SUGLI SPOSTAMENTI DI FASE PRODOTTI DA UN VOLTAMETRO PERCORSO
DA CORRENTI ALTERNANTI.

II.^a Nota del Dott. RICCARDO MALAGOLI.

Parte sperimentale ¹⁾.

1. Per quanto la teoria dell'elettrolisi a correnti alternanti possa dirsi ben stabilita, non mi è parso razionale il contrapporre alle determinazioni sperimentali del Peukert dei soli ragionamenti, tantopiù che essi dimostrano come nella generalità del fenomeno vi debba essere uno spostamento di fase fra la intensità di corrente e la differenza di potenziale ai capi del voltmetro, e che solo in condizioni limiti tale spostamento possa entrare nell'ordine delle grandezze che risultano trascurabili nel campo sperimentale.

Fui così condotto a impiantare delle ricerche seguendo i dettami della teoria, e stimo utile riferirne qui tantopiù che dalle mie esperienze ho potuto dedurre qualche dato di fatto in rapporto all'andamento della polarità di un voltmetro percorso da una corrente alternante, argomento che trattai altrove solo teoricamente e che non è stato mai (ch'io sappia) sottoposto a determinazioni sperimentali.

2. Il metodo sperimentale da me seguito per la determinazione di questi spostamenti di fase è ancora quello usato dal Peukert, cioè il sistema Joubert per la costruzione diretta delle curve corrispondenti all'intensità e alla differenza di potenziale ai capi del voltmetro.

La corrente di una dinamo alternante E (fig. 1) attraversa un voltmetro V, ed una resistenza R priva di self-induzione. Ai capi di questi due apparecchi sono prese due derivazioni che portano alle coppie estreme di pozzetti di un interruttore a bilancia M (Wippe), mentre i pozzetti centrali comunicano in

1) Lavoro eseguito nel laboratorio di Fisica del R. Istituto tecnico Barozzi.

modo permanente con una linea che contiene una ordinaria cassa di resistenza R , un interruttore rotante K ed un galvanometro di Engelmann G .

Fig. 1.

Questo interruttore rotante consiste di un disco di legno fissato all'albero della dinamo, e porta un anello a di rame che lo copre tutto attorno per sola metà della sua altezza, mentre la metà scoperta è attraversata parallelamente all'asse di rotazione da un pezzetto di filo b di rame saldato all'anello. Una spazzola A si appoggia costantemente all'anello di rame, mentre un'altra spazzola B si appoggia alla parte scoperta. Di tal guisa le due spazzole comunicano fra loro un istante solo durante una rivoluzione dell'indotto. E giacchè il contatto B è girevole su apposito disco fisso CD , concentrico all'asse dell'indotto, e diviso perifericamente in parti uguali, si comprenderà come sia possibile e facile anche durante la marcia della dinamo di disporre le cose in modo che la comunicazione fra le due spazzole si verifichi ad istanti noti del periodo della intensità di corrente.

Chiuso l'interruttore sia dalla parte del voltmetro che da quella della resistenza R , e fissata la spazzolina B , per ogni giro dell'indotto il galvanometro era chiuso su due punti che avevano la medesima differenza di potenziale, cosicchè l'ago

dell'istrumento aveva una deviazione che per la grande rapidità delle alternazioni in confronto alla durata delle sue oscillazioni era molto regolare e verificai più volte che la media delle oscillazioni lette col cannocchiale coincideva colla posizione in cui si sarebbe, in capo a qualche minuto, arrestato. Adottando le più comuni cautele potei assicurarmi che senza attendere la posizione di riposo dell'ago, potevo in modo ugualmente sicuro servirmi delle medie delle oscillazioni, quando specialmente esse non erano le più ampie.

Così pure ho potuto convincermi che almeno per quanto riguardava la determinazione degli spostamenti di fase era sufficiente prendere 8 posizioni equidistanti della spazzolina mobile in tutto un periodo della intensità, ciò che riducendo alla metà la durata di ogni esperienza aveva il vantaggio di rendere più attendibile la costanza dei varii elementi che entrano nel fenomeno.

3. Il motore che mi ha servito era ad aria calda, tipo Lehmann di piccola potenza, e fu alimentato da un buon becco Flechner.

