**SULL'IMPIEGO DEI CONDENSATORI NELLE TRASMISSIONI DI ENERGIA ELETTRICA
A CORRENTI ALTERNATE, E LORO COSTRUZIONE INDUSTRIALE.**

del Prof. LUIGI LOMBARDI.

(Dalla Memoria premiata dal R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere
nel concorso al Premio Kramer 1897).

L'impiego dei condensatori nelle trasmissioni di energia elettrica mediante correnti alternate, è tra i più interessanti problemi di elettrotecnica, e ciò soprattutto perchè un impiego razionale di condensatori permetterebbe in molti casi di trasmissione dell'energia a grandi distanze di realizzare notevoli economie nell'impianto della linea e nell'utilizzazione delle macchine. Fin'ora una tale applicazione sistematica non si fecé, eccetto che in alcuni casi particolari, il più comune dei quali è quello di realizzare in circuiti locali piccole correnti di fase spostata, generalmente allo scopo di mettere in marcia motori asincroni.

L'A. quindi tratta sistematicamente la questione e per ciò discute da prima i più importanti fenomeni dovuti alla presenza di una capacità elettrostatica in un circuito di corrente alternata, e di poi tratta della costruzione industriale dei condensatori, in base ad esperienze originali ed ai criteri più generalmente adottati.

Parte I.

**Teoria dei circuiti di corrente alternata
contenenti capacità elettrostatica.**

**I. Capacità localizzata in una sezione del circuito
contenente resistenza e selfinduzione.**

1. *Si supponga data la f. e. m. sinusoidale nel circuito.* — Sia C la capacità del condensatore inserito nel circuito la cui resistenza ohmica totale è R e la selfinduzione L ; con p si in-

dichi la differenza di potenziale fra le armature, con e la f. e. m. agente nel circuito in un istante qualunque t in cui la corrente ha l'intensità i . Sia

$$e = E \cos mt$$

la legge sinusoidale secondo cui la f. e. m. varia in funzione del tempo.

Dalle equazioni del circuito si ricava per i valori di p ed i :

$$p = \frac{E}{\sqrt{(1-m^2 LC)^2 + (mRC)^2}} \cos \left(mt - \arctg \frac{mRC}{1-m^2 LC} \right);$$

$$i = \frac{mCE}{\sqrt{(1-m^2 LC)^2 + (mRC)^2}} \cos \left(mt + 90^\circ - \arctg \frac{mRC}{1-m^2 LC} \right).$$

Il rapporto tra i valori efficaci della differenza di potenziale sulle armature del condensatore e della f. e. m. è:

$$\frac{P}{E} = \frac{1}{\sqrt{(1-m^2 LC)^2 + (mRC)^2}}.$$

Se R è molto piccolo, si può ritenere per questo rapporto il valore $\frac{1}{1-m^2 LC}$ il quale può diventar grandissimo quando $m^2 LC$ differisce poco dall'unità.

Se $m^2 LC = 1$, si ha:

$$p = \frac{E}{mRC} \cos (mt - 90^\circ)$$

$$i = \frac{E}{R} \cos (mt).$$

Si suol dire in questo caso che l'azione della capacità neutralizza quella della selfinduzione, perchè la corrente ha in ogni istante la stessa intensità che la f. e. m. darebbe in un circuito di sola resistenza ohmica R . Questa condizione si denomina anche di « risonanza » e non è realizzabile eccettochè per una f. e. m. variabile con legge semplice sinusoidale.

2. È data la differenza di potenziale fra due punti del circuito. — Esistono in questo caso relazioni analoghe alle precedenti. Se R_1 ed L_1 rappresentano la resistenza e selfindu-

zione della porzione esterna del circuito, in cui è inserito il condensatore e se

$$p' = P' \cos mt$$

è la differenza di potenziale data, variabile con legge sinusoidale, il rapporto delle differenze efficaci di potenziale è:

$$\frac{P}{P'} = \frac{1}{\sqrt{(1 - m^2 L_1 C)^2 + (m R_1 C)^2}}.$$

Questo rapporto è massimo, quando la capacità del condensatore è:

$$C_* = \frac{L_1}{m^2 L_1^2 + R_1^2}.$$

Se varia solamente la frequenza della differenza di potenziale alternativa, lo stesso rapporto diventa massimo per la frequenza che corrisponde alla condizione di risonanza.

La verifica sperimentale di queste deduzioni teoriche è stata eseguita dall' A. in una serie sistematica di misure; le esperienze risultarono in accordo perfetto coi risultati analitici.

3. *La selfinduzione è realizzata mediante ferro.* — Si deve ammettere in questo caso, per spiegare i fenomeni di isteresi magnetica, che la polarizzazione dei pezzi di ferro non avvenga istantaneamente, ma tenga dietro all'azione della forza magnetizzante con un determinato ritardo di tempo.

Il calcolo si può eseguire assegnando alla f. e. m. di selfinduzione una fase ritardata dell'angolo corrispondente.

Se t' rappresenta il ritardo di tempo della magnetizzazione, e si pone $2\pi n t' = \nu$ si ha:

$$\frac{P}{P'} = \frac{1}{\sqrt{(1 - m^2 L_1 C \cos \nu)^2 + (m R_1 C + m^2 L_1 C \sin \nu)^2}}.$$

Se R_1 è molto piccolo, l'espressione diventa:

$$\frac{P}{P'} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2 m^2 L_1 C \cos \nu + (m^2 L_1 C)^2}}$$

la quale ha un massimo per $m^2 L_1 C = \cos \nu$.

L'isteresi magnetica limita dunque la possibilità di elevare indefinitamente la tensione ai morsetti del condensatore mediante una combinazione di selfinduzione e capacità, quando la prima è realizzata mediante un materiale imperfettamente polarizzabile.

4. *La f. e. m. agente nel circuito non è sinusoidale.* — Rappresentando una qualunque delle grandezze alternative mediante una somma di termini sinusoidali, ogni altra grandezza si potrà considerare a sua volta come la sovrapposizione di altrettante grandezze sinusoidali, le cui ampiezze e fasi sono legate a quelle della grandezza fondamentale da relazioni analoghe a quelle già trovate nel caso più semplice.

Così se :

$$e = E_1 \cos(m_1 t + \alpha_1) + E_3 (\cos m_3 t + \alpha_3) + \dots$$

sarà

$$p = \frac{E_1}{\sqrt{(1 - m_1^2 LC)^2 + (m_1 RC)^2}} \cos(m_1 t + \alpha_1 - \delta_1) + \\ + \frac{E_3}{\sqrt{(1 - m_3^2 LC)^2 + (m_3 RC)^2}} \cos m_3 t + \alpha_3 - \delta_3) + \dots$$

ed

$$i = \frac{E_1 C m_1}{\sqrt{(1 - m_1^2 LC)^2 + (m_1 RC)^2}} \cos\left(m_1 t + \alpha_1 - \delta_1 + \frac{\pi}{2}\right) + \\ + \frac{E_3 C m_3}{\sqrt{(1 - m_3^2 LC)^2 + (m_3 RC)^2}} \cos\left(m_3 t + \alpha_3 - \delta_3 + \frac{\pi}{2}\right) + \dots$$

La condizione di perfetta risonanza, per cui $i = \frac{e}{R}$, si avrà solo quando :

$$1 = m_1^2 LC = m_3^2 LC = \dots$$

cioè le sinusoidi devono avere la stessa frequenza.

