

---

# L'ELETTROTECNICA

nella Esposizione Universale del 1889 in Parigi.

Note del prof. GALILEO FERRARIS

---

## § 1.

### Le macchine dinamoelétriche.

#### I. Considerazioni generali.

1. Nell'autunno del 1881 si ebbe in Parigi la prima Esposizione Internazionale di Elettricità; nel 1889, dopo otto anni, di nuovo in Parigi, l'elettricità ha dato materia ad una parte cospicua di una grande Esposizione mondiale. Benchè tra le due mostre altre ve ne siano state a Monaco, a Vienna, a Torino, ad Anversa, le quali hanno man mano illustrato il graduale incremento delle nascenti industrie elettrotecniche, tuttavia quest'ultima esposizione parigina doveva riuscire singolarmente istruttiva, siccome quella che, svolgendosi nell'ambiente medesimo ov'era sorta la prima, poteva offrire più spontanei e più chiari confronti, e porgere per tal modo, colla massima evidenza, una esatta idea del meraviglioso cammino che le nuove industrie hanno percorso dal giorno, in cui si affermarono solennemente per la prima volta, al giorno d'oggi.

Tale effettivamente è riuscita nell'Esposizione la Classe 62, concernente l'elettrotecnica. In essa il visitatore, prima ancora

di entrare in un minuto esame dei singoli apparecchi e delle varie applicazioni, già col primo sguardo generale, ha trovato materia di riflessione e di ammaestramento. Questo fatto si è verificato colla maggiore evidenza per quel ramo della elettrotecnica, al quale si riferiscono le brevi note che io sto per esporre; e più specialmente si è verificato nella mostra delle macchine che danno vita alle grandi applicazioni industriali della corrente elettrica, nella mostra delle macchine dinamo-elettriche.

La prima osservazione che si presenta a chi getti uno sguardo generale sul complesso delle macchine dinamo-elettriche presentate in questa ultima esposizione parigina e confronti tali macchine con quelle che figuravano nella mostra del 1881 ed in quelle che in altri luoghi la seguirono, è questa: il numero dei modelli o dei sistemi non è aumentato, è anzi diminuito. Se alcune nuove forme di macchine si notano, più numerose però sono quelle che scomparvero, o che non figurano più se non nelle collezioni a scopo di storia. E i fabbricanti, nel presentare le loro macchine, non mirano più, in generale, a porre in evidenza, come cosa essenziale, le forme nuove e gli sperati vantaggi delle medesime; nè i visitatori esperti si arrestano più a considerarle.

Orbene tale osservazione è importante. Infatti come la molteplicità delle forme e la varietà dei disegni erano la conseguenza e la prova della mancanza di un'idea chiara e precisa degli scopi ai quali si doveva mirare, e della incertezza dei criteri che dovevano guidare al conseguimento dei medesimi, così la somiglianza di aspetto risultante dalla uniformità delle proporzioni, che attualmente presentano tra di loro le macchine delle migliori fabbriche, attesta, per converso, che oramai nozioni esatte e criterii certi offrono a tutti i costruttori una guida uniforme. Quando mancano nozioni precise sulle leggi quantitative che impongano determinate proporzioni e additino per conseguenza anche le forme più acconcie e più facilmente conciliabili con quelle, nulla circoscrive il campo alle speculazioni degli inventori, i quali, procedendo a tentoni, cercano nelle nuove forme dei loro apparecchi ciò che meglio

essi potrebbero ottenere collo studio delle dimensioni. Quindi la molteplicità dei disegni e la gara dei sistemi. Quando invece le leggi dei fenomeni, che debbono prodursi nelle macchine progettate, sono note così da prendere forma di leggi quantitative, il costruttore che sa determinare le dimensioni in relazione cogli effetti che vuole ottenere, e subordina ai risultati di calcoli sicuri l'intero studio del suo progetto, si trova naturalmente guidato a scegliere tra poche forme razionali e pratiche, e piuttosto che alla ricerca inutile di nuovi sistemi, dirige il proprio studio a soddisfare alle norme di una buona composizione meccanica. All'inventore subentra l'ingegnere; l'osservanza delle regole generali della buona ingegneria dà luogo ad una generale somiglianza d'aspetto nelle macchine; alla gara de' sistemi subentra la gara, molto più seria e proficua, della buona costruzione.

Il progresso che in pochi anni si è fatto nella conoscenza delle proprietà delle macchine dinamoeltriche e delle leggi quantitative che le governano è meraviglioso; e notevolissima è la trasformazione che tale conoscenza ha prodotto nell'arte di disegnare e di costruire le macchine. Ancora nel 1881 le macchine si costruivano con empiriche ed incerte regole di fabbrica; gli effetti che esse avrebbero dato non si prevedevano se non per mezzo di confronti e di analogie con macchine già costrutte e già sperimentate; tali effetti non si potevano accertare in modo sicuro se non a costruzione avviata, o finita, coll'esperienza. Ora invece, dati gli effetti che si vogliono ottenere, e note soltanto le qualità dei materiali che si vogliono impiegare nella costruzione, le macchine si calcolano *a priori* e si disegnano sulla base delle dimensioni calcolate, con una sicurezza non inferiore a quella colla quale si studiano i progetti delle macchine a vapore e degli altri apparecchi industriali. Lo studio e la costruzione delle macchine dinamoeltriche costituiscono presentemente, propriamente, un ramo di ingegneria meccanica, e le macchine hanno assunto effettivamente lo aspetto ed il carattere di apparecchi francamente industriali.

Questo grande progresso, pel quale l'arte di costruire le macchine di induzione è passata nel volgere di pochi anni

dall'infanzia alla maturità, è precipuamente dovuto alla più estesa e più chiara conoscenza che ora si ha delle proprietà magnetiche del ferro. E tale conoscenza, che costituisce da sé un importante acquisto scientifico, è a sua volta dovuta in gran parte alla diffusione ed al retto impiego che ha trovato tra i tecnici il concetto chiaro e fecondo di circuito magnetico. Se ai lavori scientifici di Warburg, di Rowland, di Ewing, di John Hopkinson la scienza deve un prezioso complesso di fatti, i quali dànno nuova forma e nuovo significato alle nozioni che si hanno sul magnetismo, si deve pure affermare che l'applicazione pratica alle macchine dinamoeltriche del concetto di circuito magnetico e di flusso d'induzione, che l'Hopkinson stesso in unione col fratello e l'ing. Gisbert Kapp ci insegnarono a fare, non solo ha aperto ai tecnici un nuovo orizzonte, ma ha servito a provocare e ad incoraggiare potentemente gli stessi lavori scientifici. Non v'ha altro ramo di scienza applicata ove la reciprocità degli interessi scientifici e di quelli industriali si sia palesata in modo più evidente. Imperocchè non si saprebbe dire se nel promuovere il rapido e grande progresso di cui parliamo abbiano contribuito più le ricerche disinteressate degli studiosi della scienza, o quelle imposte ai tecnici dai problemi industriali.

2. Queste considerazioni, ho detto, si presentano spontanee alla mente di chi getti un primo sguardo d'insieme sulle macchine dinamoeltriche esposte a Parigi. Ed a porre qui in chiaro l'evidenza di esse mi basta notare per sommi tratti i prodotti che presentano attualmente le fabbriche più importanti fra quelle che avevano già esposto nel 1881, e delle quali le macchine erano allora considerate come tipi o modelli distinti. Cito, come principalissime, le macchine di Edison, di Siemens ed Halske, di Gramme, di Sautter e Lemonnier.

Edison presentava nel 1881 due modelli di macchine: la grande macchina dinamoeltrica a vapore, e la macchina Z. La prima, che poté essere messa in azione soltanto negli ultimi giorni dell'esposizione, era allora la più grande macchina che mai fosse stata costrutta; produceva circa 1000 ampere

con 108 volt, ossia circa 108 chilowatt; poteva alimentare circa 1400 lampade di 16 candele, ed era comandata direttamente dalla biella di una macchina a vapore portata dalla medesima base e dalla medesima intelaiatura. Aveva un elettromagnete di campo a semplice ferro di cavallo, e le braccia di questo, che erano orizzontali, erano formate l'una, la superiore, con otto, l'altra, l'inferiore, con quattro sbarre cilindriche coperte di spirali. Le estremità polari erano enormi, ed erano anche dissimetriche, giacchè la superiore era assai più grande dell'inferiore.

L'altra macchina, la Z, la quale produceva da 37 a 38 ampere con 106 volt, aveva anch'essa un magnete di campo a semplice ferro di cavallo, ma questo era verticale co' poli in basso. E ciò che distingueva la macchina da tutte le altre era una straordinaria altezza delle braccia dell'elettromagnete e la relativa magrezza delle medesime. Come nella grande macchina, le estremità polari, assai grandi, avviluppavano quasi per intero l'indotto.

La Casa Siemens ed Halske di Berlino aveva nel 1881, come macchina per corrente continua, il tipo D, con doppio circuito magnetico. Fra le particolarità di tale macchina si notava questa, che i nuclei degli elettromagneti di campo erano formati con sottili sbarre di ferro di sezione rettangolare. La sezione del ferro era piccolissima, e a fronte di essa era considerevole quella delle spirali magnetizzanti.

La Società Gramme aveva molti modelli diversi, ma fra tutti erano presentati e ritenuti come principali quelli coll'induttore a doppio circuito magnetico, e specialmente quello notissimo conosciuto col nome di tipo « Atelier ».

*Sautter e Lemonnier* costruivano allora macchine di modello Gramme e più precisamente coll'induttore a molte colonne verticali. La disposizione di esse non differiva sostanzialmente da quella che già aveva figurato nella esposizione universale di Vienna nel 1873; nè da essa differiva sostanzialmente quella delle macchine che la stessa Casa costruttrice aveva posteriormente presentato a Torino nel 1884.

Attualmente tutti gli accennati tipi di macchine sono scom-

parsi o vennero profondamente modificati. La trasformazione cominciò, come è debito ricordare, già fin dal 1883 per opera principalmente del dottor J. Hopkinson, il quale, senza mutare la disposizione generale delle parti, modificò profondamente, guidato da sicuri concetti scientifici, le principali proporzioni della macchina di Edison a magnete verticale. La modificazione consistette principalmente in una notevole riduzione della lunghezza delle braccia dell'elettromagnete di campo, ed in un ingrossamento delle medesime. Il miglioramento ottenuto fu notevolissimo. Lo Sprague (1) esponeva in una relazione, già nel 1883, i seguenti risultati: Una antica macchina Edison di antico modello fatta per 150 lampade di 16 candele aveva un peso di 2720 chilogrammi, e con una velocità di 900 giri al minuto, produceva 112 ampere con 110 volt. Dopo un ingrossamento di soli 25 millimetri ed un raccorciamento delle braccia del magnete, combinati con un corrispondente aumento del numero delle spire e con una moderata diminuzione della intensità della corrente eccitatrice, bastarono 500 giri al minuto per ottenere il medesimo effetto. Con ciò il peso della macchina risultò aumentato di circa 300 chilogrammi rappresentati per tre quarti dal ferro e per un solo quarto dal rame. La trasformazione si compì adunque rapidamente e quasi contemporaneamente nelle fabbriche della Società Edison americane ed europee.