Mantenendo costante la pressione del gas, una volta raggiunto il regime di temperatura del refrigerante, potevo contare su un andamento costante e sicuro.

Il motore azionava una dinametta a indotto Siemens, dai cui contatti striscianti ricavavo la corrente alternante. L'eccitazione della dinamo era ottenuta molte volte con un solo elemento Daniell, e talvolta per maggiori effetti ricorrevo ad un accumulatore.

La resistenza del circuito esterno era formata dal reostata senza auto-induzione R_1 (ohm 5,4) e da un solo voltmetro. L'uso di parecchi voltmetri in serie, seguito dal Mengarini ¹⁾, non è di nessun vantaggio quanto allo spostamento di fase, giacchè se ρ è la resistenza di ciascuno e p il valore istantaneo della polarità, la differenza di potenziale agli estremi della serie sarà $V = I n \rho - n p = n (I \rho - p)$ che si annulla al momento stesso della differenza di potenziale ai capi di ciascun

1) Mengarini, Memoria citata, pag. 30 a 35.

voltmetro. Se le condizioni reometriche del circuito non lo rendano dunque inevitabile è più comodo usare un solo voltmetro, ciò che elimina le differenze nella superficie dei singoli elettrodi, differenze che portano effetti notevoli sui valori della polarità.

I voltametri usati nelle esperienze erano sempre formati con un bicchiere contenente acqua acidulata con acido solforico e furono usate due proporzioni di 1 a 500, e 1 a 18. Attraverso il tappo del bicchiere o della vaschetta passavano due fili portanti gli elettrodi, che erano collocati sempre parallelamente, e le lastre non erano mai completamente sommerse. La superficie attiva fu molte volte di cm. 2,9 per 3,8. Per la decomposizione dell'elettrolito ho usati elettrodi costruiti con filo di platino dello spessore di 0,4 mm. e della lunghezza di cm. 4,5. Però alcune volte furono variate queste dimensioni in modo da ottenere elettrodi di minore capacità.

Questa forma dei voltametri per cui il flusso elettrico arriva normalmente sugli elettrodi è la più indicata allorchè debba tenersi conto delle superficie delle lamine. Gli elettrodi venivano accuratamente puliti al principio di ogni esperienza, e solo nel caso in cui la elettrolisi desse prodotti visibili si otteneva il deposito di nero di platino che aumenta notevolmente la superficie attiva degli elettrodi. Ho potuto notare in qualche caso in cui l'elettrolisi dava uno sviluppo debole di prodotti, ed il deposito sugli elettrodi finiva per rendere invisibile lo sviluppo elettrolitico; bastava la ripulitura delle laminette affinchè il fenomeno si riattivasse. Per questo motivo nelle esperienze in cui la elettrolisi doveva verificarsi io attesi sempre che il nero di platino si fosse formato sulle lamine, avanti di cominciare la misura. Nel frattempo il motore rendeva stabile e regolare il suo andamento.

Il galvanometro usato aveva una resistenza tale che compresa quella della cassetta di resistenza offriva un totale di ohm 1049 e il cannocchiale era così collocato che 1 cm. della scala rappresentava una differenza di potenziale pari a 0,071 volt, ben inteso allorchè la chiusura del circuito fosse permanente, cioè senza l'interruttore Joubert.

4. Venendo alle esperienze, dirò subito che una prima serie di ricerche intese a saggiare il metodo adoperato per darmi conto del grado di approssimazione di cui è capace. Fra le molte prove fatte riferisco (fig. 2) il risultato ottenuto esa-

Fig. 2.

minando la differenza di potenziale ai capi di due resistenze disposte in serie e prive di self-induzione. Tali resistenze furono di ohm 5,4 e 2,9 rispettivamente, ed il sincronismo tanto nelle fasi che nei massimi risulta, conformemente alla teoria, manifesto.

Passai alle determinazioni della differenza di potenziale ai capi del reostato senza induzione (che adoperai poi sempre nelle misure successive), e quelle della differenza di potenziale agli estremi di un rocchettino inserito nel circuito e provveduto di nucleo. La figura 3 rappresenta il diagramma dei valori ottenuti. Da esso si rileva come l'andamento del potenziale agli estremi del rocchetto, rappresentato nel disegno dalla linea forte, è in anticipo sulla intensità di corrente tanto rapporto agli zeri che ai massimi.

