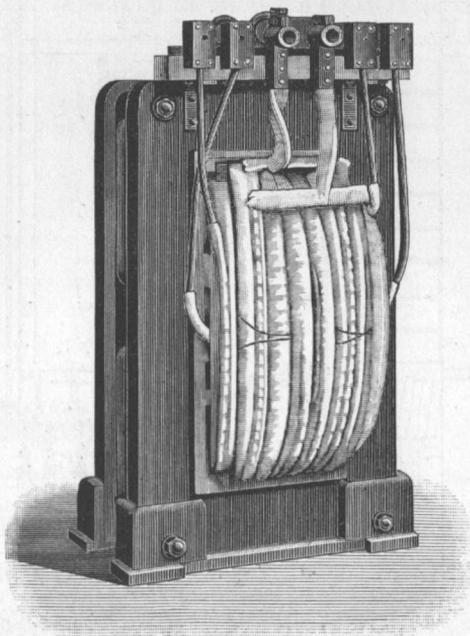


Fig. 164.

carcassa di ferro. Inoltre fra ciascun rocchetto primario e secondario si ha una parete isolante di cartone. I dati elettrici di questo trasformatore sono i seguenti:

Sezione del nucleo	A = 2060
Induzione	B = 10.400
Flusso di forza	N = $21,3 \times 10^6$
Frequenza	$\omega = 25$
Tensione primaria	$e_1 = 5000$
Tensione secondaria	$e_2 = 330$
Numero delle spire	} primario . . . $n_1 = 212$
inserie		} secondario . . . $n_2 = 14$
Sezione in mm ²	$q_1 = 39$ $q_2 = 600$
Resistenza	$W_1 = 33$ $W_2 = 0,0014$

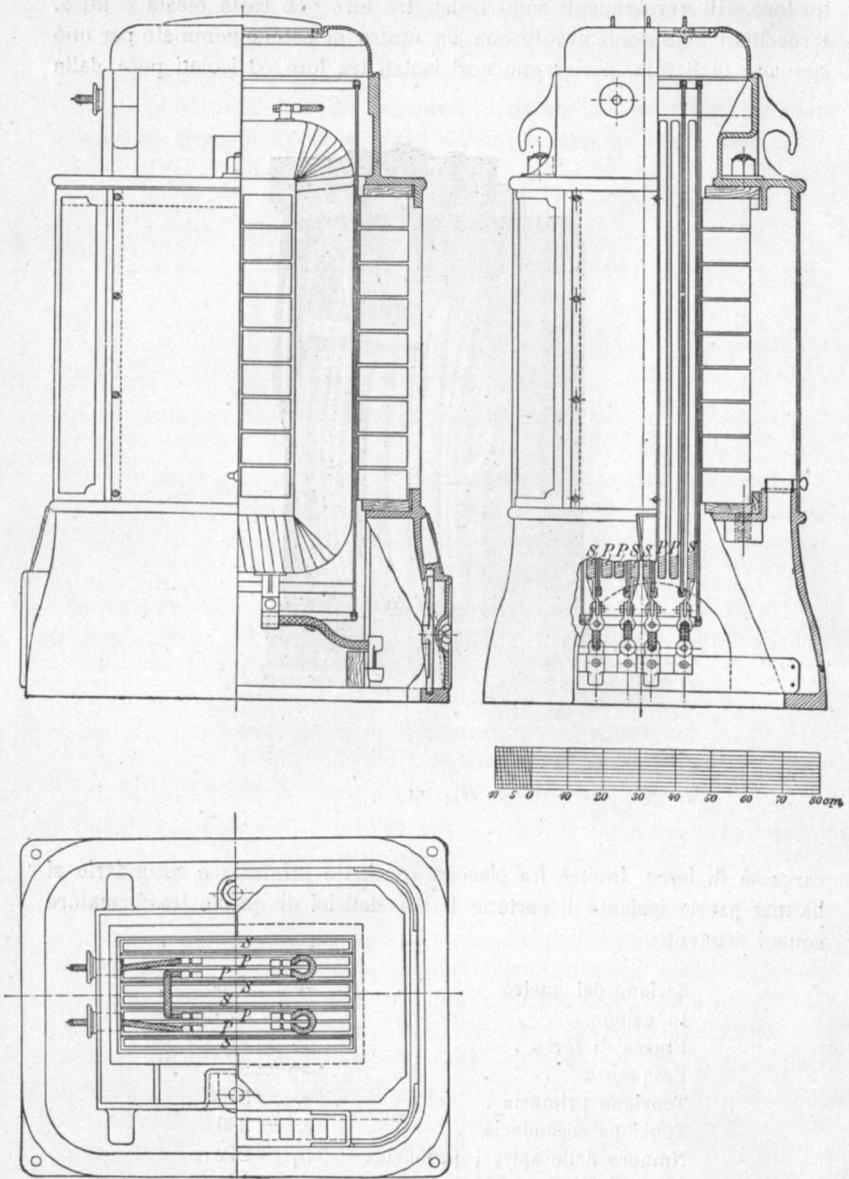


Fig. 165.