Quasi contemporaneamente ad Edison, Siemens ed Halske introdussero nella loro fabbricazione una analoga modificazione. Nel 1883 infatti usciva dalla loro fabbrica il modello F, che figurò, per la prima volta in una esposizione internazionale, nella Sezione elettrotecnica della Esposizione del 1884 in Torino. In tale modello di macchina era conservata l'antica disposizione con doppio circuito magnetico, ma grosse colonne cilindriche di ghisa, rastremate in corrispondenza dell'indotto, avevano preso il posto delle sottili sbarre di ferro che dianzi costituivano i nuclei delle calamite. Nello stesso anno 1884 la stessa Casa faceva nella medesima direzione ancora un passo

(1) Vedi GUEROUT, *La lumière électrique*, pag. 359; 1883.

e produceva le macchine H, dette superiori, con magneti a semplice ferro di cavallo, coi poli in alto e colle braccia grossissime e cortissime.

Poco stante, nel 1885, l'ing. Gisbert Kapp presentava nella Esposizione delle invenzioni in Londra una serie di macchine ove lo studio del circuito magnetico era fatto con molta cura, ed ove era in più modi risolto il problema di avere in tale circuito una minima lunghezza ed una massima sezione. Notevolissima tra tali macchine era quella a poli superiori, ove la forma complessiva corrispondeva a quella delle macchine superiori di Siemens, ma i nuclei erano di ferro fucinato ed erano uniti allo zoccolo ed alle appendici polari in modo quasi identico a quello che si osserva nelle macchine attualmente presentate dalle fabbriche che si servono dei modelli della Casa Siemens.

Intanto le pubblicazioni di Rowland, di Bosanquet e dello stesso Kapp (1) cominciavano a rendere famigliari tra i tecnici il concetto del circuito magnetico e la influenza delle dimensioni di esso sul flusso d'induzione. E tali pubblicazioni, segnatamente quella del Kapp, ove il modo e la forma dell'esposizione erano quelli proprii all'ingegnere che ha attinto i suoi concetti nella lunga familiarità colle macchine effettive, e che li presenta coll'intento di farli servire in modo chiaro e comodo alla soluzione di questioni pratiche, delle quali egli ha un senso tecnico sicuro, fecero sì che la trasformazione nella fabbricazione delle macchine dinamo elettriche diventasse generale in brevissimo tempo.

Per tal modo scomparvero molti modelli o sistemi speciali, e in loro vece trovarono impiego viepiù frequente e generale quelli che sovra ho accennato, e pochi altri studiati razionalmente coi medesimi criteri. E così nell'Esposizione noi vediamo che la Casa Edison presenta tanto per le più grandi macchine come per le più piccole un unico modello, il modello a semplice ferro di cavallo con braccia verticali grosse e corte, con

(1) *The Electrician*, 25 ottobre 1884; id., 14 febbraio 1885; id., 14 aprile 1885.

estremità polari assottigliate, colle proporzioni, insomma, consigliate da Hopkinson. Nella mostra della Società Americana di Edison non si trova più alcuna macchina ove le elettrocalamite di campo abbiano sbarre multiple: anche la più grande di tutte, quella di 175 chilowatt, che pure supera per potenza la dinamo a vapore del 1881, ha il campo magnetico prodotto da una elettrocalamita a grosse braccia cilindriche semplici. La Compagnia continentale Edison di Parigi ha nella sua stazione centrale della Esposizione, come nella bella stazione stabile del *Palais Royal*, macchine con doppio circuito magnetico disegnate dall'ing. Picou, ma il tipo di esse ricorda assai più le macchine F di Siemens ed Halske, che non le antiche macchine dell'inventore americano. Così pure la Società Gramme non presenta più le sue antiche macchine del tipo « *Atelier* » e le altre numerose forme per le quali essa è passata, se non a scopo di storia; nella sua costruzione attuale essa si è fissata specialmente su di un solo tipo, sul tipo a semplice ferro di cavallo coi poli in alto e colle braccia robuste e corte. Nella stazione centrale che la Società ha nella Esposizione, non si vedono che macchine di tale tipo, e a questo unico tipo appartengono tutte le macchine dalla Società adoperate negli impianti più recenti e più grandiosi. La Casa Sautter e Lemonnier, anch'essa, ha abbandonato quasi completamente il modello Gramme a colonne multiple verticali, e per le macchine bipolari ha adottato francamente il tipo della macchina « *Manchester* » della fabbrica Mather e Platt, tipo al quale anche altri costruttori si sono accostati, e che rappresenta una applicazione razionale, ottima dal punto di vista costruttivo, dei nuovi principii. Anche per le macchine multipolari la Casa Sautter e Lemonnier si è allontanata dalla forma delle macchine Gramme e si è accostata a quella delle macchine *Thury*, che la fabbrica *De Meuron et Cuénod* di Ginevra aveva esposto a Torino nel 1884. Finalmente, benchè la Casa Siemens ed Halske di Berlino, come tutte le fabbriche tedesche, si siano astenute dall'Esposizione, pur tuttavia il visitatore di questa ha potuto estendere il suo esame anche ad essa, e fare anche sulle macchine, che essa costruisce attualmente, confronti e

considerazioni analoghe alle precedenti. Figurava infatti a Parigi, con una splendida mostra, la *Società Alsaziana di costruzione meccanica*, che ha le sue officine a Belfort; e tutto il materiale elettrico che questa Società produceva era costruito sui disegni della Casa Siemens ed Halske. Ora tutte le macchine bipolari esposte dalla Società Alsaziana erano del tipo a semplice circuito magnetico coi poli in alto, avevano nuclei corti e grossi, e ciò che qui più importa notare, il collegamento dei nuclei cilindrici di ferro fucinato collo zoccolo e colle appendici polari, che sono di ghisa, e la forma di queste, e le proporzioni tutte, e tutto l'insieme delle macchine ricordavano perfettamente la macchina a poli superiori del Kapp, della quale si è fatto cenno più sopra. La stessa Società presentava eziandio una macchina a 6 poli con induttore interno ed anello esterno conforme agli ultimi disegni di Hefner Alteneck, macchina che, come tutti sanno, differisce completamente da quante la Casa Siemens aveva prima del 1886, e che fu disegnata appunto colla guida dei nuovi principii, dei quali rappresenta una applicazione perfettamente razionale.

Potremmo moltiplicare gli esempi, ma questi bastano, per ora, a dimostrare la natura e l'importanza della trasformazione che nel volgere di pochi anni ha ricevuto l'arte della costruzione dei generatori industriali della corrente elettrica.

Tale trasformazione è, come abbiamo detto cominciando, uno dei fatti più importanti che l'Esposizione abbia messo in evidenza: è il fatto che si presenta pel primo allo studioso, e doveva occupare il primo posto in queste nostre note. Ora che lo abbiamo notato, noi potremo nell'esame dei particolari offerti dalle varie macchine esposte procedere a grandi passi, e soffermarci solamente su quelle macchine che presentano, in qualche loro disposizione, novità degne di osservazione. Non ve ne ha molte, ve ne ha però di quelle veramente degne di studio.

## II. Note su alcune macchine speciali.

Cominceremo a considerare le macchine a corrente continua, che nella Esposizione erano riccamente rappresentate, e verremo dopo alle macchine a corrente alternativa.

### A) *Macchine a corrente continua.*

3. Dopo le osservazioni precedenti non ho mestieri di descrivere le macchine presentate dalla Società Americana *Edison*; non è però inutile che io qui riferisca qualche dato numerico relativamente al più grande degli esemplari esposti, che come già ebbi occasione di dire ha la forma a ferro di cavallo semplice colle proporzioni e coll'aspetto di quelle del tipo Edison-Hopkinson. Colla velocità corrispondente a 450 giri al minuto, esso produce 140 volt con 1250 ampere, il che equivale a 175 chilowatt. Può così alimentare 2500 lampade di 16 candele, oppure 4000 lampade di 10 candele. Ha 41 segmenti nel collettore e sei spazzole per polo. Pesa in tutto 12.7 tonnellate. Tali numeri diventano istruttivi se si confrontano con quelli relativi alla grande macchina dinamo-elettrica a vapore dall'*Edison* presentata nella Esposizione del 1881, macchina la potenza della quale superava tutto quanto in quel tempo era lecito immaginare come praticamente possibile. Quella macchina, con una velocità corrispondente a 350 giri al minuto, produceva poco più di 100 chilowatt; essa intanto presentava i seguenti pesi: ferro dell'indotto, nuclei del magnete di campo, pezzi polari e gioghi dell'elettromagnete medesimo, ritti pei cuscinetti, piastre di zinco serventi di zoccolo al magnete: chilogrammi 24.420; rame dell'indotto e dell'induttore: chilogrammi 1560; totale chilogrammi 25.980, ossia poco meno di 26 tonnellate.

Per render chiaro il confronto dividiamo il numero di watt per il peso in chilogrammi e per il numero di giri fatti dall'indotto in un minuto secondo, avremo calcolato così ciò che si può denominare il numero di joule per chilogramma di peso e per giro. Troviamo per la macchina del 1881:

$$\frac{100.000 \times 60}{25.980 \times 350} = 0,66 \text{ joule per giro e per chilogramma ;}$$

e per la macchina del 1889 :

$$\frac{175.000 \times 60}{12.700 \times 450} = 1,84 \text{ joule per giro e per chilogramma.}$$

Si può adunque dire che l'utilizzazione del materiale impiegato nella costruzione della macchina è, col nuovo modello, quasi tre volte migliore che col modello antico.