Gioverà a far comprendere la bontà del metodo anche la osservazione seguente. Il disco fisso CD (fig. 1) al quale era raccomandata la spazzolina mobile B, portava delle divisioni periferiche numerate, che venivano successivamente affacciate ad un punto fisso. Queste divisioni che talvolta erano 8, tal'altra 16, sono riferite sull'asse del tempo in tutti i diagrammi.

La spazzolina B riprendeva dunque esattamente in ogni esperienza le medesime posizioni rapporto all' indotto, quindi rap-

Fig. 3.

porto alla f. e. m. fondamentale. Dalla fig. 2 che si riferisce al caso della sola f. e. m. della dinamo si ricava che i suoi zeri sono ai punti 2,7 e 6,7 dell'asse del tempo: mentre nella fig. 3 gli zeri della differenza di potenziale ai capi del reostato, (che è sincrona alla f. e. m. risultante) sono rispettivamente in 3 e 7.

Ma nel caso di una auto-induzione, non solo la differenza di potenziale ai suoi capi è in anticipo sulla f. e. risultante, ma pure sulla f. e. m. fondamentale; mentre poi la prima è in ritardo rapporto alla seconda. Tuttociò come fu stabilito al § 6 della I^a Nota.

Fig. 4.

5. Dopo questi risultati, venni alla determinazione delle curve che si riferiscono al voltmetro. Le figure 4, 5, 6, 7,

rappresentano i diagrammi ottenuti in quattro esperienze nelle quali non era visibile alcun prodotto alle lastre del voltmetro. Siamo dunque nelle condizioni indicate dal Dolivo-Dobrowolsky come le più favorevoli per constatare lo spostamento di fase fra la differenza di potenziale ai capi del voltmetro e la intensità di corrente.

Nell'esperienza rappresentata dalla fig. IV, il voltmetro aveva due lastre di platino ($2,9 \times 3,8$) distanti cm. 21, immerse in acqua contenente $\frac{1}{13}$ di acido solforico. Lo spostamento di fase risultò di $\frac{12}{10}$ di semiperiodo.

Nell'esperienza della fig. 5, il voltmetro era quello pre-

Fig. 5.

cedente salvo la distanza degli elettrodi ridotta a cm. 2,1. Lo spostamento di fase risulta di $\frac{19}{10}$ di semiperiodo.

La fig. 6 si riferisce ad un voltmetro uguale a quello usato nell'esperienza della fig. 4, nel quale però l'elettrolito

Fig. 6.

fu ridotto a contenere solo $\frac{1}{1500}$ di acido solforico. Lo spostamento di fase ottenuto è, come mostra il diagramma, di $\frac{11}{10}$ del semiperiodo.

Infine per la figura 7 il voltmetro conteneva le solite lamine e l'elettrolito usato nella esperienza della fig. 6, ma la distanza degli elettrodi era questa volta di cm. 21. Lo spostamento di fase era semplicemente di $\frac{\pi}{40}$ semiperiodo.

Fig. 7.

Dall'esame complessivo di queste quattro esperienze, per un voltmetro avente la stessa capacità, e nelle quali doveva mutare solo la resistenza totale del circuito, risulta intanto che gli zeri della intensità di corrente (curva rappresentata dalla linea sottile) sono sempre in anticipo riguardo alla forza elettromotrice fondamentale e che corrispondono in base a quanto si è visto sopra alle posizioni 2,7 e 6,7.

Per verità dalla formula desunta dalla teoria:

$$\gamma = \operatorname{artg} \frac{T}{\pi c r}$$

gli spostamenti maggiori a parità di altre circostanze dovrebbero comprendere alla minore resistenza del voltmetro, ciò che non risulta dai risultati sperimentali ottenuti. Debbo però notare che nei casi delle maggiori resistenze, non mi fu possibile coi mezzi limitati di cui disponevo di mantenere la velocità del motore agli stessi valori che aveva raggiunto nelle esperienze rappresentate dalle figure 4 e 5. In tali casi come mostra la formula riferita, aumentando la durata del periodo cresce anche il valore di γ .