La differenza efficace di potenziale alle armature del condensatore sarà :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{E_1^2}{(1 - m_1^2 LC)^2 + (m_1 RC)^2} + \frac{E_3^2}{(1 - m_3^2 LC)^2 + (m_3 RC)^2} + \dots}$$

I risultati si possono applicare al caso in cui si vogliano eseguire misure assolute di capacità elettrostatica mediante correnti alternate generate da una macchina la cui f. e. m. differisca naturalmente poco da una forma semplice sinusoidale. Le misure in generale non si possono eseguire senza tener conto della divergenza della forma della corrente alterata dalla sinusoide, ed esse non possono offrire grande sicurezza se non quando tale divergenza è molto esigua.

5. *Il dielettrico presenta una certa conduttività ed isteresi elettrostatica.* — Nei casi pratici le armature del condensatore sono sempre separate da un mezzo che non ha proprietà di isolante e di dielettrico perfetto, e sebbene in molti casi le divergenze non si pronuncino così sentitamente da modificare in modo sensibile i risultati già trovati, tuttavia può interessare nel caso più generale di tenerne conto con espressioni più complete.

Se $p = P \cos(mt)$ è la differenza di potenziale sinusoidale fra le armature, e W la resistenza d'isolamento, si ha:

$$i = P \sqrt{\frac{1}{W^2} + m^2 C^2} \cos(mt + \arctg m CW).$$

La conduttività del mezzo ha dunque per effetto di aumentare l'intensità efficace della corrente e diminuirne la differenza di fase rispetto alla differenza di potenziale tra le armature. Nell'interno del condensatore si consuma una quantità d'energia elettrica $\frac{P^2}{W}$; Se il mezzo è anche un dielettrico imperfetto, la fase della carica viene ritardata rispetto a quella del potenziale di un certo tempo t' a cui corrisponde un certo angolo $2\pi nt' = mt'$; viene quindi ancora modificata l'intensità efficace e la fase della corrente.

L'energia dissipata fra le armature è

$$P^2 \left(\frac{1}{W} + m C \sin mt' \right).$$

Per tal modo dalla misura di questa energia si può dedurre la grandezza di quel ritardo di polarizzazione.

6. *Nel circuito sono inseriti in serie parecchi sistemi resistenza e selfinduzione, intercalati con condensatori di determinata capacità.* — Le formule e i risultati sono gli stessi che se si avesse un circuito dove sono inseriti in serie una resistenza ohmica uguale alla somma di tutte le resistenze, una selfinduzione uguale alla somma delle selfinduzioni, ed una capacità uguale a quella di tutti i condensatori in serie.

7. *La distribuzione del potenziale e della corrente non è giunta ancora a regime.* — Ciò avviene, p. es., nei primi istanti all'inserzione di un circuito contenente un condensatore; è interessante vedere in questo caso se la capacità e la selfinduzione non diano per avventura luogo a sopraelevazioni pericolose di tensione.

Se si suppone che la f. e. m. del circuito abbia una forma sinusoidale $e = E \sin mt$ e che $4L > R^2C$, nel qual caso anche la semplice carica o scarica del condensatore sarebbe oscillante, si trova:

$$i = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{mC} - mL\right)^2}} \sin \left[mt + \arctg \left(\frac{1}{mCR} - \frac{mL}{R} \right) \right] + \\ + A e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \left[\frac{\sqrt{4LC - R^2C^2}}{2LC} t + \phi \right]$$

dove A e ϕ sono due costanti d'integrazione.

Per le applicazioni pratiche basta osservare che si ha una sopraelevazione momentanea di tensione, la quale però non oltrepassa i limiti che il condensatore può sopportare con sicurezza.

II. Circuito lungo il quale la capacità è distribuita con continuità.

8. Se il conduttore non presenta selfinduzione apprezzabile, e il mezzo che lo circonda è perfettamente isolante, il problema è analogo a quello della propagazione del calore nelle aste che non hanno conduttività esterna.

La trattazione {si potrà fare con metodi analoghi a quelli con cui si discutono i problemi del movimento del calore e delle vibrazioni elastiche.

a) CIRCUITO CONTENENTE SOLO RESISTENZA E CAPACITÀ.

9. Se si indicano con r e c la resistenza e la capacità del conduttore per unità di lunghezza, e se x rappresenta l'ascissa contata lungo l'asse di esso, di cui a è la lunghezza totale, se l'ultimo capo del conduttore è a terra ed al primo capo si mantiene un potenziale variabile con legge sinusoidale, in modo che sia :

$$(p)_0 = P_0 \cos mt; \quad (p)_a = 0,$$

si trova per una sezione qualunque la differenza efficace di potenziale espressa da :

$$P = P_0 \sqrt{\frac{e^{2\lambda(a-x)} + e^{-2\lambda(a-x)} - 2\cos 2\lambda(a-x)}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} - 2\cos 2\lambda a}}$$

e l'intensità efficace di corrente da :

$$I = P_0 \sqrt{\frac{2\pi n c}{r}} \sqrt{\frac{e^{2\lambda(a-x)} + e^{-2\lambda(a-x)} + 2\cos 2\lambda(a-x)}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} - 2\cos 2\lambda a}}.$$

Differenza di potenziale e intensità di corrente in una sezione qualunque presentano tra loro una differenza di fase di $\frac{\pi}{4}$. Se il conduttore ha lunghezza notevole, così che si possa ritenere con approssimazione $e^{-2\lambda a} = 0$, le formule che in tal caso danno i valori di p ed i , dimostrano che il potenziale e l'intensità di corrente subiscono in ogni sezione una variazione alternante con ampiezza e fase diversa. La propagazione lungo il conduttore si fa per onde aventi velocità tanto maggiore quanto più grande è la frequenza. Il fatto ha importanza grande nelle trasmissioni telefoniche, perchè per esso si altera la forma delle correnti trasmesse.

10. L' A. ha confermato sperimentalmente le deduzioni teoriche, adoperando due cavi artificiali: il 1° composto di 300 lampade ad incandescenza in serie, aventi in complesso una

resistenza ohmica di 365,000 ohm., e di 300 condensatori a carta paraffinata di circa 2 microfarad, di cui un'armatura era a terra e l'altra collegata coi punti di connessione delle lampade successive; il 2° composto solo di 10 lampade aventi una resistenza di 374 ohm ciascuna e di altrettanti condensatori aventi la capacità di circa 1 microfarad.

b) CIRCUITO CONTENENTE SELFINDUZIONE E CAPACITÀ.

11. Il caso di un conduttore avente unicamente resistenza e capacità uniformemente distribuite, interessa essenzialmente il problema delle trasmissioni telegrafiche e telefoniche, dove la resistenza e selfinduzione degli apparecchi può essere trascurabile rispetto alla resistenza della linea.

Le condutture destinate alla trasmissione industriale di corrente più generalmente hanno una resistenza piccola di fronte alla resistenza e selfinduzione degli apparecchi di utilizzazione, e molte volte hanno una così piccola capacità che le variazioni relative della corrente a questa dovute sono insensibili. Tuttavia si possono presentare fenomeni interessanti quando non è trascurabile la capacità e la selfinduzione uniformemente ripartita nel circuito.