Tale confronto mette in chiaro la ragione per cui non solo il disegno, ma anche la potenza delle macchine ha molto variato. E questo punto è degno di nota. Nel 1881, eccezione fatta dalla macchina dinamo-vapore di Edison, le maggiori macchine dinamo elettriche, anche quelle costrutte dalle fabbriche più importanti, avevano potenza non superiore a qualche decina di cavalli dinamici. Ora invece noi vediamo numerosissime, assolutamente comuni, macchine che con moderate dimensioni hanno potenze di centinaia di chilowatt, equivalenti a centinaia di cavalli vapore. Gli impianti elettrici hanno perciò anch'essi cambiato d'aspetto e di carattere. Quegli impianti, che una volta erano frequentissimi e costituivano il tipo più comune, quegli impianti ove ciascuna macchina motrice comandava per mezzo di altrettante cinghie parecchie piccole macchine dinamo elettriche disposte a scaglioni, sono ora quasi completamente scomparsi ; ed in loro vece si hanno sistemi ove ciascuna macchina a vapore comanda solamente una o due macchine dinamo elettriche di dimensioni armonizzanti con quelle della motrice e formanti con essa un tutto compatto e robusto, sul quale riposa con soddisfazione l'occhio dell'ingegnere abituato all'architettura delle costruzioni meccaniche.

Oltre alla grande macchina della quale abbiamo fatto cenno, la Società Americana Edison esponeva alcuni modelli di macchine minori. Fra queste meritano una menzione speciale quelle destinate alle distribuzioni con lampade in serie secondo il sistema che la Società Edison Americana impiega oggidì este-

sissimamente col nome di sistema *Municipale*. Su questo sistema e su altri analoghi oggi in uso avremo occasione di discorrere più avanti; ora notiamo soltanto, quale prova dell'immenso progresso che si è compiuto nella costruzione delle macchine dinamoeltriche, questo fatto, che possono essere di uso pratico e funzionare industrialmente su larga scala, senza offrire alcun inconveniente, macchine a corrente continua con un collettore di 100 e più segmenti, le quali producono regolarmente fra i poli una differenza di potenziali di 1200 volt.

4. Le officine di *Oerlikon* presso Zurigo esponevano una notevole collezione di macchine dinamoeltriche disegnate dall'ing. Brown. Le macchine dovute a questo distinto ingegnere sono entrate da pochi anni nella industria, ma sono notissime per la bontà del disegno e per la perfezione della costruzione. Quelle poi esposte a Parigi formavano un complesso tale che ad essa noi dobbiamo dare qui un posto distinto. La più grande di esse è una macchina a 4 poli, del tipo ottagonale, destinata a servire come generatrice per un trasporto di forza motrice, ed era accoppiata ad una ricettrice del medesimo sistema. Con una velocità corrispondente a 480 giri al minuto, la macchina produceva tra i poli 600 volt e trasmetteva circa 180 chilowatt. L'ossatura del sistema induttore ed i nuclei degli elettromagneti erano di ghisa. Tale sistema induttore, il quale, come si è detto, aveva forma ottagonale, era fatto di due pezzi uniti secondo il piano orizzontale passante per l'asse; ciascun pezzo portava due dei nuclei delle elettrocalamite, venuti di getto con essi; gli assi di questi nuclei erano inclinati a 45 gradi sull'orizzonte. L'armatura era anulare ed il nucleo di essa, composto di dischi isolati con carta, era portato dall'asse per mezzo di una ruota di bronzo a otto braccia. L'armatura era lunga 56 cm., aveva un diametro esterno di circa 94 cm., ed un vano centrale del diametro di circa 58 cm. Essa era avvolta alla Gramme in 200 sezioni di due spire ciascuna. Il conduttore consisteva in una fune di 19 fili di rame del diametro di circa mm. 1,30, coperta di cotone e verniciata. Approssimativamente, per quanto era possibile giudicare ad occhio,

la distanza, misurata sulla circonferenza dell'indotto, fra due magneti consecutivi, era uguale alla larghezza dei nuclei dei magneti stessi, misurata anch'essa sulla circonferenza. Questi ultimi adunque potevano avere una larghezza di circa 37 cm. e questa moltiplicata per 56, dà circa 2100 centimetri quadrati come area della sezione dei nuclei dei magneti. La sezione trasversale del telaio ottagonale, portante i magneti e chiudente con essi i circuiti magnetici, era alquanto maggiore della metà di quella dei nuclei, era cioè di 1097 cm. q. La corrente era raccolta da quattro coppie di spazzole, ciascuna delle quali era larga circa 5 cm., e siccome le spazzole opposte erano congiunte in parallelo, così si avevano 4 spazzole, formanti una larghezza complessiva di 20 cm., per raccogliere una corrente di circa 300 ampere. I magneti erano eccitati *in serie*; ciascun nucleo era coperto con 60 giri di una lastra di rame larga 30 cm. e grossa circa 1 mm; le quattro spirali così formate erano congiunte tra di loro in serie. La descritta macchina funzionava come generatrice e somministrava la corrente ad una macchina quasi identica funzionante come motore nella galleria della meccanica agraria.

Un'altra macchina a quattro poli figurava nella mostra delle officine di Oerlikon, ed era notevolissima. Era una macchina di soli 14 chilowatt, ma presentava una disposizione dell'induttore tale che i quattro poli vi erano prodotti per mezzo di due sole spirali magnetizzanti. Questa disposizione ingegnosa era stata proposta già dal Kapp, ma non era ancora stata messa in pratica. L'induttore della macchina di cui facciamo cenno è formato da un telaio rettangolare di ghisa coi due lati maggiori orizzontali e co' minori verticali. Con questi ultimi lati sono venuti di getto i nuclei di due elettromagneti grossi e corti, situati dentro al telaio rettangolare cogli assi su di una medesima retta orizzontale. La corrente eccitatrice circola nelle spirali dei due elettromagneti in versi opposti, cosicchè si formano due poli omonimi sulle estremità libere de' medesimi, e due punti conseguenti rappresentanti due poli contrari ai precedenti si formano nei punti di mezzo dei due lati orizzontali del telaio rettangolare. Per tal modo si hanno

i quattro poli induttori. Le estremità libere de' nuclei dei due elettromagneti e le parti mediane dei lati orizzontali del telaio sono opportunamente incavate in modo da formare parti di una medesima superficie cilindrica, e nel vano cilindrico così formato è situato l'indotto. Il nucleo di ferro dell'indotto ha la forma di un anello. Le linee di induzione che emanano dalle estremità polari dei due elettromagneti entrano nell'anello sui due fianchi, e percorrendo ciascuna un quarto di esso ne escono in forma di due fasci simmetrici dalla parte superiore e dalla inferiore. L'indotto ha, come si è detto, un nucleo anulare, ma è avvolto come un'armatura a tamburo. Ciascuna spira occupa sulla superficie cilindrica del tamburo l'ampiezza di 90 gradi. Sul collettore si appoggiano due sole spazzole a 90 gradi. Le sezioni dell'armatura sono collegate internamente in serie. La macchina è direttamente accoppiata ad una motrice a vapore verticale di 20 cavalli. Essa dà normalmente 200 ampere con 70 volt.

Le macchine bipolari della fabbrica di Oerlikon hanno, come è noto, una disposizione somigliante a quella delle macchine dette « Manchester ». Di queste figurava nella Esposizione un ottimo esemplare, rappresentato da una macchina direttamente accoppiata ad un motore a vapore verticale *compound* di 60 cavalli. Colla velocità corrispondente a 350 giri al minuto essa dava 500 ampere con 65 volt. Era eccitata in derivazione. I fili dell'indotto erano avvolti sulla superficie esterna del nucleo e non inseriti in buchi come nelle macchine analoghe precedentemente costrutte dalla medesima fabbrica.

5. Le macchine esposte dallo stabilimento di *Sautter et Lemonnier* di Parigi, alle quali ho già avuto occasione di fare allusione, meritano anch'esse di essere qui citate. Ve n'erano di due tipi principali: delle multipolari e delle bipolari. Le multipolari presentavano nell'induttore una disposizione molto somigliante a quella, oramai notissima, delle macchine del Thury, e precisamente a quella che era stata presentata ed aveva ottimamente funzionato nella Esposizione di Torino nel 1884; l'indotto avevano invece anulare, alla Gramme, come

tutte le macchine della medesima fabbrica. Notevole fra queste macchine multipolari era una grande ad otto poli, eccitata in derivazione, di 70 chilowatt. Le macchine bipolari poi avevano, come già accennammo più sopra, una disposizione analoga a quella del tipo « Manchester », e solamente si distinguevano dalle altre macchine di tale tipo per il grande diametro della spirale anulare indotta. La tendenza di numerosi costruttori ad accostarsi a questo tipo costituisce un fatto notevolissimo. Esso conferma meglio d'ogni altro la tesi enunciata in principio di queste pagine: finito il periodo de' tentativi e delle incertezze, i migliori costruttori cominciano a porre in disparte la vana ricerca di nuovi sistemi, e ad essa antepongono lo studio, assai più serio, di fare della buona ingegneria. E i tipi che presentano le forme più semplici, più robuste, più pratiche, più facili nella costruzione hanno la preferenza.

6. Una mostra notevolissima era quella fatta dalla *Société Alsacienne de construction mécanique, usine de Belfort*. Tale mostra riceveva poi una importanza affatto speciale, perchè le macchine dinamo elettriche e tutto il materiale elettrico costruito dalla Società Alsaziana sono fatti, come è noto, sui disegni e coi criteri della Casa Siemens ed Halske, che la Società rappresenta nella Francia. La mostra dell'officina di Belfort rappresentava perciò nella Esposizione di Parigi un saggio della fabbricazione tedesca. Era questo il solo saggio, ma era molto importante. Esso infatti presentava ottimi esemplari degli ultimi tipi di macchine prodotti dalla più cospicua Casa tedesca.

La mostra della *Société Alsacienne* comprendeva una macchina a 6 poli con indotto anulare e con induttore interno, del tipo Hefner-Alteneck, due macchine bipolari del tipo superiore, ed un quadro di distribuzione per stazione centrale.