Però si constata in tutte le esperienze riferite che ai maggiori valori di γ corrispondono massimi di intensità sempre più piccoli, e tenuto pure conto della resistenza totale del circuito

si può verificare che essi sono giustamente rappresentati dalla espressione $\frac{E \cos \gamma}{r}$ che si ricava dalla formula (6) della prima

Nota.

Dalle stesse quattro esperienze risulta inoltre che gli zeri della differenza di potenziale ai capi del voltmetro sono in ogni caso in ritardo rispetto alla f. e. m. fondamentale; ed i massimi delle stesse curve concordano colla espressione $\frac{E \sin \gamma}{\sin \gamma_1}$ che si deduce dalla formula (8).

I ritardi di fase fra le due curve rappresentati dalla condizione:

$$\gamma_1 = \text{artg} \frac{T}{\pi c r_3}$$

sono conformi ai risultati ottenuti nelle esperienze riferite, e qui naturalmente gli effetti inerenti alla velocità non sempre uguale del motore, sono assai meno sensibili giacchè la resistenza del voltmetro qui figura come fattore nel denominatore, mentre nell'espressione di γ era solamente un termine.

Possiamo intanto affermare che le indicazioni del Dolivo-Dobrowolsky da noi completate in via teorica, sono sperimentalmente verificate.

6. Restava da esaminare se conformemente a quanto fu stabilito nella I^a Nota si possano ottenere degli spostamenti di fase notevoli anche durante lo sviluppo elettrolitico.

Coi mezzi a mia disposizione lo svolgersi libero degli elementi gassosi dell'elettrolito era soltanto possibile costruendo il voltmetro con elettrodi filiiformi. Furono all'uopo adoperati fili di platino del diametro di mm. 0,4, e la loro lunghezza variava a seconda delle esperienze, la loro distanza fu mantenuta di cm. 1,3 e l'elettrolito fu sempre acqua col $\frac{1}{8}$ di acido solforico.

Riferisco due sole fra le molte esperienze fatte, e che sono rappresentate dalle figure 8 e 9. Nella prima di queste esperienze il voltmetro aveva gli elettrodi immersi per una lunghezza di appena cm. 1,5, mentre nell'altra esperienza la porzione immersa degli elettrodi arrivò a cm. 2,2. Variava

invece notevolmente la intensità della corrente che eccitava la dinamo cosicchè nella seconda delle esperienze riferite si

Fig. 8.

sono raggiunti dei massimi di intensità di corrente superiori al doppio di quelle che si ottennero nella esperienza della figura 8. In conseguenza di ciò lo sviluppo dei gas risultanti dalla decomposizione dell' elettrolito era nella esperienza della fig. 9 abbondantissimo.

Fig. 9.

I massimi della differenza di potenziale ai capi dei due voltametri, che dai diagrammi risultano poco diversi, dipendono non solo dalla intensità di corrente ma anche dalla re-

sistenza del voltmetro e dal diverso spostamento di fase della polarità del voltmetro rapporto alla intensità di corrente.

Lo spostamento di fase fra la intensità di corrente e la differenza di potenziale ai capi del voltmetro è manifesto e notevole in entrambe le esperienze, acquistando i valori di $^{13}_{10}$ e $^{20}_{10}$ di semiperiodo e il maggiore spostamento compete al caso in cui il prodotto $I \rho \sin \alpha t$, acquista i minori valori. Ciò è esattamente quanto avevamo in precedenza stabilito in via puramente teorica.

Perdono ogni significato nel caso dell'elettrolisi le osservazioni sullo spostamento γ , giacchè allorquando si sviluppano i gas la polarità del voltmetro non è più ortogonale alla intensità, ed i suoi massimi risultano indipendenti da quelli della intensità.

Rimane adunque assodato come lo spostamento di fase fra la intensità di corrente e la differenza di potenziale ai poli di un voltmetro esista e si possa sperimentalmente osservare, e ciò (conformemente alla teoria) non solo nel caso indicato dal Dolivo-Dobrowolsky in cui cioè mancano i prodotti visibili della elettrolisi, ma anche nel caso in cui questi prodotti si svolgano; anzi il più forte spostamento da me notato (fig. 8) si riferisce a quest'ultimo caso.