12. *Caso di una piccola resistenza e di una tensione sinusoidale.* — Se il potenziale al primo capo del circuito varia con legge sinusoidale, ed il secondo capo è isolato, la differenza efficace di potenziale in una sezione qualunque ha per espressione:

$$P = P_0 \sqrt{\frac{e^{2\lambda(a-x)} + e^{-2\lambda(a-x)} + 2\cos 2\mu(a-x)}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} + 2\cos 2\mu a}}$$

dove le lettere mantengono il significato loro attribuito precedentemente.

L'intensità efficace di corrente è:

$$I = P_0 \frac{\sqrt{mC}}{\sqrt{R^2 + m^2 L^2}} \sqrt{\frac{e^{2\lambda(a-x)} + e^{-2\lambda(a-x)} - 2\cos 2\mu(a-x)}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} + 2\cos 2\mu a}}.$$

Le espressioni si semplificano notevolmente se gli elementi del circuito sono tali che si possano trascurare $\frac{R^2}{m^2 L^2}$ e $\lambda^2 a^2$.

In generale se la capacità non è grande, (basta per ciò che sia piccola la resistenza rispetto alla selfinduzione) la fase del potenziale nelle diverse sezioni del conduttore varia pochissimo, e la differenza efficace di potenziale nell'ultima sezione è espressa in funzione di quella iniziale da :

$$P_a = \frac{P_o}{\cos \mu a} .$$

La differenza di potenziale all'estremo di un conduttore aperto avente selfinduzione e capacità è dunque sempre maggiore di quella iniziale ; se la resistenza è molto piccola la sopraelevazione di tensione può diventare grandissima.

Uno studio sistematico sperimentale fu eseguito mediante un cavo artificiale costituito da 10 spirali di grosso filo di rame, aventi una resistenza di circa 2 ohm e un coefficiente di selfinduzione di circa 0,075 henry ciascuna, e da altrettanti condensatori a carta paraffinata aventi una capacità di circa 1 microfarad.

13. *Caso di una piccola capacità.* — Se il conduttore è costituito da un semplice filo teso nell'aria a una certa altezza sul suolo, è :

$$P_x = P_o \left[1 + \frac{m^2 LC}{2} \left(2 \frac{x}{a} - \frac{x^2}{a^2} \right) \right] ;$$

$$I_x = P_o m C \left(1 - \frac{x}{a} \right) \left[1 + \frac{1}{2} m^2 LC - \frac{1}{6} m^2 LC \left(1 - \frac{x}{a} \right)^2 \right] ,$$

e se $m^2 LC$ può trascurarsi di fronte all'unità è :

$$I_x = P_o m C \left(1 - \frac{x}{a} \right) .$$

In questo caso l'energia dissipata per effetto di Joule nella resistenza della linea, è semplicemente :

$$W = \frac{1}{3} R P_o^2 m^2 C^2 .$$

14. *Conduttività del mezzo ambiente.* — È utile considerare il caso di un conduttore aperto, dove resistenza, selfinduzione e capacità sono uniformemente distribuite, ma dove

l'isolamento non è perfetto. Se h indica la conduttività del coibente per unità di lunghezza del conduttore, la tensione efficace in una sezione qualunque risulta :

$$P = P_0 \sqrt{\frac{e^{2\lambda(a-x)} + e^{-2\lambda(a-x)} + 2\cos 2\mu(a-x)}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} + \cos 2\mu a}},$$

dove λ e μ sono costanti.

La tensione al secondo capo del conduttore è :

$$P_a = P_0 \sqrt{\frac{2}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} + 2\cos 2\mu a}}.$$

Nei casi pratici si può ritenere con molta approssimazione

$$P = P_0 \left[1 + \frac{1}{2} m^2 LC - \frac{1}{2} h Ra \right].$$

La sopraelevazione della tensione dovuta all'effetto combinato della capacità e selfindunzione, è dunque diminuita, per l'imperfetto isolamento, di una quantità proporzionale alla conduttività esterna.

15. *Circuito chiuso contenente resistenza, selfinduzione e capacità, uniformemente distribuite.* — Si suppone ancora mantenuta al primo capo una tensione alternativa sinusoidale, ma al secondo la tensione sempre nulla.

La tensione efficace in una sezione qualunque, è :

$$P = P_0 \sqrt{\frac{e^{2\lambda(a-x)} + e^{-2\lambda(a-x)} - 2\cos 2\mu(a-x)}{e^{2\lambda a} + e^{-2\lambda a} - 2\cos 2\mu a}}.$$

Se la resistenza è piccola, e la selfinduzione e la capacità non sono molto grandi, è semplicemente :

$$P = P_0 \left(1 - \frac{x}{a} \right).$$

16. *Fase variabile iniziale.* — Resterebbe da discutere la forma della variazione iniziale delle grandezze elettriche, quando al primo capo del circuito chiuso od aperto si stabilisce improvvisamente la differenza di potenziale di regime, contenendo il cavo resistenza, selfinduzione e capacità uniformemente distribuite. Si supponga dapprima il caso di un circuito aperto.

Il potenziale, in una sezione qualunque di ascissa x al tempo t , risulta dalla sovrapposizione di tante grandezze variabili con legge oscillante, in forma di onde, la cui durata è rispettivamente rappresentata da :

$$T_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\pi^2 L}{4LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}, \quad T_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{9\pi^2 L}{4LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}, \dots$$

e cioè reale se $\frac{\pi^2 L}{C} > R^2$. Se la resistenza è piccola di fronte alla selfinduzione, si potrà ritenere :

$$T_1 = 4\sqrt{LC}, \quad T_2 = \frac{4}{3}\sqrt{LC}, \quad T_3 = \frac{4}{5}\sqrt{LC}, \dots;$$

cresceranno cioè le frequenze come i numeri dispari consecutivi.

All'estremo del cavo, quando la resistenza è molto piccola di fronte alla selfinduzione, è:

$$p_a = P_0 \left(1 + e^{-R\sqrt{\frac{C}{L}}} \right).$$

Il potenziale subisce cioè al secondo capo del cavo oscillazioni tali che il valore massimo da esso raggiungibile, è doppio del valore di regime.

III. Sistema di circuiti in parallelo.

17. In un sistema complesso di circuiti cogli estremi collegati comunque ognuno di essi può essere considerato in quanto contiene una determinata resistenza e selfinduzione, ed una capacità localizzata in un'unica sezione od uniformemente ripartita lungo il conduttore.

La distribuzione del potenziale e della corrente in ciascun ramo può dunque determinarsi in funzione della tensione agli estremi corrispondenti.

Le formule complete nei casi più generali sono complicatissime; in casi speciali però esse possono semplificarsi notevolmente, e sono i casi che occorre anche più sovente di considerare.

Il caso generale più semplice è quello in cui tutti i conduttori sono inseriti in parallelo tra due punti di termine comuni, e ciascuno contiene resistenza, capacità e selfinduzione. In tal caso le singole correnti hanno intensità efficaci inversamente proporzionali alle impedenze dei circuiti, e fasi caratterizzate dal rapporto della reattanza alla resistenza. L'intensità e la fase della corrente risultante si hanno componendone i vettori rappresentanti facenti tra loro angoli corrispondenti.