La macchina a sei poli rappresentava l'ultimo modello delle macchine a corrente continua che Siemens ed Halske adoperano nei grandi impianti. L'induttore era costituito da una stella a sei braccia, ciascun braccio della quale era una elettrocalamita grossa e corta. Esso era fisso. L'indotto era

un anello del tipo Gramme racchiudente l'induttore. Esso era portato in *false* da una stella solidaria all'albero. Questo era rigidamente unito all'albero della macchina a vapore, del quale costituiva un prolungamento. La spirale anulare era fatta con lamelle di rame; ciascuna spirale di essa costituiva da sè una spirale elementare, e il lato esterno di ogni spirale, denudato sulla faccia esterna, costituiva un segmento del collettore. Per tal modo il collettore risultava formato dalla faccia esterna, cilindrica e tornita, della stessa spirale indotta. E su di questa si appoggiavano direttamente le spazzole. Essendo sei i poli induttori, sei erano gli sfregatori, ciascuno dei quali era costituito da un conveniente numero di spazzoline di filo di rame. Una stella girevole, a sei braccia, portava tutte le spazzole, che così potevano spostarsi e regolarsi tutte insieme. La macchina era eccitata in derivazione; le spazzole erano collegate in parallelo. Colla velocità corrispondente a 150 giri per minuto, la macchina dava 125 volt e 1000 ampere, ossia 125 chilowatt (170 cavalli). Il tipo di macchina che abbiamo descritto si presta assai bene a potenze anche molto maggiori, ed infatti la fabbrica di Siemens ed Halske di Berlino, e quella della *Société Alsacienne*, costruiscono correntemente macchine simili alla descritta, le quali, con una velocità corrispondente a soli 70 giri per minuto, danno 600 chilowatt, il che corrisponde a più di 810 cavalli.

Le due macchine bipolari sono del modello che Siemens ed Halske contrassegnano col nome di tipo H, modello che, come abbiamo già avuto occasione di notare, riproduce quasi identicamente una delle forme adottate dal Kapp. Esse sono di costruzione accuratissima; hanno il collettore di acciaio coll'isolamento ad aria; con 300 giri danno 120 volt e 500 ampere.

Il quadro di distribuzione che completava la bella esposizione della Società Alsaziana era anch'esso del tipo Siemens ed Halske, e presentava una completa collezione degli interruttori, a mano od automatici, dei regolatori, degli amperometri e voltometri, degli indicatori di terra, ecc., coi quali la grande fabbrica tedesca suole fare l'apparecchiamento delle sue stazioni centrali.

7. Occupavano un posto importante nella Esposizione le macchine del *Marcel Deprez*, le quali erano presentate dalla *Société anonyme pour la transmission de la force par l'électricité*. Tali macchine rappresentano, come è noto, un tipo speciale studiato precipuamente per la trasmissione della energia meccanica a distanza, e il loro tratto caratteristico sta nell'impiego di due armature in un medesimo circuito magnetico. Il più grande modello delle macchine di cui parliamo è quello che il Marcel Deprez fece per le note esperienze per la trasmissione della energia meccanica tra Creil e Parigi; ed è noto come in tale modello il circuito magnetico sia prodotto da sei elettromagneti a ferro di cavallo disposti radialmente attorno all'albero portante le due armature. E nella Esposizione notavasi appunto un grande esemplare di tale modello, egregiamente costruito e funzionante nella grande galleria delle macchine. Ma il tipo di macchina Marcel Deprez, che nella Esposizione era rappresentato da un maggior numero di esemplari, è più semplice ed è senza alcun dubbio migliore. È un tipo di macchina ove il circuito magnetico è semplice ed è prodotto con due sole spirali magnetizzanti. Costituiscono il circuito magnetico due grandi elettromagneti con grossi nuclei cilindrici paralleli. Le estremità polari delle due elettrocalamite sono ripiegate ad angolo retto ed abbracciano le due armature. Le armature sono, come del resto in tutte le macchine del Deprez, anulari, alla Gramme. Sonvi due puleggie motrici, una per ciascuna estremità dell'albero, e in alcuni esemplari a ciascuna puleggia attiva si accompagna una puleggia folle. Il tutto forma un complesso, dal punto di vista meccanico, solido e pratico. Il piano del circuito magnetico in alcuni esemplari, fra i quali sonvi quelli che funzionano nella stazione centrale che la Società esponente impiantò per l'illuminazione di una parte dell'Esposizione, è orizzontale; in altri esso è verticale. In uno di essi l'intero sistema induttore era portato su due coltelli e collegato con un dinamometro registratore ed integratore col quale si poteva misurare in modo continuo il lavoro assorbito dalla macchina.

8. Le macchine di *Rechniewsky* che funzionavano nella stazione impiantata in riva della Senna per l'illuminazione di una parte dell'Esposizione dalla Società anonima *L'Eclairage électrique* e quelle del medesimo autore, che con varie dimensioni figuravano nella galleria delle macchine, attraevano anch'esse l'attenzione degli elettricisti. E veramente se le macchine del *Rechniewsky*, per il costo della costruzione e per le condizioni meccaniche, non sono probabilmente destinate ad una estesa e grande applicazione industriale, esse meritano tuttavia di essere notate per gli effetti che producono e per l'insegnamento che offrono. Esse pongono in evidenza la capitale importanza che ha la grossezza dell'interferro sull'efficacia di una macchina. La particolarità delle macchine *Rechniewsky* consiste nell'avere un indotto con nucleo dentato ed un induttore con nucleo lamellare come quello dell'indotto. I denti dell'armatura sono piccoli e numerosi così, che piccole risultano le oscillazioni della resistenza magnetica del circuito magnetico; e la lamellazione dell'induttore sopprime quasi completamente gli effetti dannosi delle correnti di Foucault dovute alle oscillazioni medesime. Si ha così intiero il vantaggio offerto dai denti, che è quello di diminuire notevolmente la grossezza dell'interferro, senza avere gli inconvenienti delle correnti parassite che, colla ordinaria costruzione, i denti produrrebbero nel ferro della macchina. Se si dà fede ai dati forniti dagli espositori, il vantaggio effettivamente ottenuto colla indicata disposizione è veramente notevole. Ecco per esempio alcune cifre relative ad una macchina *Rechniewsky* che funzionava nella stazione centrale della Società *L'Eclairage électrique*:

Peso totale della macchina:	chilogrammi	. 980
Giri per minuto	. . . . .	800
Velocità periferica dell'indotto:	metri per 1"	11,04
Potenza della macchina:	watt	. . . . 26.000
Watt per chilogr. di rame nell'indotto	. . . . .	800
Id.	id.	id. totale . . . . 225

9. Come ho detto cominciando, questi cenni su alcune delle macchine dinamo elettriche che hanno figurato nella Esposizione si debbono estendere solamente a quelle macchine che presentano qualche particolarità nuova e degna di osservazione. Nè lo scopo, nè le proporzioni della presente relazione potrebbero permettere di descrivere, non dico tutte le macchine esposte, ma nemmeno tutte quelle che per la bontà del disegno e della costruzione o per l'importanza degli stabilimenti dai quali derivano, hanno ottenuto o meritano l'elogio dei tecnici ed il favore degli industriali. Quindi io mi accontento di nominare, senza descriverle e ritenendole, come sono infatti, note a tutti gli elettricisti, le ottime macchine del Crompton (*Crompton and Company, Limited, London*), le quali si distinguono per le ampie proporzioni dell'armatura anulare e la relativa cortezza dei circuiti magnetici; e quelle di *Cuenod e Sautter* di Ginevra costrutte secondo il noto modello della macchina Thury; e quelle che *Steinlen e C.* di Muhlhausen presentavano in molti esemplari nella loro ammirabile esposizione di macchine lavoratrici. Così pure non mi arresto a descrivere i numerosi modelli di macchine presentati dalla Società *Gramme*, i quali son noti universalmente, e solamente noto come nella sua mostra tale Società, che tanta parte ha avuto nello svolgimento della odierna elettrotecnica, ponga in evidenza che molte forme, che, adottate da altre fabbriche, ottennero impiego e favore nella pratica, sono state ideate dal Gramme e da lui stesso effettivamente provate. Mi fermo invece su due macchine le quali presentano disposizioni degne di un cenno speciale. Sono queste una macchina a corrente continua del prof. *Elihu Thomson*, e la macchina del *Desroziers*.

10. La macchina del prof. *Elihu Thomson*, della quale intendo parlare, è una di quelle esposte dalla Società *Americana Thomson-Houston*. È una macchina di forma ordinaria, bipolare, con induttore a semplice ferro di cavallo, coi poli in alto. Ma è a doppia eccitazione (*compound*); e ciò che la rende notevole è appunto il modo nel quale è collocata ed avvolta la spirale eccitatrice *in serie*, o come dicono i pratici: *il compound*.

Tale spirale non è avvolta sulle braccia cilindriche dell'elettromagnete di campo, sulle quali si hanno soltanto le spirali eccitatrici in derivazione; è invece collocata nella zona libera fra i lembi delle estremità polari, così che essa circonda propriamente l'armatura. La spirale è costituita da due parti uguali simmetricamente collocate l'una sul lembo di una ganascia polare e l'altra su quello dell'altra. Ciascuna spira ha due lati rettilinei correnti parallelamente all'asse dell'armatura l'uno al disopra e l'altro al disotto di questa, e due lati incurvati a semicerchio, i quali assecondano gli spigoli laterali dei blocchi polari, lasciando frammezzo libero lo spazio per le teste dell'armatura. Le spire sono legate in fascio con un nastro, e formano come due grossi cordoni orlanti i blocchi polari. Con tale disposizione l'inventore si è proposto di rendere meno variabile che nelle macchine ordinarie la posizione del piano d'inversione e per conseguenza anche la posizione delle spazzole. La posizione nella quale conviene collocare le spazzole dipende, come è noto, dalla intensità della corrente nell'armatura. La corrente che circola nella spirale indotta produce infatti nel nucleo una induzione magnetica parallela al piano d'inversione, la quale si compone con quella prodotta dall'induttore, e dà luogo ad una risultante inclinata, rispetto a quest'ultima, nel senso della rotazione. La deviazione così prodotta nella induzione magnetica è tanto più grande quanto più è intensa la corrente. Ora la spirale eccitatrice in serie (il *compound*), collocata com'è nella macchina del prof. Thomson, produce nel ferro dell'armatura una induzione magnetica di direzione fissa, orizzontale, la quale cresce anch'essa colla intensità della corrente e dà, composta con quella prodotta dalla corrente nell'armatura, una risultante di direzione approssimativamente costante. Tale è l'idea che ha guidato l'inventore, e qualunque sia il suo valore pratico sul quale è lecito discutere, è certamente una prova del talento inventivo del professore americano. In ogni caso la posizione nella quale il Thomson ha collocata la spirale in serie è quella più conveniente per collocarvi le spirali eccitatrici, e tutte le spirali magnetizzanti si dovrebbero collocare a quel modo, proprio sul meridiano

dell'armatura, se a ciò non si opponessero difficoltà di costruzione.

D'accanto alla macchina ora descritta la Società Thomson-Houston espone un'altra macchina a corrente continua, la quale ha esternamente la forma ben nota delle macchine che la medesima Ditta costruisce per l'illuminazione con archi in serie. Essa ha, come quest'ultima macchina, un indotto sferico; ma l'avvolgimento di esso è quello di Hefner-Alteneck, ed il collettore suo ha la forma ordinaria. Ed anche in tale macchina si osserva un *compound* disposto proprio attorno all'armatura come in quella sovradescritta.