Quando i massimi della funzione $I \rho \sin \alpha t$ sieno assai grandi, come accadeva senza dubbio nelle esperienze del Peukert, lo spostamento diminuisce entrando in un ordine di grandezza che può confondersi con gli errori di osservazione.

Per questi casi la determinazione non si può fare che ricorrendo ad un metodo di sperimentare diverso da quello usato, come appunto ha fatto egregiamente il Mengarini, i cui risultati di fatto acquistano così nuova importanza ¹⁾.

7. I risultati precedenti possono servire anche ad un'altra importante verifica. Nella Memoria sulla teoria dell'elettrolisi colle correnti alternanti ²⁾ io ho dato la dimostrazione della curva seguita dalla polarità del voltmetro tanto se c'è come

1) Mengarini, Memoria citata, pag. 32.

2) Lumière électrique, Vol. 47 e 48.

se manca lo sviluppo visibile di prodotti elettrolitici. Le classiche ricerche del Kohlrausch, come allora dimostrai, hanno valore in un campo troppo limitato, ben lontano dalle condizioni in cui il fenomeno della vera elettrolisi si produce.

Misure dirette per la determinazione di queste curve non sono state tentate finora, nè sarebbero prive di gravi difficoltà. Dai risultati precedenti esse si possono ottenere, sebbene per via indiretta, cioè calcolando a mezzo delle curve ottenute, per la differenza di potenziale ai capi del voltmetro, ed a quelli del reostato senza induzione.

Ho già detto nella I^a Nota che dalla legge di Ohm applicata al circuito delle mie esperienze si ricava che il valore istantaneo della polarità del voltmetro è espressa dalla formula:

$$p = I r - V$$

dove r indichi la resistenza del voltmetro, I la intensità di corrente, V la differenza di potenziale agli elettrodi: e questa formula, si noti, vale tanto se ci sono, come se mancano i prodotti visibili della elettrolisi.

La curva disegnata da una linea sottile nei diagrammi, rappresenta (come s'è detto) la differenza di potenziale ai capi del reostato $R = \text{ohm } 5,4$; cosicchè il valore di I si otterrà dividendo per questa resistenza i valori trovati per la differenza di potenziale agli estremi di essa, e che sono appunto rappresentati nella curva.

La resistenza dei voltmetri fu calcolata a mezzo del ponte di Kohlrausch ¹⁾, usando tutte le cure e ripetendo più volte le determinazioni col cambiare il valore della resistenza di comparazione a fine di trovare dei valori estremi entro cui poter assegnare con sicurezza quello della resistenza cercata.

Per il voltmetro che ha servito per la esperienza della fig. 4 ho trovato ohm 1,2; mentre per quello che riguarda la fig. 9 ho ricavato ohm 3,1.

Con questi elementi, a mezzo della formula precedente ho potuto facilmente calcolare i valori istantanei della polarità

1) Gerard, *Leçons sur l'électricité*, t. I, pag. 307 (3^a ed.).

del voltmetro, per le due predette esperienze. Ho ottenuto così il seguente quadro:

ESPERIENZA FIG. IV		ESPERIENZA FIG. IX			
Tempo	Polarità	Tempo	Polarità	Tempo	Polarità
1	—0,6	1	—0,3	5	+0,3
2	—1,0	1 $\frac{1}{2}$	—1,3	5 $\frac{1}{2}$	+1,3
3	—0,8	2	—1,3	6	+1,3
4	—0,1	2 $\frac{1}{2}$	—1,2	6 $\frac{1}{2}$	+1,0
5	+0,3	3	—0,7	7	+0,6
6	+0,9	3 $\frac{1}{2}$	—0,5	7 $\frac{1}{2}$	+0,7
7	+0,3	4	0,0	8	+0,5
8	+0,1	4 $\frac{1}{2}$	+0,1	8 $\frac{1}{2}$	+0,3

Ho riportato sui disegni questi valori e li ho riuniti successivamente con una linea a tratti, per rendere visibile l'andamento della polarità. Non ho riferito che questi due soli saggi per non complicare inutilmente gli altri disegni; però anche in tutte le altre determinazioni la curva della polarità presentava andamento conforme all'una o all'altra delle due riferite, a seconda del caso.