Però il caso più frequente nella utilizzazione industriale dei condensatori è quello in cui due soli circuiti sono inseriti tra estremi comuni l'uno contenente solo resistenza e selfinduzione determinate, l'altro contenente un condensatore di notevole capacità. Il problema è stato trattato replicatamente assegnando alla f. e. m. di selfinduzione la stessa fase delle variazioni di corrente. In pratica però gli apparecchi di utilizzazione della corrente che posseggono selfinduzione notevole contengono sempre ferro, la cui polarizzazione magnetica si fa con certo ritardo di tempo t_2' rispetto all'azione della forza magnetizzante.

Per tener conto di questo ritardo, che spiega i fenomeni di isteresi magnetica, occorre assegnare alla f. e. m. di selfinduzione una fase diversa di un angolo corrispondente al ritardo. Se a sua volta il condensatore fosse costituito da un dielettrico imperfetto, la cui polarizzazione fosse ritardata rispetto all'azione della forza elettrostatica di un certo tempo t_3' si dovrebbe assegnare alla corrente di carica una fase differente dell'angolo corrispondente.

18. Se si suppongono derivati parallelamente tra due punti, dove è mantenuta una differenza di potenziale alternativa sinusoidale, due circuiti, di cui uno contenente solo resistenza e selfinduzione e l'altro contenente inoltre un condensatore di certa capacità, caratterizzando con l'indice 1 gli elementi del circuito che è attraversato dalla corrente risultante, con gli indici 2 e 3 quelli dei circuiti paralleli, e se si suppone, come avviene generalmente nei casi pratici, che nel circuito 2 sia piccola la resistenza ohmica rispetto alla selfinduzione, si ha per l'intensità di corrente:

$$i_2 = I_2 \sin(mt - 90^\circ + mt_2' + \alpha)$$

dove

$$I_2 = \frac{P}{mL_2} \text{ ed } \alpha = \arctg \frac{R_2}{mL_2 \cos mt_2'}.$$

Nel circuito 3 sarà piccola la selfinduzione e la resistenza ohmica, ed il ritardo di polarizzazione dielettrica sarà esiguo, onde:

$$i_3 = I_3 \sin(mt + 90^\circ - mt_3' - \beta)$$

dove

$$I_3 = mCP \epsilon \beta = \arctg \frac{m^2 R}{1 - m^2 L_3 \cos mt_3'}.$$

L'intensità efficace della corrente risultante si esprime in funzione di quelle delle correnti derivate:

$$I_1^2 = I_2^2 + I_3^2 - 2 I_2 I_3 \cos(mt_2' + mt_3' + \alpha + \beta + \gamma)$$

dove $\gamma = \arctg \frac{1}{mCW}$ e W è la resistenza del coibente tra le armature del condensatore.

19. Una combinazione di due circuiti paralleli della forma descritta, alimentati con una differenza di potenziale alternativa sinusoidale, può utilmente adottarsi per misure dell'energia dissipata nei dielettrici o in materiali magnetici, col metodo dei tre elettrodinamometri.

20. *Circuiti per corrente di intensità efficace costante.* — In casi particolari può interessare di combinare parallelamente sistemi di circuiti o conduttori contenenti selfinduzione e capacità, per realizzare in uno di essi la costanza di uno degli elementi elettrici al variare degli altri. Parecchie disposizioni sono state ideate per conseguire in un tratto di circuito una intensità di corrente alternata efficace costante. Una delle più semplici ed ingegnose è stata recentemente proposta da Boucherot, ed è schematicamente rappresentata dalla figura di un quadrilatero di Wheatstone, di cui due lati opposti contengono due condensatori, e gli altri due spirali di selfinduzione. Se in una delle diagonali si lascia agire una f. e. m. alternativa tale che ai vertici opposti del parallelogramma si abbia una differenza di potenziale efficace costante, nella diagonale

contenuta fra gli altri due vertici l'intensità efficace di corrente può rimanere fra determinati limiti di approssimazione costante al variare della resistenza apparente.

La dimostrazione di questa proprietà che Boucherot ha fatto sperimentalmente e a cui Janet ha applicato il suo metodo di tentazione mediante gli immaginari, l'A. la dà nel modo più semplice scrivendo le equazioni di Kirchhoff pei valori momentanei delle correnti ai nodi e nei perimetri chiusi contenenti il sistema, non altrimenti che nel caso del ponte ordinario.

IV Azione della capacità nei circuiti di trasformatori.

21. Il caso più semplice è quello in cui un condensatore di capacità C sia inserito nel circuito secondario di un trasformatore, contenente una resistenza ohmica R_2 ed induttanza L_2 , mentre il primario ha resistenza R_1 ed induttanza L_1 ed il coefficiente di induzione mutua è M . Nel circuito primario agisca una f. e. m. sinusoidale, ed alle f. e. m. di induzione propria e mutua si assegnino fasi ritardate di un angolo mt' per tener conto dell'isteresi magnetica. Nei casi pratici le resistenze saranno piccole rispetto alle induttanze, e si possono anche ritenere nulle; inoltre nel circuito secondario l'induttanza sarà limitata alla porzione del circuito interno al trasformatore, mentre quella del primario si comporrà in generale della selfinduzione delle spire primarie che indicheremo ancora con L_1 , e di quella L_0 della porzione esterna del circuito. Nelle condizioni pratiche di un trasformatore ordinario a corrente alternata, supponendo che tra i due circuiti interceda unicamente l'induzione mutua dovuta alle due spirali, si potrà ammettere:

$$L_1 L_2 = M^2; \text{ ponendo } \nu = 2\pi nt_1$$

si trovano per le intensità di corrente le espressioni:

$$i_1 = \frac{E\sqrt{1 + m^2 L_2^2 C^2 - 2m^2 L_2 C \cos \nu}}{A} \cos \left(mt + \nu - \frac{\pi}{2} + \alpha_1 - \beta_1 \right)$$

$$i_2 = \frac{Em^2 MC}{A} \cos \left(mt - \frac{\pi}{2} - \beta_1 \right)$$

con

$$A = \sqrt{(L_0 + L_1)^2 m^2 + m^6 L_0^2 L_1^2 C^2 - 2(L_0 + L_1) L_0 L_1 C m^4 \cos \nu}.$$

La differenza di potenziale fra le armature del condensatore, che è anche la tensione secondaria del trasformatore, è :

$$p = \frac{E m M}{A} \sin \left(mt - \frac{\pi}{2} - \beta_1 \right).$$

Fra le intensità efficaci delle correnti possa una relazione semplice ; se N_1 e N_2 sono rispettivamente i numeri di spire primarie e secondarie, si ha :

$$I_1^2 = I_{1,0}^2 + \left(I_2 \frac{N_2}{N_1} \right)^2 - 2 I_2 I_{1,0} \frac{N_2}{N_1} \cos \nu$$

rappresentando con $I_{1,0}$ l'intensità efficace della corrente primaria quando il circuito secondario è rotto e non vi è inserita alcuna capacità. Questa relazione può utilizzarsi per una misura sistematica del ritardo della polarizzazione magnetica.