11. La macchina del *Desroziers*, costrutta ed esposta dal Bréguet di Parigi, rappresenta una forma praticamente ben riuscita di macchina a disco.

Si dà questo nome, come è noto, alle macchine dinamo elettriche nelle quali le spirali indotte sono tutte approssimativamente in un piano perpendicolare all'asse di rotazione, e formano insieme ai pezzi di sostegno, che le rendono solidarie all'albero, un disco sottile, il quale ruota tra i poli contrarii, affacciati a piccola distanza, del sistema induttore. L'indotto così formato ordinariamente non contiene nuclei di ferro, e tuttavia l'interferro può essere piccolo in grazia della sottigliezza del disco. L'origine delle macchine di questa classe, che sono oramai numerose, si suole far risalire al disco rotante di Faraday, e ciò sta bene. Ma nel medesimo modo e con egual diritto si possono far risalire agli apparecchi del Faraday tutti gli apparecchi d'induzione che hanno oggidì applicazioni nella pratica. Se quindi si vuol parlare delle macchine effettive delle varie specie e delle loro particolarità, non hassi a risalire tant'alto; e se, nel caso speciale, si vuole designare un prototipo delle macchine a disco, questo deve essere una macchina ove le spirali elementari disposte sul disco son collegate con un collettore come nelle macchine ordinarie. Io faccio qui questa osservazione perchè mi preme notare che come prototipo delle macchine di cui stiamo parlando si può designare quella che il nostro Antonio Pacinotti ideava fin dal

1875, che poi costruiva in Cagliari coll'aiuto dell'officina Doglio e del meccanico G. Dessi nella primavera del 1878, e che presentava nella Esposizione internazionale di elettricità in Parigi nel 1881. Quella piccola macchina era bipolare. Il circuito magnetico vi era formato da due elettromagneti ad  $EE$  posti di rimpetto l'uno all'altro in un piano verticale, co' poli contrarii affacciati. I poli erano provvisti di espansioni piate, e nell'angusto spazio fra queste compreso rotava il disco. Le spirali elementari erano fatte in modo da abbracciare approssimativamente la metà della superficie del disco; avevano quindi approssimativamente la forma di un D. Esse erano collegate ad un collettore come le spirali di un'armatura ad anello od a tamburo. Il Pacinotti intuì i pregi che una macchina così fatta può presentare, tanto che più volte egli ritornò sulla sua idea, che considerò come pratica, prima che altri con mezzi più adeguati la traducessero in atto in forma industriale.

I pregi delle macchine a disco derivano essenzialmente dalla soppressione del ferro nell'indotto, e sono: la soppressione di un notevole peso morto nelle parti mobili; la soppressione pressochè completa della reazione dell'indotto sul circuito magnetico; la eliminazione della dissipazione di energia per la isteresi e per le correnti parassite, e per conseguenza anche quella delle cause anormali di riscaldamento dell'armatura; l'ottima ventilazione della spirale indotta e quindi la possibilità di elevare in questa la densità della corrente assai più che nelle altre macchine.

La forma a disco dell'indotto rende però meno opportuno l'impiego di un induttore bipolare come quello che adoperò il Pacinotti; molto più conveniente è l'impiego di un induttore multipolare. E multipolari sono tutte le macchine a disco che comparvero in questi ultimi anni e che incontrarono qualche favore nella pratica, come son quelle universalmente note di *Jehl e Rupp* e di *Fritsche*. Multipolare è anche la macchina di *Desroziers*.

L'induttore è costituito da due corone di elettromagneti a poli alternati cogli assi orizzontali e paralleli all'albero; esso è identico a quelli delle macchine a corrente alternante di

Siemens, di Ferranti, di Kapp, e simili. L'indotto, che ha la forma di un disco sottile, gira nello stretto spazio compreso fra le due corone dei poli induttori. La spirale che esso porta è formata di tratti rettilinei radiali alternati con tratti curvilinei foggianti come evolventi di circolo. I tratti radiali rappresentano la parte utile della spirale, sono cioè quelli che, quando il disco gira, tagliano le linee di forza; i tratti curvilinei servono invece come tratti d'unione e di collegamento, e congiungono alternativamente l'estremità esterna di un tratto utile con quella pure esterna di un altro, e la estremità interna di quest'ultimo con quella di un terzo tratto radiale. Detti  $p$  il numero delle coppie di poli presentati dall'induttore ed  $N$  il numero dei tratti utili (numero che si sceglie sempre pari), ciascun tratto utile è congiunto, per mezzo di un tratto d'unione, con il tratto utile che viene  $n^{\text{mo}}$  dopo di esso, ove  $n$  è un numero impari determinatò colla formola

$$\frac{N}{2} = n p \pm 1.$$

I tratti d'unione, alternativamente esterni ed interni, si seguono come i lati di un poligono stellato. In così fatto avvolgimento ciascun tratto radiale si trova collegato con due altri, l'uno che lo precede e l'altro che lo segue, i quali in ogni istante si trovano in campi magnetici opposti a quello che esso sta attraversando. Quando il disco gira, le forze elettromotrici che si producono in tutti gli  $\frac{N}{2}$  tratti radiali compresi in una metà della spirale si sommano, e tutte quelle che si producono negli  $\frac{N}{2}$  tratti radiali dell'altra metà, si sommano pure, ma sono opposte alle precedenti. Le due somme hanno valori uguali e segni contrarii, esse adunque nella intiera spirale si elidono. Le due metà della spirale si comportano adunque come le due metà della spirale Pacinotti e di quella di Hefner-Alteneck. Si può per conseguenza far uso di un collettore analogo a quello delle macchine ordinarie. La macchina di Desroziers ha effettivamente un tale collettore. Le due spazzole sono diametral-

mente opposte. Siccome però l'inversione della forza elettromotrice avviene, per ogni giro,  $2 p$  volte, così i segmenti del collettore sono in numero uguale a  $p$  volte il numero degli elementi della spirale; e ciascuno di essi è congiunto con  $p-1$  altri situati l'uno rimpetto all'altro alla distanza angolare  $\frac{2\pi}{p}$ .

Tutte le macchine Desroziers finora costrutte sono a 6 poli; quindi in esse i segmenti del collettore sono in numero triplo di quello degli elementi della spirale indotta, e sono collegati tre a tre. Ciascun segmento è collegato ai due che stanno da esso alla distanza angolare di 120 gradi.

Quello descritto è l'avvolgimento schematico. L'avvolgimento effettivo differisce da esso, e la differenza ha lo scopo di moltiplicare il numero di tratti utili ed accrescere con ciò la forza elettromotrice della macchina. Tale differenza consiste in ciò, che dopo aver disteso il primo tratto radiale, il primo tratto di raccordamento ed il secondo tratto radiale, si ritorna col filo al punto di partenza del primo tratto radiale e si distende accanto a questo un secondo tratto ad esso parallelo; con un tratto arcuato giustapposto al primo tratto di raccordamento si viene una seconda volta all'origine del secondo tratto radiale, poi si ritorna ancora al punto di partenza, e così si forma una spirale piatta avente la forma di un settore compreso tra due lati rettilinei radiali e due lati incurvati ad evolvente di cerchio. Fatta questa prima spirale, si passa col filo, seguendo un arco di evolvente, al terzo tratto radiale e si dà principio all'avvolgimento di una seconda spirale piatta uguale alla precedente. E così si procede fino alla fine. Per tal modo si può dare al filo indotto una lunghezza qualunque ed ottenere, con un prestabilito numero di spirali elementari, quella forza elettromotrice che si vuole.

Praticamente l'avvolgimento si fa sopra due dischi di cartone compresso, nel quale sono praticati buchi nei punti dove debbono trovarsi le estremità dei tratti radiali del filo indotto. I tratti radiali si distendono su una delle faccie del disco, ed i tratti curvilinei di collegamento si dispongono sull'altra faccia. Per tal modo si evitano gli incrociamenti e gli acca-

vallamenti del filo. Sull'uno dei dischi si dispongono la 1<sup>a</sup>, la 3<sup>a</sup>, la 5<sup>a</sup>, ecc. spirale elementare; sull'altro si dispongono la 2<sup>a</sup>, la 4<sup>a</sup>, la 6<sup>a</sup>, ecc. I due dischi vengono poi applicati con viti sulle due fascie di una stella di lamina sottile di argentana, che serve a collegarli all'albero ed a dare al sistema la necessaria rigidità. La stella di pakfong è intagliata in modo di sopprimere in essa le correnti di Foucault. La scelta dell'argentana, lega che ha una grande resistenza specifica, ha anch'essa lo scopo di ridurre viemmeglio le correnti parassite. I due dischi sono applicati contro la stella di sostegno colle faccie portanti i tratti radiali, cosicchè rimangono sulle faccie esterne del sistema i soli tratti curvilinei di raccordamento. Formato nella maniera descritta il disco, si taglia via da ciascuno dei due dischi di cartone la corona circolare compresa fra i due fasci, interno ed esterno, dei tratti curvilinei, in modo da mettere allo scoperto i tratti utili. E per tal modo si rende possibile ridurre l'interferro alla grossezza strettamente necessaria per dar passaggio ai tratti utili del filo indotto. Si ottiene inoltre il vantaggio di una perfetta ventilazione dell'armatura, ventilazione la quale rende possibile adoperare una intensità di corrente assai elevata. È questo un pregio dell'armatura a disco, il quale viene ad aggiungersi a quelli dianzi enumerati.

Un altro pregio prevedibile, che l'esperienza ha completamente confermato, consiste nella eliminazione quasi completa della cosiddetta reazione dell'indotto. Nelle macchine del Desroziers la reazione dell'indotto è così tenue, che se si tracciano le caratteristiche a circuito aperto ed a circuito chiuso e se si aggiunge a ciascuna ordinata di quest'ultima il prodotto dell'intensità della corrente di piena carica per la resistenza statica dell'indotto, si ottiene una curva, le cui ordinate, nelle vicinanze del *ginocchio* differiscono da quelle della caratteristica a circuito aperto solamente di 1 o di 1.5 per cento. È questo un risultato notevolissimo, se si pensa che la reazione dell'indotto, che si constata nelle ordinarie macchine ad anello ed a tamburo, raggiunge spesso il 10 e qualche volta, nelle macchine mal proporzionate, persino il 20 per 100.