Calcolando il trasformatore in base a questi dati, si ottiene come corrente di magnetizzazione 1,45 ampère, e per la corrente utile a vuoto 0,74 ampère. La totale corrente a vuoto è quindi

$$i_0 = 1,63 \text{ ampère,}$$

ossia il 2,65 % della corrente a pieno carico.

Il peso della carcassa è di 2450 kg. Secondo le curve indicate a pag. 17 per $\omega = 25$ e per uno spessore delle lamiere di 0,365 mm. le perdite nel ferro per kg. sono:

per isteresi	1,35 watt
per correnti parassite	0,17 »
Totale	1,52 watt

Per questo trasformatore la perdita nel ferro è quindi

$$2450 \times 1,52 = 3720 \text{ watt.}$$

La corrente secondaria è di 910 ampère, e quella primaria sarebbe di 60 ampère se il trasformatore non avesse perdite nel ferro. La effettiva intensità della corrente secondaria si può determinare con una sufficiente approssimazione per la pratica, aggiungendo al valore così trovato l'intensità della corrente a vuoto. Risulta

$$i_i = 61,63 \text{ ampère.}$$

Da questi valori delle intensità delle correnti e dalle resistenze si può determinare la perdita ohmica, come segue:

Primario.	1250 watt
Secondario	1160 »
Per tutti e due gli avvolgimenti adunque	2410 »
La perdita nel ferro è di	3720 »
Quindi la perdita totale	6130 »

Questa corrisponde al 2,05 % soltanto della capacità totale, quindi il trasformatore ha un rendimento di circa il 98 %.



INDICE

CAPITOLO PRIMO

Natura dei trasformatori	Pag. 1
Dispersione magnetica	» 2
Disposizione dei rocchetti	» 6
Determinazione della formola fondamentale	» 7

CAPITOLO SECONDO

Perdite nei trasformatori	Pag. 14
Influenza della curva della tensione sulla perdita per isteresi	» 18
Influenza della forma dei nuclei e dei rocchetti sulle perdite	» 23
Trasformatori a nucleo ed a mantello	» 24

CAPITOLO TERZO

Forme in uso	Pag. 29
Costruzione della carcassa	» 31
Proporzioni della carcassa	» 36
Riscaldamento dei trasformatori per effetto delle perdite di lavoro	» 38
Risultati dell'esperienza	» 41
Teoria del riscaldamento	» 43
Influenza delle dimensioni lineari	» 48
Formole per calcolare approssimativamente le capacità	» 55

CAPITOLO QUARTO

Potenza motrice di una corrente alternata	Pag. 57
Composizione di intensità di correnti e di tensioni	» 63
Determinazione della corrente a vuoto	» 66
Influenza delle commessure di giunzione	» 70

CAPITOLO QUINTO

Costruzione di un trasformatore	Pag. 72
Ripartizione più conveniente del rame tra i due rocchetti	» 73
Costo del materiale attivo	» 79
Ripartizione più conveniente delle perdite	» 80
Economia d'esercizio	» 81
Dettagli di costruzione	» 84

CAPITOLO SESTO

Il diagramma vettoriale	<i>Pag.</i> 89
Calcolo della caduta induttiva di tensione	» 96
Azione della frequenza sulla caduta induttiva di tensione	» 104
Determinazione grafica delle grandezze riguardanti il lavoro	» 106
Determinazione grafica della caduta di tensione ai morsetti secondari	» 112

CAPITOLO SETTIMO

Teoria dell'eccitazione trasportata	<i>Pag.</i> 129
Applicazione del concetto dell'eccitazione trasportata ai trasformatori	» 133
Uguaglianza dei coefficienti di trasporto	» 137
Il diagramma circolare	» 140
Trasformatore a corrente costante	» 145

CAPITOLO OTTAVO

Il dinamometro	<i>Pag.</i> 146
Il wattometro	» 148
Misura di correnti irregolari	» 152
Altri metodi per la misura dell'energia	» 156
Prova dei trasformatori	» 161
Prova delle lamiere	» 164