22. *Influenza della dispersione magnetica sul rapporto di trasformazione.* — La variazione della tensione primaria e secondaria di un trasformatore, quando è mantenuta costante la f. e. m. nel primario, e nel secondario è inserito un condensatore di varia capacità, fu sperimentalmente rilevata nel 1890 da Siemens e discussa da Fleming. Alla stessa occasione fu osservata una variazione del rapporto di trasformazione fra 4,3 e 5,7 al variare della capacità fra 0 e 0,65 microfarad.

Nello stesso anno Ferranti rilevava in scala più ampia lo stesso fenomeno. Esperimenti sistematici furono condotti nel Gennaio 1891. Essendo la frequenza di 52 periodi per 1", le macchine senza ferro nell'armatura, con poca induttanza, la capacità nel secondario rappresentata da tratti di cavo di lunghezza variata da 0 a 6 miglia (0,3 microfarad per miglio) e la velocità ed eccitazione delle dinamo costanti, la tensione efficace primaria variava da 1875 a 2489 volt, la secondaria da 7500 a 10850, ossia il rapporto di trasformazione da 4 a 4,35. Il fenomeno ha la sua ragione nel fatto che l'ipotesi fatta $L_1 L_2 = M^2$ non è perfettamente soddisfatta.

L'A. servendosi di un apparecchio di induzione Ruhmkorff grande modello, dove il rapporto di trasformazione a vuoto era 275, ed inserendò nel secondario condensatori a lamine di vetro della capacità di 0,0118, 0,0236, 0,047 microfarad, trovò i rapporti di trasformazione

$$472 \quad 390 \quad 165$$

essendo

$$n = 52 \quad L_1 = 0,048^H \quad R_1 = 0,25^\Omega \quad R_2 = 40000^\Omega.$$

Per contro molte serie sistematiche di misure eseguite con buoni trasformatori Ganz a circuito magnetico chiuso, dove la dispersione magnetica è certamente molto esigua, diedero rapporti di trasformazione del tutto costanti al variare la grandezza delle tensioni e la capacità nel secondario, e perfettamente concordanti col rapporto dei numeri di spire.

23. *Due circuiti qualunque aventi induzione mutua e contenenti capacità.* — Se si suppone nel primario una f. e. m. sinusoidale $e = E \sin mt$, le due intensità di corrente hanno per espressione :

$$i_1 = \frac{Em^2 \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{mC_2} - mL_2\right)^2}}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \sin \left[mt + \arctg \frac{\beta}{\alpha} - \arctg \left(\frac{1}{mC_2 R_2} - \frac{mL_2}{R_2} \right) \right]$$

$$i_2 = \frac{m^3 ME}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \sin \left(mt - 90^\circ + \arctg \frac{\beta}{\alpha} \right);$$

dove α e β sono costanti caratterizzate dalla frequenza e dagli elementi dei due circuiti. Il rapporto fra le due intensità efficaci di corrente è:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{mM}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{mC_2} - mL_2\right)^2}}$$

la differenza di fase tra di esse è:

$$- 90^\circ + \arctg \left(\frac{1}{mC_2 R_2} - \frac{mL_2}{R_2} \right).$$

24. *Capacità uniformemente distribuita nel secondario.*

— Se si può prescindere dalla dispersione magnetica nel trasformatore, ammettendo $L_1 L_2 = M^2$; il rapporto tra le tensioni efficaci primaria e secondaria resta inalterato ed uguale al rapporto dei numeri di spire, sempre quando il circuito secondario è aperto, presenta cioè una resistenza infinita ed è solamente percorso da correnti di carica dovute alla capacità di condensatori inseriti nel secondario o di semplici conduttori connessi col medesimo. In quest'ultimo caso la distribuzione del potenziale e della corrente lungo la linea si fa secondo le leggi già trovate per un conduttore aperto al cui primo estremo si mantiene una tensione alternativa costante.

25. *Trasformazione doppia; capacità distribuita lungo la linea.* — È questo il caso in cui la linea collegata col secondario del primo trasformatore non è aperta, ma si connette al secondo capo con un altro trasformatore, quale suole essere necessario nelle grandi trasmissioni a fine di abbassare la tensione della linea ad un valore conveniente per gli apparecchi di utilizzazione.

La trattazione del problema nel caso generale conduce a formule complicate. Queste si semplificano ammettendo alcune ipotesi che nel maggior numero di casi pratici si possono ritenere con sufficiente approssimazione realizzate. Esse sono:

che le resistenze delle spirali primarie e secondarie dei trasformatori siano trascurabili rispetto alle induttanze;

che la resistenza della linea sia piccola rispetto alla induttanza secondaria del primo trasformatore;

che l'induttanza della linea sia piccola rispetto alla resistenza ohmica così che riesca $\frac{2\pi nL}{R}$ trascurabile;

che la resistenza stessa della linea e la sua capacità e self-induzione siano a loro volta esigue;

che i trasformatori non presentino alcuna sensibile dispersione magnetica. Caratterizzando con gl'indici 1, 2, 3, 4 gli elementi dei circuiti primari e secondari del primo e secondo trasformatore ordinatamente, e con $m t'$ l'angolo che corrisponde al ritardo di polarizzazione magnetica, nelle ipo-

tesi suddette l'intensità efficace della corrente in un punto qualunque d'ascissa x , è data da :

$$I = \frac{P_1}{mL_1} \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{R_1 + R \frac{L_1}{L_2}} \sqrt{(mL_1 + R_1 \sin mt')^2 + R_1^2 \left[L_2 C m^2 \left(1 - \frac{x}{a} \right) - \cos mt' \right]^2}.$$

Parte II.

Costruzione industriale dei condensatori.

L'economia dei condensatori nelle trasmissioni di energia elettrica con correnti alternate è essenzialmente subordinata alla possibilità di realizzare capacità elettrostatiche notevoli in condizioni da potere sopportare tensioni elevate senza notevole consumo di energia. Perciò in uno studio sulla costruzione industriale dei condensatori la questione più importante è l'esame dei diversi dielettrici in relazione alla massima forza elettrostatica a cui essi possono venire assoggettati, ed alla dissipazione di energia che in essi ha luogo per la loro parziale conduttività e per la polarizzabilità imperfetta.

Nelle note seguenti sono riassunti i risultati delle ricerche sistematiche che l'A. ha condotte in massima parte nel laboratorio di fisica del Politecnico Federale di Zurigo, a riguardo delle questioni predette.

I. Limite della forza elettrostatica nei dielettrici.

26. *Metodi ed apparecchi di misura.* — Il limite della forza elettrostatica che un dielettrico può sopportare senza lasciarsi attraversare da una scarica disruptiva è essenzialmente diverso nei diversi dielettrici, e per ciascuno varia in modo non semplice collo spessore della sostanza, con la forma e lo stato superficiale degli elettrodi e colla durata dell'azione a cui esso viene assoggettato. Non essendo facile realizzare mediante apparecchi ordinari da laboratorio elevate differenze di potenziale continue completamente costanti, e d'altra parte interessando nelle presenti ricerche unicamente la questione delle applicazioni di condensatori nelle reti di corrente alternativa, l'A. si

è servito per le determinazioni esclusivamente di tensioni alternate prodotte da ordinarie macchine industriali ed aventi una forma di variazione poco diversa dalla sinusoidale. Disponeva a tal uopo di ordinari trasformatori alimentati dalla rete generale di distribuzione della città di Zurigo, a cui erano connessi alternatori Kapp per 2000 volt. Essendo la tensione secondaria 220 e 100 volt era possibile avere tensioni elevatissime adoperando come trasformatore un ordinario rocchetto Ruhmkorff, il cui rapporto di trasformazione, misurato a circuito aperto, era in media 275.