Quasi tutte le macchine del descritto sistema finora costrutte sono macchine a piccola velocità angolare; il loro indotto fa da 200 a 350 giri al minuto. La maggior parte delle macchine finora costrutte ha trovato impiego nella illuminazione di piroscafi. Per tale applicazione ciascuna macchina dinamoelettrica è direttamente comandata, per mezzo di una piastra elastica di accoppiamento del sistema Raffard, da un motore a vapore appositamente studiato nelle officine *Breguet*. L'insieme costituisce un gruppo compatto ed acconcio al servizio a cui è destinato.

Le macchine *Desroziers* che lo stabilimento *Breguet* ha presentato alla Esposizione avevano potenze comprese tra 12 e 144 chilowatt. La più grande, quella di 144 chilowatt (circa 200 cavalli) aveva una velocità corrispondente a soli 200 giri al minuto. L'interferro era poco superiore a circa 2 cm. La costruzione loro è compatta e meccanicamente soddisfacente. I risultati delle esperienze sembrano accordarsi nel constatare la bontà del rendimento, e i confronti di essi con quelli relativi alle macchine ordinarie attesta la possibilità di ridurre notevolmente, col sistema a disco, il peso del rame e quello della macchina intiera. Noi non crediamo che tali vantaggi non sieno compensati dalla maggior complicazione della costruzione, ma non possiamo nemmeno non affermare che nella macchina del *Desroziers* si trovano riunite disposizioni ingegnosisime e veramente degne di essere notate.

#### *B) Macchine a corrente alternante.*

12. In confronto col grande numero delle macchine a corrente continua in mezzo alle quali noi abbiamo fatto or ora una rapida corsa, il numero delle macchine a corrente alternante presentate alla mostra di Parigi è stato scarsissimo. E ciò si spiega, se si pensa allo scarso impiego che in Francia hanno finora trovato le correnti alternative. Se si eccettuano le vecchie macchine alternative che il Gramme aveva costruito pel servizio delle candele Jablochkoff, macchine che si trovano ancora molto diffuse negli impianti di illuminazione

elettrica esistenti a Parigi, e che lavoravano in alcune delle stazioni centrali impiantate nella esposizione, e se si lasciano in disparte alcuni modelli che non presentavano nulla di buono, si può dire che le sole macchine alternanti che abbiano figurato nella esposizione e che meritino un cenno, sono: una macchina del *Ferranti*, alcune macchine di *Thomson-Houston* ed una di *Heisler*.

13. La macchina *Ferranti* figurava e funzionava nel padiglione della Società Anonima l'« *Eclairage électrique* » il quale serviva come stazione centrale per l'illuminazione di una parte dell'Esposizione.

Essa era la più grande macchina a corrente alternativa che esistesse nella Esposizione, e si presentava anche come un saggio di ottima costruzione; non offriva però nulla di nuovo. Come è noto la macchina *Ferranti* è a disco, con l'indotto mobile e l'induttore fisso. L'induttore, per la disposizione generale, è identico a quello delle notissime macchine alternative di Siemens. I nuclei degli elettro-magneti hanno sezione trapezia e sono sostenuti da corone circolari di ghisa. Nell'armatura il conduttore è una sottile striscia di rame avvolta su di un nucleo di bronzo insieme ad un nastro di fibra vulcanizzata di eguale larghezza. Per evitare le correnti parassite, il nucleo è suddiviso in molte striscie strette ed increspate, separate l'una dall'altra per mezzo di asbesto. Le spirali hanno forma ovale oblunga come quelle della macchina Siemens, sono disposte in corona e portate da un disco solidario all'albero. L'unione delle spirali al disco di sostegno non è fatta direttamente, ma bensì per mezzo di *porta spirali*. Ciascuno di questi porta due spirali e serve a congiungere le estremità interne delle medesime. I porta spirali sono isolati dal disco o mozzo centrale che li sostiene cosicchè v'ha nella armatura un duplice isolamento: l'isolamento delle spirali rispetto ai nuclei e l'isolamento di questi rispetto alla massa metallica della macchina. L'avvolgimento delle spirali è tale che la corrente passa attraverso l'indotto in due circuiti paralleli, per la quale disposizione i capi dell'indotto vengono a trovarsi alle

due estremità di un diametro. Le connessioni tra le spirali adiacenti si effettua automaticamente nell'atto stesso col quale si inserisce una spirale e la si ferma nella sua sede; per tal modo riesce impossibile che un operaio faccia, ricambiando qualche spirale, una falsa connessione.

Risulta da questa descrizione, come il Ferranti abbia rinunciato alla disposizione primitiva che formava una volta la parte caratteristica delle sue macchine, alla disposizione cioè nella quale l'indotto era formato non già da una serie di spirali messe in corona, ma da un unico nastro continuo avvolto secondo una linea ondulata. Così la sua macchina è diventata quasi identica all'antica e primitiva macchina di Siemens, dalla quale non differisce se non per semplici particolari costruttivi. La fattura però è ottima, ed i particolari ai quali abbiamo accennato hanno una grande importanza. La corrente eccitatrice per l'induttore è prodotta da una piccola macchina a corrente continua portata dalla stessa intelaiatura della macchina principale ed avente con questa l'albero comune.

14. Le macchine dinamo elettriche che la Società *Thomson-Honston* di Boston adopera nei suoi impianti per correnti alternative e che la Società stessa esponeva nella grande galleria delle macchine, hanno molta rassomiglianza con le *Stanley* della Società Americana *Westinghouse e C.* Sono macchine a tamburo, coll'induttore fisso e coll'indotto rotante. Il nucleo dell'indotto ha forma cilindrica ed è composto di sottili dischi di ferro come nelle ordinarie macchine a tamburo per correnti continue.

Le spirali indotte di forma piatta, strette e lunghe sono adagiate sulle superfici convesse del tamburo coi lati maggiori, che sono i lati utili, paralleli alle generatrici. Gli elettromagneti induttori sono disposti radialmente tutt'attorno all'armatura cilindrica e presentano a questa le loro estremità interne, le quali sono alternativamente estremità nord e sud. Le estremità esterne sono riunite da un grosso involuppo cilindrico di ferro fuso, che loro serve come giogo e che le sostiene. Questo involuppo a tamburo cilindrico è fissato sulla

piastra di base e costituisce la parte principale dell'intelaiatura della macchina.

Il nucleo dell'armatura ha un largo foro centrale ed è congiunto all'albero per mezzo di una stella colle braccia leggermente torte. Ciò produce una continua chiamata d'aria attraverso al vano centrale ed assicura così una buona ventilazione dell'indotto.

Le macchine del descritto tipo che figuravano a Parigi erano due, e differivano l'una dall'altra pel modo di eccitazione. La prima macchina era auto-eccitatrice. Serviva in essa come corrente eccitatrice la corrente indotta in una delle spirali della armatura. I due capi di tale spirale erano collegati coi segmenti alternati di un commutatore, partendo dal quale la corrente, raccolta con due spazzole, era condotta alle spirali magnetizzanti dell'induttore. In tale macchina si avevano dieci poli induttori e dieci spirali indotte. Queste erano fatte con filo a sezione quadrata e disposte in un unico strato. La velocità corrispondeva a 1500 giri per minuto, e quindi ad una frequenza uguale a 125. La corrente era di 20 ampere e la differenza di potenziali tra i poli 1500 volt. Il peso totale era di circa 1500 chilogrammi.

La seconda macchina invece ha una doppia eccitazione, lo scopo della quale è di far sì che la differenza dei potenziali ai poli aumenti quando aumenta l'intensità della corrente totale. Questo risultato è ottenuto eccitando l'induttore in parte con una corrente prodotta da una macchina ausiliaria a corrente continua ed in parte con l'intera corrente principale orientata per mezzo di un commutatore. Gli elettromagneti dell'induttore sono in numero di dieci come nella macchina precedente. Di essi otto sono eccitati dalla corrente continua prodotta dalla eccitatrice separata gli altri due sono invece eccitati dalla intera corrente prodotta dalla macchina principale, corrente che, opportunamente orientata, viene mandata nelle loro spirali. A quest'uopo alla corrente alternativa prodotta nell'armatura dalla grande macchina si fa percorrere il seguente cammino: da uno dei capi dell'armatura al primo anello del collettore e da questo al circuito esterno, dal cir-

cuito esterno al secondo anello del collettore, dal quale la corrente passa a cinque segmenti alternati di un commutatore di dieci sezioni; da una delle spazzole del commutatore alle due spirali magnetizzanti, che sono collegate in serie, poi all'altra spazzola del commutatore, e finalmente, per mezzo di un conduttore partente dagli altri cinque segmenti alternati del commutatore, all'altro capo dell'armatura. Con tale disposizione si può ottenere questo risultato: che quando cresce il numero delle lampade alimentate e crescono con esso l'intensità della corrente totale e la caduta di potenziale nei reofori principali, cresce anche l'eccitazione delle due elettro-calamite ed aumenta con questa la forza elettromotrice indotta nell'armatura. Le cose si possono proporzionare e regolarsi in modo che la differenza di potenziali utilizzabile nei luoghi di consumo rimanga invariata nonostante l'accresciuto numero delle lampade. Per regolare l'autoeccitazione e far sì che si verifichi esattamente la voluta compensazione, serve una resistenza, regolabile a mano, messa in derivazione, o come *shunt*, parallelamente alle due spirali magnetizzanti. Tale resistenza, aggiustata una volta, non richiede ulteriore attenzione. La macchina descritta è proporzionata per dare nei luoghi di consumo una differenza di potenziali di 300 volt.