Dalla curva della polarità disegnata sulla fig. 4 che si riferisce ad una esperienza nella quale la vera elettrolisi mancava, risulta visibilmente che il comportamento della polarità è quale io stabilii nella citata Memoria e per via teorica; e cioè si ha una curva in qualche modo ortogonale alla intensità risultante, avente perciò i suoi massimi in prossimità degli zeri della prima, mentre gli zeri delle due curve si alternano. La ortogonalità risulterebbe perfetta solo nel caso teorico in cui la intensità risultante fosse esattamente sinusoidale; ma se la intensità abbia una forma particolare come accade in realtà per ogni dinamo alternante, gli zeri della polarità saranno determinati dalla condizione:

$$\int_0^x I dt = \frac{1}{2} \int_0^T I dt$$

giacchè la polarità dipende esclusivamente dalla quantità di elettricità.

Per il caso in cui lo sviluppo elettrolitico sia visibile, la fig. 9 ci mostra colla linea a tratti l'andamento reale della polarità del voltmetro. Vi è un tratto sul finire di ogni periodo della intensità, in cui la curva corre parallela all'asse del tempo, e solamente durante il corrispondente intervallo i prodotti elettrolitici si svolgono. Gli zeri della polarità hanno un ritardo rapporto a quelli della intensità, ritardo che dipende dalla forma particolare di essa. Così ho potuto notare in altre determinazioni (che per brevità non riferisco) che nelle due fasi del periodo le durate dell'intervallo in cui si compie la vera elettrolisi non sono sempre uguali.

Questo risultato che a tutta prima ha l'aspetto di un assurdo non infirma menomamente nè le leggi fondamentali dell'induzione e neppure quelle di Faraday sull'elettrolisi ordinaria; ma anzi si spiega esattamente a mezzo di esse. Infatti: pur essendo uguali le quantità di elettricità inerenti alle due fasi del periodo:

$$\int_0^T I dt = \int_T^{2T} I dt$$

e pure essendo la medesima la quantità di elettricità che satura gli elettrodi del voltmetro tanto in un senso che nell'altro, e data da:

$$2q_0 = \int_0^{\tau'} I dt$$

la forma particolare di I può offrire due valori diversi di τ' sia che si parta da 0 come da T nel fare l'integrazione. Ma allora però ai maggiori valori dell'intervallo restante nella fase corrisponderanno sempre i minori valori della intensità di corrente; cioè durante lo sviluppo elettrolitico si ha sempre il passaggio di uguale quantità di elettricità, e però nelle due fasi del periodo si hanno sempre uguali quantità di prodotti elettrolitici.

8. Ho sperimentato anche con voltmetri ad acqua acida formati con elettrodi di alluminio per i quali come è noto si hanno i maggiori valori della polarità del voltmetro.

L'esperienza della fig. 10, è stata fatta con un voltmetro avente la resistenza di circa 1 ohm, solamente. Gli elettrodi di alluminio avevano una superficie utile di 12 cm. ciascuno e distavano di circa cm. 1,6.

Fig. 10.

Usando lo stesso modo di eccitazione che nella esperienza della fig. 9, ed avendo una resistenza liquida notevolmente minore, ho ottenuto dei massimi di intensità di gran lunga minori che con elettrodi di platino, ciò che prova l'effetto degli elevati valori della polarità. Notevole in questa esperienza è pure il fatto che lo sviluppo gasoso dei prodotti elettrolitici era copioso risultando di una miriade di bollicine minutissime che si staccavano da ciascuna faccia degli elettrodi. Da ciò bisogna dedurre che mentre nei voltometri ad elettrodi di alluminio si ottengono forti polarità galvaniche, la quantità di elettricità necessaria per saturarli è di gran lunga più piccola che non si abbia con elettrodi di platino.

Gli zeri della polarità susseguono quindi rapidamente quelli della intensità di corrente, e siccome quelli della differenza di potenziale ai capi del voltmetro sono compresi nell'intervallo τ' che separa i due primi, risulterà manifesto come gli spostamenti di fase fra le due solite curve sieno, almeno in generale, molto minori di quelli che si possono ottenere con elettrodi di platino.