27. *Tensioni disruptive nell'aria, olio e petrolio.* — La scarica avveniva fra due elettrodi formati l'uno da un disco di ottone di 6 cm. l'altro da una sfera di 0,9 cm. di diametro adattati al supporto di un micrometro a scintille ordinario con vite micrometrica e nonio per determinare con esattezza la distanza. I risultati sono espressi nella seguente tabella, dove S indica la distanza esplosiva in millimetri, P la tensione necessaria ad ottenerla.

S	P nell'aria	P nell'olio
1	3300	12000
2	5800	21000
3	7700	27500
4	9300	32600
5	10500	37200
6	11600	41200
8	13400	48200
10	14800	54000
15	17300	—
20	19300	—
30	22600	—
40	25300	—

28. *Tensioni disruptive nei dielettrici solidi isolati nell'aria.* — Erano adoperati gli elettrodi precedenti fra cui erano interposti i dielettrici in forma di lamine di spessore uniforme. Lo spessore della lamina veniva prima misurato con una vite micrometrica. Nella tabella seguente sono riportate le tensioni P corrispondenti alla scarica disruptiva attraverso a spessori

di 1, 2, 3, 4 mm.; sono riportati anche i rapporti $P:P_a$ di queste tensioni a quelle che corrispondono alle stesse distanze degli elettrodi nell'aria.

DIELETTRICO	S = 1 mm.		S = 2 mm.		S = 3 mm.		S = 4 mm.	
	P	P:P _a	P	P:P _a	P	P:P _a	P	P:P _a
Aria	3300	1,00	5800	1,00	7700	1,00	9300	1,00
Olio di lino e petr.	12000	3,63	21000	3,62	27500	3,57	32600	3,47
Fibra nera . . .	1200	0,36	2200	0,38	3000	0,39	3700	0,39
Fibra rossa . . .	1800	0,54	3400	0,58	4500	0,58	5400	0,57
Stearina	3300	1,00	5800	1,00	7700	1,00	9300	1,00
Solfo.	4200	1,27	7600	1,31	10700	1,32	12200	1,29
Carta pergamena	6050	1,83	10400	1,79	—	—	—	—
Guttaperca . . .	12600	3,82	21900	3,77	29000	3,77	34800	3,72
Paraffina Colofonio	16000	4,85	28000	4,82	37300	4,84	45000	4,81
Cera bianca . . .	20600	6,24	35200	6,06	46000	5,98		
Vetro ordinario .	27600	8,36	43000	7,41				
Ebanite.	36000	10,90						
Mica.	40000	12,10						

29. *Tensioni disruptive pei dielettrici solidi isolati nell'olio.* — Le condizioni del paragrafo precedente non sono quelle che più frequentemente si riscontrano nella pratica. Infatti nei condensatori ordinari la maggior parte del coibente è assoggettato tra lamine piane che costituiscono le armature ad un'azione uniforme e qui non si producono quasi mai scariche disruptive eccetto che una soluzione di continuità esista nella lamina. Per riprodurre nel miglior modo possibile tali condizioni l'A. ha immerso gli elettrodi e il dielettrico frapposto in un bagno d'olio di lino, il quale presenta una certa conduttività elettrica ed esercita perciò una parziale azione ugualizzatrice della distribuzione superficiale del potenziale.

DIELETTRICO	S = 1 mm.		S = 2 mm.		S = 3 mm.		S = 4 mm.	
	P	P:P _a	P	P:P _a	P	P:P _a	P	P:P _a
Aria	3300	1,00	5800	1,00	7700	1,00	9300	1,00
Olio di lino e petr.	12000	3,63	21000	3,62	27500	3,57	32600	3,47
Fibra rossa . .	2200	0,67	4200	0,72	5600	0,73	7000	0,76
Stearina . . .	5100	1,54	9200	1,53	12600	1,63	15300	1,63
Carta pergamena	10400	3,15	—	—	—	—	—	—
Cartone poroso .	12000	3,63	21000	3,62	27500	3,57	32600	3,47
Spermaceti. . .	13000	3,94	23000	3,97	31000	4,03	36400	3,89
Vetro ordinario .	14000	4,24	24500	4,23	32800	4,26	39000	4,17
Colofonio . . .	15800	4,80	27800	4,80				
Guttaperca mica.	30000	9,09	43000	7,41				
Eban., cera e paraf.	36800	11,14	50000	8,60				

30. *Cifre di merito dei diversi dielettrici.* — Il prodotto fra il rapporto $P:P_a$ di un dato dielettrico e il suo potere induttore specifico può considerarsi come una cifra di merito della sostanza riguardo alla costruzione industriale dei condensatori, inquantochè in questi interessa di realizzare la maggiore capacità nel minimo volume. Nella tabella seguente sono riuniti i risultati medi delle tabelle precedenti; nella terza colonna sono aggiunti i valori della costante dielettrica K per le medesime sostanze, determinate in gran parte dall'A. Le cifre di merito sono contenute nell'ultima colonna.

DIELETTRICO	$P:P_a$ nell'aria	$P:P_a$ nell'olio	K	$K(P:P_a)$ nell'olio
Aria	1,0	1,0	1,0	1,0
Olio di lino e petr.	3,6	3,6	2,0	7,2
Fibra rossa . .	0,6	0,7	—	—
Stearina . . .	1,0	1,6	2,4	3,8
Colofonio . . .	4,8	4,8	3,0	14
Cera bianca . .	6,0	9,8	2,4	24
Paraffina . . .	4,8	9,8	2,4	24
Guttaperca. . .	3,8	8,2	3,3	27
Vetro ordinario .	7,9	4,2	7,0	29
Ebanite. . . .	10,9	9,8	3,5	35
Mica.	12,1	8,2	5,0	41

La cera, la paraffina, la guttaperca, il vetro ordinario, posseggono cifre di merito assai elevate. L'ebanite e la mica

hanno le cifre maggiori, ma il loro prezzo è anche il più elevato fra tutte le sostanze considerate, così che è più elevato il prezzo del condensatore a parità di capacità.

In questi ultimi anni è stata introdotta come nuovo isolante la micanite, che è un aggregato di lamine sottili di mica collegate in un sistema compatto mediante un mastice isolante. Per essa la costante dielettrica e la tensione disruptiva sono del medesimo ordine di grandezza di quelle della mica, e la cifra di merito non è di molto inferiore a quella data nella tabella. Il prezzo però ne è relativamente elevato.