15. La macchina a corrente alternante di Carlo Heisler di S. Louis (America), è l'ultima della quale dobbiamo far cenno. Come principio, come disposizione, come costruzione, tale macchina non presenta nulla di veramente nuovo o di notevole; essa ha tuttavia una qualche importanza siccome quella che è costrutta e viene adoperata come parte di un sistema di illuminazione con lampade ad incandescenza in serie, il quale è stato, in America, accolto con qualche favore, e del quale noi dovremo far cenno in questa nostra relazione. Nella macchina di Heisler l'indotto è fisso e l'induttore gira nell'interno di esso. Sull'albero di quest'ultimo è fissata anche l'armatura della macchina eccitatrice, la quale è un anello alla Gramme rotante in un campo magnetico a quattro poli. Entrambe le macchine, la macchina principale a corrente alternante e la ec-

citatrice a corrente continua, sono racchiuse in un involucro cilindrico di lastra di ferro che dà all'insieme l'aspetto di un lungo tamburo. L'indotto della macchina principale, a corrente alternante, il quale, come si è già detto, è fisso, è un tamburo composto di piastrine di ferro ed è scomponibile in otto settori amovibili, i quali sono tenuti in posto da tiranti di bronzo fosforoso, paralleli all'asse, assicurati alle piastre terminali. Sul tamburo cilindrico così formato stanno avvolte le spirali indotte. L'avvolgimento è fatto alla maniera di Gramme, e propriamente come lo è nell'indotto, pure fisso, della macchina a corrente alternante dal Gramme costrutta per il sistema Jablochhoff. La sola differenza tra l'avvolgimento dell'indotto Heisler e quello dell'indotto Gramme sta in ciò, che mentre in quest'ultimo le spirali indotte sono ripartite in quattro circuiti distinti, nel primo invece esse sono ripartite solamente in due circuiti. Sonvi in tutto 32 spirali elementari, che, tutte insieme, coprono completamente tutta la superficie del tamburo. Di esse 16 sono in un circuito e 16 in un altro; le spirali di un circuito sono alternale con quelle dell'altro. L'induttore, che ruota nell'interno, ha 16 elettromagneti radiali presentanti sulle estremità esterne poli alternati. Le spirali in ciascun circuito sono adunque in numero eguale ai poli induttori, come nell'antica macchina di Gramme ora citata. Con questo artificio, di avvolgere sull'armatura un numero di spirali indotte doppio di quello dei magneti induttori e di porle in due circuiti separati si ottiene il vantaggio di poter coprire di spirali completamente tutta l'armatura, pur osservando per ciascun circuito indotto la nota regola, che per le macchine alternative è fondamentale, di coprire colle spirali indotte inserite in un medesimo circuito solamente una piccola parte del nucleo dell'armatura. Però l'esempio della macchina di Gramme sovracitata basta, anche senza ricordarne altri, a dimostrare che tale disposizione che Heisler presenta come nuova, è da lungo tempo nel dominio del pubblico.

La macchina eccitatrice a corrente continua, la quale, come si è detto, ha l'asse comune colla macchina principale, è eccitata in serie ed è a quattro poli. L'induttore di essa con-

siste in un anello circondante l'armatura, sul quale sono fissati quattro blocchi polari. Le porzioni dell'anello comprese fra tali blocchi sono coperte dalle spirali magnetizzanti. La corrente è raccolta da due spazzole appoggiate alla distanza di 90° l'una dall'altra su di un ordinario collettore. Dalle spazzole, per conduttori esterni essa passa ad altre spazzole appoggiate su due anelli comunicanti coi capi delle spirali magnetizzanti; tutte le spirali dell'induttore sono congiunte in serie.

In tutte le macchine di Heisler, qualunque sia la loro grandezza, ciascuno dei circuiti esterni trasmette 5 ampere. La differenza efficace dei potenziali ai poli varia da macchina a macchina e può salire fino a 3000 volt. La velocità varia da 600 ad 800 giri per minuto. La macchina esposta a Parigi, colla velocità normale di 640 giri dava 1750 volt con 5 ampere in ogni circuito.

## §. 2.

### I sistemi di distribuzione.

16. Più ancora che nella costruzione delle macchine dinamo-elettriche è stato grande il progresso che dalla prima esposizione di elettricità di Parigi a questi giorni si è fatto nella distribuzione delle correnti elettriche e nell'impianto delle grandi stazioni centrali. Nel 1881 il sistema di distribuzione per lampade ad incandescenza collegate in parallelo con due fili, che fin d'allora era stato da Edison studiato in tutte le sue parti e stava applicandosi su grande scala nell'America, non aveva ancora ricevuto in Europa alcuna grande applicazione; il sistema per lampade ad arco in serie del Brush, che permetteva di alimentare con una sola macchina 40 lampade di 10 ampere, cominciava appena ad essere ritenuto pratico; e i sistemi escogitati da Marcel Deprez per distribuzioni in derivazione con potenziali costanti e per distribuzioni in serie con correnti costanti, sistemi che dovevano utilizzare il concetto, appena abbozzato, della doppia eccitazione, erano allo

stato embrionale ed ancora molto lontani dalle condizioni di pratica applicabilità. Le idee poi sul modo di impiantare, di disporre e di governare una grande stazione centrale, sul modo di accoppiare più macchine dinamo elettriche su di una medesima rete di circuiti e sul modo di regolarne il funzionamento erano incerte tanto, che un concetto così semplice e rudimentale come è quello di accoppiare in batteria, in parallelo, più macchine con piccola resistenza d'armatura, eccitate in derivazione o con una macchina ausiliaria separata, concetto che pure nella esposizione era stato abbozzato dal Gravier, quasi non era stato apprezzato. Ed ora invece, dopo soli otto anni, non solo il sistema primitivo di Edison si è perfezionato coll'ingegnoso impiego dei *feeders*, non solo il raggio d'azione di esso si è notevolmente accresciuto mercè l'impiego dei tre fili, non solo il principio del sistema a tre fili, oramai divenuto generale, sta ricevendo un'ulteriore generalizzazione nei sistemi a cinque fili; non solo le stazioni centrali, che sono diventate numerose e colossali, sono sistematicamente ordinate e regolate con metodi assolutamente pratici e sicuri; non solo d'accanto al sistema in serie del Brush è venuto a prender posto l'ingegnoso ed ottimo sistema in serie per lampade ad arco della Società Thompson-Houston; non solo vanno applicandosi d'accanto ai sistemi in serie per archi voltaici, anche sistemi in serie per lampade ad incandescenza; ma una nuova classe di sistemi è venuto ad allargare enormemente il campo delle distribuzioni elettriche e ad accrescere notevolissimamente il raggio di azione di esse; la classe delle distribuzioni o trasmissioni indirette basate sull'uso dei trasformatori. Nella storia di questi nuovi modi di distribuzione, e, si può ben dire, nella storia dell'elettrotecnica, ha avuto una importanza eccezionale l'Esposizione del 1884 in Torino. Un uomo d'ingegno, Luciano Gaulard, fatta sua l'idea, non nuova, ma non ancora ben compresa, dei trasformatori a corrente alternativa, aveva saputo indovinarne l'importanza, e seguendola con una costanza, con una fede e con una operosità ammirabili, era riuscito a tradurla in atto con apparecchi, se non perfetti, atti a funzionare regolarmente come

congegni pratici, industriali. Il Gaulard presentava alla Esposizione di Torino i suoi generatori secondarii e riusciva con essi ad eseguirvi esperienze grandiose che richiamarono sul nuovo sistema l'attenzione dei tecnici e bastarono a dimostrare come l'elettrotecnica fosse oramai in possesso di un nuovo strumento fecondo di grandiose applicazioni. Dopo l'esperienza di Torino la costruzione e l'impiego dei trasformatori a correnti alternative si perfezionarono rapidissimamente, ed in pochi anni si videro sorgere nell'Europa continentale per opera della Casa Ganz di Budapest, nell'Inghilterra per opera del Ferranti, in America per opera della Società Westinghouse, impianti colossali ove coi trasformatori si utilizzano migliaia di cavalli dinamici. Fu così aperto all'elettrotecnica un campo nuovo ove si sono mietute e si mietono messi remuneratrici.

Cosa strana e deplorabile, dei frutti di questo nuovo campo di studi e di applicazioni l'Esposizione di Parigi ha presentato poco e nulla. La mostra di elettricità, che, come vedemmo, offriva un quadro così completo e grandioso della odierna condizione della industria della costruzione delle macchine generatrici delle correnti elettriche, nulla o quasi nulla conteneva di ciò che riguarda le macchine trasformatrici delle correnti medesime. Imperocchè nessuna importanza ha il fatto che la Società Thomson-Houston si servisse di alcuni trasformatori per illuminare una parte della sua mostra, e che di qualche trasformatore si servisse alcuna delle stazioni centrali serventi alla illuminazione di qualche parte della Esposizione, nè merita menzione un meschino esemplare di trasformatore Ziperowsky presentato, inoperoso, dalla Compagnia continentale Edison di Parigi.

Per compenso l'esposizione presentava nella bellissima stazione della Compagnia continentale Edison un ottimo modello di stazione centrale col sistema di distribuzione a tre fili, offriva nella mostra della Società Thomson-Houston un nuovo modo di applicazione per tale sistema, ed illustrava colle mostre della Società Americana di Edison, della Casa Thomson-Houston e di Heisler i nuovi sistemi di distribuzione per lampade ad incandescenza in serie, mercè i quali con impianti

economici si riesce ad allargare il raggio di azione della distribuzione pur evitando l'impiego dei trasformatori. Queste parti dell'Esposizione meritano un cenno.

17. La stazione centrale impiantata nella Esposizione dalla Compagnia Continentale Edison di Parigi, ha una importanza speciale, non solo per la bontà di alcune sue disposizioni e per la bellezza del suo insieme, ma anche, e più ancora, perchè offre un saggio di ciò che sono i migliori impianti attualmente eseguiti dalla Società Edison. Essa infatti non differisce dalla stazione centrale che la medesima compagnia ha nel *Palais Royal* nè da quella impiantata nella *Cité Bergère* per l'illuminazione di una parte dei *Boulevards*, se non per la grandezza di alcune delle macchine e per le condizioni imposte dai differenti locali.

Le caldaie, del tipo moltitubolare di Belleville, sono in numero di tre e possono produrre ciascuna 2600 chilogrammi di vapore all'ora. Le macchine a vapore, della fabbrica Wehyer e Richemond, sono verticali, a tripla espansione ed a condensazione. Fanno 160 giri al minuto, lavorano con una pressione iniziale del vapore di 10 chilogrammi per  $\text{cm}^2$ , consumano 7 chilogrammi di vapore per ora e per cavallo indicato. Sonvi quattro macchine di 150 cavalli ed una di 140. Le macchine dinamoeltriche sono tutte dei tipi attualmente costrutti dalla Compagnia Continentale, sono macchine coll'indotto Edison e coll'induttore a doppio circuito magnetico somigliante a quello delle macchine F di Siemens ed Halske. Esse sono in numero di otto. Due, comandate ciascuna da una delle macchine a vapore, hanno l'induttore con quattro colonne, sono calcolate per mille ampere, e dànno, nell'impianto che stiamo descrivendo, 800 ampere. Come tutte le macchine Edison, le macchine di cui parliamo sono regolate per una differenza di potenziali ai poli uguale a 110 volt. Esse dànno adunque 88 chilowatt e ciò con una velocità corrispondente a 350 giri al minuto. Il peso totale è di 11750 chilogrammi. Le sei altre macchine sono di modello più piccolo, ed hanno due sole colonne nell'induttore; sono comandate due a due dalle tre ri-

manenti macchine a vapore. Queste sei macchine minori sono calcolate per 500 ampere e nell'impianto attuale danno effettivamente 450 ampere con 110 volt, ossia 49,50 chilowatt; e ciò con una velocità corrispondente a 650 giri per minuto. Il loro peso è di 5675 chilogrammi.