CAPITOLO NONO

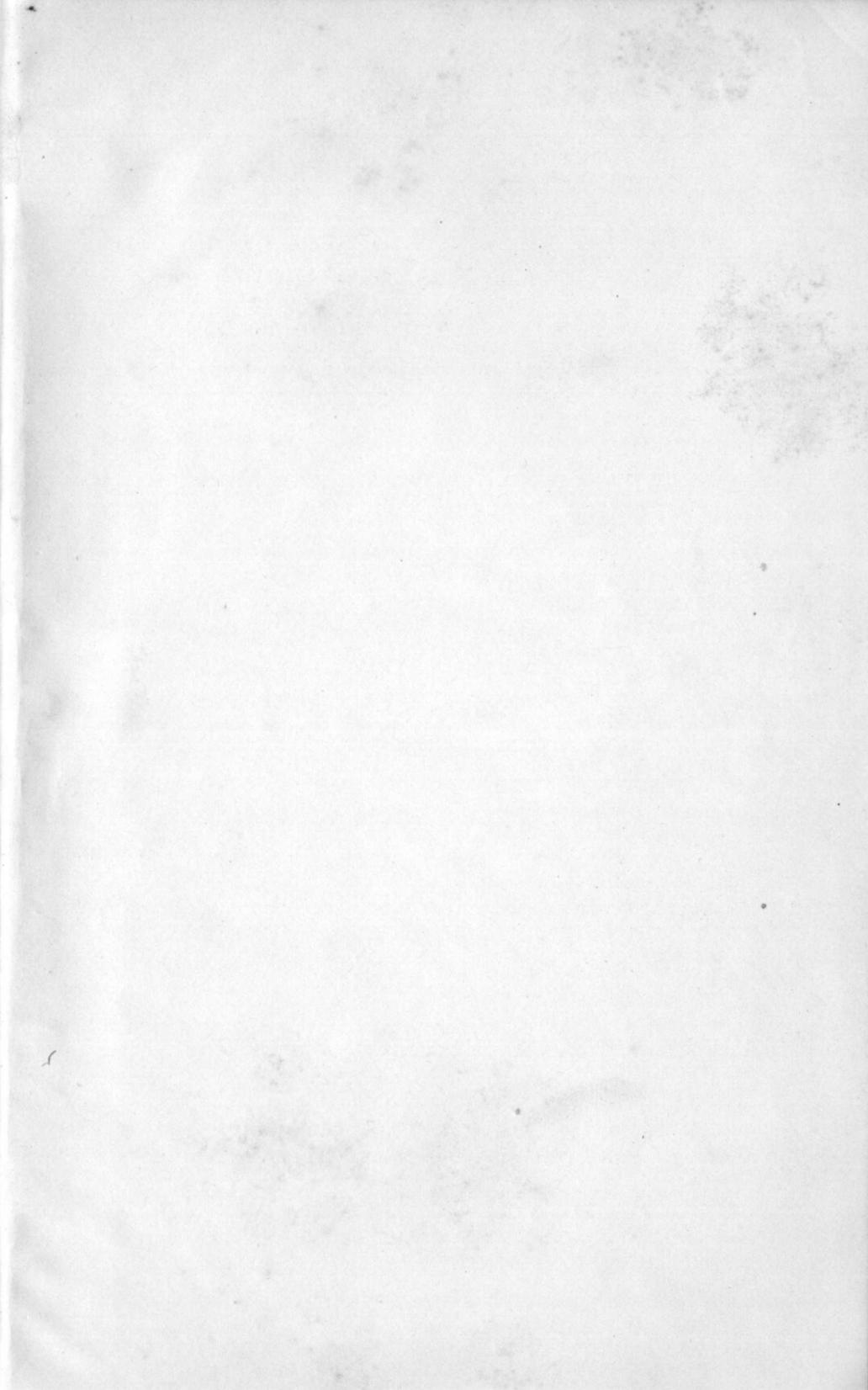
Disposizioni di sicurezza per trasformatori	<i>Pag.</i> 170
Impiego dei trasformatori	» 173
Elevatore di tensione	» 177
Inserzione in serie	» 183
Rocchetti d'induzione	» 187
Rocchetti di compensazione	» »
Sistema a tre fili	» 190
Trasformatore di compensazione	» »
Sistema di distribuzione Scott	» 191

CAPITOLO DECIMO

Il trasformatore ed i suoi circuiti	<i>Pag.</i> 194
Costanti elettriche delle condutture	» 198
Risonanza	» 200
Aumento di tensione per effetto della risonanza	» 201
Fulminazione di cavi in reti estese	» 209

CAPITOLO UNDECIMO

Descrizione ed illustrazione di diversi tipi di trasformatori	<i>Pag.</i> 216
---	-----------------





LEO. P. F. FONNARI E VICIANI
TORINO