Il vetro ordinario ha una cifra di merito molto grande; ma è pur grande la sua conduttività elettrica che aumenta con la temperatura. Perciò il vetro non fu adoperato per condensatori di grandi capacità. L'A. ha esaminato il comportamento di tale sostanza per condensatori di cui il maggiore aveva 0,05 microfarad di capacità. Ha studiato anche il vetro temperato in cui i rapporti $P : P_0$ per spessori di 2 e 1,5 mm. erano 4,73 e 4,78 cioè sensibilmente uguali fra loro e poco differenti dal rapporto trovato per il vetro ordinario.

II. Conduttività e lenta polarizzabilità dei dielettrici.

31. *Misure di resistenza e variazioni di carica.* — Sono presi in esame un buon numero di condensatori in parte costruiti dall'A. coi dielettrici in precedenza citati, in parte scelti tra gli apparecchi industriali che si trovano in commercio. Per le misure è stato adottato esclusivamente l'impiego di tensioni continue per avere un'idea della conduttività delle sostanze in questione, riserbando quello di tensioni alternative per la determinazione della energia che complessivamente si dissipa per conduttività ed isteresi.

Furono misurate le resistenze apparenti di isolamento dopo aver assoggettato la sostanza per parecchi minuti all'azione della forza elettrostatica, scegliendo per misure successive tensioni differenti.

Pei condensatori di maggiore capacità e resistenza questa fu dedotta da quella in base al decremento logaritmico della carica durante il tempo d'isolamento, secondo il metodo di Siemens.

32. *Confronto dei diversi dielettrici solidi.* — Sono riassunti i principali risultati con alcune osservazioni relative ai condensatori a cui essi si riferiscono, prescindendo dai dielettrici i quali per una pratica costruzione di condensatori non presentano alcuna convenienza.

Condensatore normale a mica di Carpentier. — Ha una capacità nominale di 1 microfarad, effettiva di 1,013; il dielettrico ha proprietà eccellenti. La resistenza d'isolamento è di 7000 megaohm. La massima variazione di carica è di 1,1%, la somma di scariche residue dopo 60" di carica è di 1,6%.

Lo spessore molto esiguo del dielettrico non ne permette l'impiego per tensioni elevate.

Condensatore ad ebanite. — Capacità 0,85 microfarad; resistenza d'isolamento 850 megaohm; la carica si completa in 5" con una variazione massima 3,4%.

Condensatori a carta paraffinata. — Ne sono stati esaminati molti della casa di Cortaillod. Per uno di essi di 0,95 microfarad, fu riscontrata una resistenza d'isolamento di 3030 megaohm.

La massima variazione di carica era di 3%, la somma di scariche residue dopo 60" di carica non superava 4%.

Condensatori a paraffina pura. — Nella costruzione non fu presa gran cura d'isolamento. Capacità 0,29 microfarad; resistenza d'isolamento 450 megaohm, massima variazione di carica constatata 3,3%.

Condensatori a guttaperca. — a) Fu costruito con 5 fogli di guttaperca pura separanti armature di stagnola di 20×25 cm. Aveva la capacità di 0,0108 microfarad, e non resistenza d'isolamento di 5200 megaohm.

b) Fu adoperato un cavo lungo 2 km. immerso in una vasca d'acqua. Capacità 0,43 microfarad, resistenza d'isolamento 1000 megaohm.

c) Un tratto lungo 60 m. di grosso cavo Cortaillod aveva una resistenza d'isolamento di 420 megaohm e una capacità di 0,033 microfarad.

d) Un cavo lungo 60 m. aveva la capacità di 0,03 microfarad e la resistenza d'isolamento di 120 megaohm.

Condensatori a vetro. — *a)* Furono costruiti con lastre di vetro da finestra spesse 2 mm. e con armature di stagnola 28×28 cm. Con due sistemi di 7 lastre ciascuno connesse in serie furono misurate a temperatura ordinaria una resistenza di isolamento di 48 megaohm, ed una capacità di 0,020 microfarad. Con 11 delle medesime lastre la capacità era di 0,026 microfarad e la resistenza d'isolamento 52 megaohm. A parità di capacità la resistenza d'isolamento del vetro è dunque di gran lunga minore di quella degli altri dielettrici esaminati avanti. La resistenza d'isolamento diminuisce rapidamente con la temperatura. La polarizzazione completa del vetro si fa con enorme lentezza.

b) Per stabilire un confronto fra le proprietà del vetro comune e di quello temperato, fu costruito un condensatore con lastre temprate. Da numerose misure risulta pel vetro temprato una media resistenza specifica di $1,13 \cdot 10^{12}$ e per quello non temprato $3,6 \cdot 10^{12}$ a 20° C. La costante dielettrica è per entrambi prossima a 5. La tempera dunque anzichè migliorare il vetro lo peggiora dal punto di vista delle proprietà dielettriche.

33. *Condensatori ad olio e petrolio.* — *a)* L'andamento di questi è molto irregolare, le misure di resistenza ohmica conducono a grandezze apparenti che non hanno alcun valore assoluto, e per la medesima durata di carica la capacità apparente varia in modo complesso in funzione della tensione. Due condensatori di 1,02 e 5,54 microfarad avevano il valore apparente della resistenza di 5,8 e 10 megaohm.

b) Fu costruito un piccolo condensatore con 10 armature di stagnola separate da fogli doppi di seta bianca, essiccati a 150° C. In tali condizioni la massima variazione di carica era del 4 %, la resistenza d'isolamento tanto grande da non lasciarsi misurare. Immerso il sistema nel petrolio, la resistenza si abbassò fino a 900 megaohm; la capacità era 0,02 microfarad. Nell'olio di lino un condensatore analogo al precedente presentava una variazione di carica del 70 %, dopo una durata di carica di 1". La resistenza apparente d'isolamento era appena di 1 megaohm, e la capacità di alcuni centesimi di microfarad.

III. Dissipazione d'energia nei dielettrici.

34. *Metodi di misura.* — Siccome i valori apparenti che si sogliono misurare della resistenza d'isolamento in un condensatore non sogliono corrispondere ad una vera resistenza ohmica del coibente e d'altronde la conduttività ohmica non è l'unica causa di dissipazione d'energia in un mezzo che si polarizza imperfettamente, si presentava pel confronto delle proprietà dielettriche delle diverse sostanze, soprattutto conveniente la misura delle quantità totali di energia dissipate quando il mezzo in condizioni pratiche viene assoggettato a tensioni alternative.

I metodi principali per tali misure sono :

Il rilievo grafico e l'analisi delle due curve della differenza di potenziale tra le armature e delle intensità di corrente, onde si deduce lo spostamento di fase relativo delle sinusoidi corrispondenti d'ordine successivo.

La diretta misura dell'energia dissipata mediante un wattometro.

Il metodo dei tre elettrodinamometri, per la prima volta realizzato dall'A. mediante due circuiti paralleli, l'uno dei quali contenente una grande selfinduzione senza ferro e piccolissima resistenza, l'altro la capacità in questione.

Il metodo dei tre voltometri, modificato da Weber sostituendo ai tre voltometri un solo elettrometro a quadranti.

35. *Metodo dei tre voltometri e dei tre elettrodinamometri.* — Non venne adoperato per le misure seguenti, che il metodo dei tre voltometri, servendosi di due soli elettrometri orizzontali di Kelvin, esattamente calibrati. Per avere resistenze senza induttanza, furono adoperati filamenti di lampade ad incandescenza, tenuti in un bagno di petrolio per conservarne la temperatura costante. Se δ è l'angolo di cui la corrente di carica è ritardata rispetto alla differenza di potenziale, in causa della imperfetta polarizzazione e della conduttività totale, P_0 la tensione risultante efficace, P_1 e P_2 quelle che si misurano ai capi della resistenza senza selfinduzione R e fra le armature del condensatore, è : $P_0^2 = P_1^2 + P_2^2 + 2P_1 P_2 \sin \delta$ che permette senz'altro di calcolare δ .

L'energia dissipata nel condensatore sarebbe :

$$P_1 I \sin \delta = \frac{P_0^2 - P_1^2 - P_2^2}{2R}.$$

L'A. riporta una serie di misure fatte sopra il condensatore normale a mica, per dare un'idea dell'approssimazione che si può raggiungere con tale metodo. Ed osserva anche che esperienze fatte sullo stesso condensatore precedentemente con il metodo dei tre elettrodinamometri, davano per $\sin \delta$ il valore 0,021 il quale s'accorda molto bene con quello dedotto dalle osservazioni dei tre voltometri.

36. *Misure eseguite sui diversi dielettrici.* — Nella tabella seguente sono contenuti i risultati medii delle misure sui diversi dielettrici. La 1^a colonna porta le capacità misurate con correnti continue, la 2^a quelle con correnti alternate. W sono le resistenze d'isolamento e W C quelle riferite all'unità di capacità. R le resistenze ausiliarie messe in serie in ogni esperienza nelle misure coi tre voltametri.

CONDENSATORI	C cont.	C alt.	W	W C	R	$\sin \delta$
			^{10⁶}	^{10⁶}		
Mica	1,013	1,016	7000	7100	2960 ^Ω	0,000
Ebanite . . .	0,85	0,81	850	720	3860	0,009
Carta paraffinata	0,96	0,95	3030	2900	3350	0,011
Paraffina pura .	0,29	0,29	450	130	10600	0,008
Seta e petrolio.	0,034	0,019	900	18	158000	0,014
Swinburne n. 504	—	1,02	5,8	5,9	2960	0,014
» n. 288	—	5,54	16,0	89	549	0,023
Guttaperca . .	0,0109	0,0082	5200	42	366000	0,042
Cavo di guttap..	0,43	0,41	1000	410	7507	0,037
Cavo sotto piombo	0,032	0,028	420	12	117000	0,041
Cavo da laborat.	—	0,030	120	3,6	117000	0,068
Vetro ordinario.	0,061	0,026	62	1,6	117000	0,070
Vet. Siemens com.	0,0043	0,0029	950	2,8	936000	0,073
» » tempr.	—	0,0021	470	1,0	1476000	0,132

IV. Riassunto dei risultati sperimentali.

37. *I dielettrici più convenienti per la costruzione dei condensatori.* — Per riassumere brevemente i risultati precedenti, possiamo per diversi dielettrici e condensatori esaminati caratterizzarne gli elementi nel modo seguente :

la bontà dell'isolamento indipendentemente dalla tensione a cui il condensatore è destinato, mediante la resistenza riferita all'unità di capacità. Questa resistenza è proporzionale al prodotto della resistenza specifica ρ per la costante dielettrica μ del coibente ;

la dissipazione d'energia per conduttività ed isteresi indipendentemente dalla capacità, mediante il seno dell'angolo δ che abbiamo interpretato come ritardo di fase a quelle dovuto ;

la rapidità di polarizzazione, mediante il rapporto delle capacità apparenti misurate per lo stesso condensatore con corrente continua e con corrente alternata di frequenza ordinaria;

l'attitudine a realizzare la massima capacità per determinata tensione in volume eguale, mediante il prodotto della tensione disruptiva relativa all'aria per la costante dielettrica.

Queste quattro grandezze sono ordinatamente riportate nella tabella seguente per i sei dielettrici principali studiati.

DIELETTRICO	$l\mu$	sen δ	$\frac{C_{cont.}}{C_{alt.}}$	$\mu \nu_0$
Mica.	7000	0,000	1,007	42
Ebanite.	700	0,009	1,021	35
Paraffina	3000	0,008	1,021	24
Guttaperca	400	0,042	1,050	28
Petrolio.	20	0,014	1,7	7
Vetro comune	2	0,070	2,3	29

I dielettrici più convenienti sono adunque la mica, l'ebanite, la paraffina.

È nota la difficoltà di trovare lamine pure di ebanite di un certo spessore. Il prezzo di un condensatore a mica di notevole capacità per tensioni elevate sarebbe elevatissimo.

L'ebanite possiede proprietà dielettriche eccellenti e può aversi in foglie convenientemente sottili ed omogenee. Però in tali condizioni ha a sua volta un prezzo molto alto e deve proteggersi con la massima cura contro l'accesso dell'umidità.

Rispetto a questi dielettrici la paraffina ha un prezzo molto più basso, e si può preparare in dimensioni convenienti con grandissima facilità.

Un condensatore costituito con lamine omogenee dello spessore di 1 mm., convenientemente compresse per espellerne tutta l'aria, e protette mediante verniciatura esterna della stessa sostanza contro l'accesso dell'umidità, sopporterebbe con sicurezza una tensione di parecchie migliaia di volt.

R. FEDERICO.

**SULLE MODIFICAZIONI CHE LA LUCE SUBISCE ATTRAVERSANDO
ALCUNI VAPORI METALLICI IN UN CAMPO MAGNETICO.**

Nota del Prof. D. MACALUSO e del Dott. O. M. CORBINO ¹⁾.

In una nota precedente ²⁾ gli Autori hanno dimostrato che se ad un fascio di luce polarizzata rettilineamente si fanno attraversare, nella direzione delle linee di forza di un campo magnetico, dei vapori incandescenti di sodio o di litio che in questo si trovano, il piano di polarizzazione delle radiazioni, le cui lunghezze d'onda sono immediatamente vicine a quelle corrispondenti alle righe di assorbimento, subisce una rotazione tanto maggiore quanto più piccola è la distanza sullo spettro tra i posti occupati da quelle radiazioni ed i bordi di ciascuna delle due righe in parola.

Nel dubbio che la vibrazione rettilinea primitiva oltre al cambiare direzione, avesse potuto anche subire una deformazione (trasformazione della retta in ellissi) furono istituite le seguenti esperienze.

Gli spigoli del doppio cuneo di quarzo di un compensatore Babinet erano disposti normali alle linee verticali del reticolo ed a 45° dalle sezioni principali dei nicol che erano paralleli tra loro.

Si regolava dapprima l'oculare e la lente cilindrica in modo che si vedessero nettamente nel campo luminoso le righe di Fraunhofer e due grossi rigoni orizzontali oscuri. Ciascuno di questi corrispondeva, a quella parte del fascio luminoso che aveva attraversato il doppio cuneo in un posto tale

1) Rendiconti della R. Accademia dei Lincei, Vol. 8, 1° sem., serie 5, fasc. 1, 1899.

2) Rend. d. R. Acc. d. Lincei, vol. 7, serie 5, pag. 293.