Ciò che a noi interessa qui considerare è il sistema di distribuzione, e propriamente il collegamento delle macchine, l'apparecchio per regolarle e il commutatore generale che serve ad inserirle nei circuiti ed a variare a seconda del bisogno i collegamenti.

Il sistema di distribuzione è, come abbiamo già detto, quello *a tre fili*; e in che consista questo sistema è cosa nota. Le macchine dinamo elettriche attive formano due gruppi, che diremo A e B, in ciascuno dei quali le macchine sono collegate in parallelo. I due gruppi poi sono collegati l'uno coll'altro in serie: il polo positivo del gruppo B è collegato col negativo del gruppo A; rimangono liberi il polo positivo del gruppo A ed il polo negativo del gruppo B, i quali rappresentano rispettivamente il polo positivo ed il polo negativo del sistema. Se, come nel caso degli impianti Edison, le macchine producono individualmente una differenza di potenziali di 110 volt, si ha fra i due poli del sistema una differenza di potenziali di 220 volt. Dal polo positivo di A, che è il polo positivo del sistema, dal pezzo di unione del polo negativo di A col positivo di B e dal polo negativo di B, che è polo negativo del sistema, partono tre conduttori, che noi contrassegneremo coi numeri 1, 2 e 3. Le lampade sono anch'esse divise in due gruppi che noi diremo ancora A e B; quelle del gruppo A sono messe in derivazione tra i conduttori 1 e 2; quelle del gruppo B sono messe in derivazione tra i conduttori 2 e 3. Si hanno così due sistemi in derivazione, il primo dei quali comprende le macchine A e le lampade A, ed il secondo le macchine B e le lampade B; ma questi due sistemi hanno comune un reoforo: il conduttore 2 che è reoforo negativo pel sistema A, è nel tempo stesso reoforo positivo pel sistema B. Se i due gruppi contengono un medesimo numero di lampade, o meglio se i due gruppi ricevono correnti di una medesima intensità

totale, il filo 2 comune ai due sistemi non prende dalle macchine, nè riconduce alle medesime alcuna corrente; su di esso non si hanno allora correnti se non in alcuni tratti compresi fra i punti di derivazione dei due gruppi, correnti di intensità uguale alla differenza tra quelle esistenti sulle derivazioni. Se poi i due gruppi contengono numeri diversi di lampade, o più in generale, se ricevono correnti di intensità totali diverse, il conduttore 2, comune ai due gruppi trasmette solamente la differenza delle due correnti; e se nel distribuire le derivazioni si ha cura di far sì che entrambi i gruppi richiedano normalmente correnti uguali o poco diverse, il conduttore intermedio può avere una assai piccola sezione. E se anche si vuole ammettere il caso estremo, che solo un gruppo funzioni, al conduttore 2 basta dare una sezione uguale a quella degli altri due. Così anche in questo caso, che è il caso peggiore, si risparmia uno dei quattro conduttori che occorrerebbero per alimentare un ugual numero di lampade col sistema semplice a due fili. Per tal modo si ottiene questo risultato, che pur essendo le singole derivazioni e le singole lampade indipendenti tra di loro, si duplica la differenza dei potenziali, e con ciò si estende notevolissimamente il raggio d'azione entro il quale la distribuzione, tenuto conto delle spese di impianto e di esercizio, può essere remuneratrice. Questo sistema, che è dovuto ad Edison, ha ormai ricevuto numerosissime applicazioni; quindi non solo il principio di esso, ma nemmeno le disposizioni generali della stazione centrale necessarie per metterlo in pratica non possono costituire una novità. Tuttavia la stazione centrale della Compagnia Continentale Edison di Parigi offre interessanti oggetti di osservazione e di studio. Ciò soprattutto per la ingegnosa disposizione e per la bellissima costruzione del grande commutatore generale e del quadro di distribuzione.

Il commutatore generale deve servire ad inserire una qualunque delle macchine dinamoelétriche, a piacimento, nel gruppo A oppure nel gruppo B; esso deve inoltre contenere gli organi di comando dei reostati regolatori dei campi magnetici delle singole macchine, riuniti in piccolo spazio, in

posizione comoda per le operazioni della inserzione, o della esclusione, o della commutazione delle macchine medesime. Il commutatore della Compagnia Continentale ha appunto il merito di ridurre al minimo lo spazio in cui tutti i manubrii dei commutatori e dei regolatori delle varie macchine dinamo-elettriche sono collocati. Ciò si è ottenuto collocando tutti i commutatori, tanto quelli per l'inserzione e per la commutazione delle macchine, quanto quelli dei reostati regolatori, l'uno accanto all'altro in tanti piani perpendicolari alla fronte dell'intero apparecchio. Tutti questi commutatori sono a disco, con pezzi metallici di contatto disposti, come settori di una corona circolare, sulla periferia. I manubrii, colla manovra dei quali si stabiliscono con quei pezzi i vari contatti, sporgono sul davanti, sulla fronte principale del sistema; e la distanza tra i piani verticali, perpendicolari alla fronte stessa, nei quali essi si trovano, è ridotta a quella strettamente necessaria per contenere la grossezza dei dischi e per dar spazio ai fili di unione. I commutatori per l'inserzione delle macchine sono in alto, a circa m. 1,50 dal suolo; quelli dei reostati regolatori sono in basso, all'altezza di un tavolo ordinario, e ciascuno di essi sta sotto al commutatore d'inserzione corrispondente alla medesima macchina. Il tutto è di costruzione metallica, ed è riunito da una intelaiatura di ghisa in un sistema semplice e compatto.

Il commutatore per l'inserzione di una macchina ha, come si è detto, la forma di un disco. Tale disco porta su una delle faccie, verso la periferia, cinque pezzi massicci di bronzo di forma arcuata, isolati. Due di questi pezzi, o settori, sono situati alle estremità del diametro orizzontale; e questi comunicano, per mezzo di due cordoni di rame, coi due poli della macchina dinamo-elettrica; per esempio il pezzo anteriore comunica col polo positivo ed il posteriore col polo negativo; noi potremo contrassegnarli coi nomi: settore + e settore —. Un terzo settore occupa tutta la parte inferiore del disco, ed è in comunicazione con una grossa asta di rame, di sezione rettangolare, la quale a sua volta è collegata col conduttore 2 della distribuzione, del quale essa rappresenta l'origine. Per

ricordare ciò noi denomineremo tale asta : conduttore 2. La parte superiore del disco porta finalmente due altri settori isolati, i quali, insieme allo spazio interposto per l'isolamento, occupano un arco di ampiezza uguale a quello occupato dal settore inferiore. Questi due settori isolati sono collegati a due aste di rame, correnti lungo tutto il sistema, identiche per forma e per grandezza a quella che abbiamo denominato conduttore 2, e collegate, l'una, l'anteriore col conduttore 1, l'altra, la posteriore, col conduttore 3. Noi potremo denominarle addirittura: conduttore 1 e conduttore 3; potremo poi contrassegnare coi medesimi numeri anche i settori del commutatore. Una alidada, manovrabile per mezzo di un manubrio isolato, è girevole attorno al centro del disco. Essa porta due settori di bronzo, diametralmente opposti, l'uno dall'altro isolati, che da molle a lamina sono costantemente premuti contro i settori del commutatore, sui quali scorrono quando si fa girare l'alidada. Quando il manubrio e la alidada sono in posizione orizzontale, i due settori scorrevoli stanno appoggiati sui settori + e —, senza toccare alcun altro settore e quindi senza stabilire alcuna comunicazione tra i poli della macchina ed i conduttori. La macchina è allora fuori di circuito. Quando l'alidada è inclinata in modo che il manubrio sia in alto, in una posizione fissata da un acconcio arresto, il settore mobile anteriore si appoggia sul settore + e sul settore 1, ed il settore mobile posteriore si appoggia sul settore — e sul settore 2; il polo positivo della macchina si trova quindi collegato col conduttore 1, ed il polo negativo col conduttore 2; la macchina è inserita nel gruppo A. Quando finalmente l'alidada è inclinata in senso inverso, in modo che il manubrio stia in basso, il settore scorrevole anteriore si appoggia sui settori fissi + e 2, mentre quello posteriore si appoggia sui settori fissi — e 3; quindi la macchina si trova collegata col polo positivo al conduttore 2 e col negativo al conduttore 3; la macchina è adunque inserita nel gruppo B.

Quando il manubrio è nella posizione orizzontale, corrispondente alla macchina fuori circuito, esso è trattenuto in tale posizione da un bocciuolo di arresto, e non può essere spo-

stato nè verso l'alto nè verso il basso se prima quel bocciuolo non è stato girato. Ciò obbliga l'operatore che sta per inserire la macchina in circuito, a fare una manovra che ferma la sua attenzione ed impedisce che egli inserisca la macchina prima di averla eccitata.

I commutatori dei reostati regolatori dei campi magnetici sono anche essi a disco ed alidada. Essi si possono manovrare uno ad uno per mezzo di un proprio manubrio, oppure tutti insieme per mezzo di una trasmissione comune. I manubrii per la manovra dei singoli regolatori ed i volantini per la manovra simultanea di tutti sono collocati in posizione comodissima. Per evitare qualunque pericolo di inversione dei poli, la corrente di eccitazione è presa sui 220 volt.

Fra le sbarre di distribuzione sono collocati due voltometri a grandi divisioni. Un voltmetro differenziale collocato sul quadro generale serve alle operazioni dell'inserzione delle macchine in circuito. Quando si deve far tale operazione, uno dei fili del voltmetro differenziale viene messo in derivazione tra le sbarre di distribuzione alle quali fa capo il circuito in cui la macchina dev'essere inserita, e l'altro filo del voltmetro viene riunito coi suoi capi ai due poli della macchina che si vuole inserire. Si fa allora variare l'eccitazione della macchina fino a tanto che l'indice del voltmetro differenziale rimanga sensibilmente allo zero. Quando ciò è ottenuto, la macchina viene messa in circuito. Sui circuiti parziali delle singole macchine sonvi gli amperometri, dietro alle indicazioni dei quali si hanno a regolare i campi magnetici per dividere equabilmente su le macchine funzionanti in un medesimo gruppo la corrente totale.

Colle sbarre di distribuzione del commutatore generale comunicano altre sbarre, anch'esse di rame con sezione rettangolare, poste orizzontalmente su di un quadro di distribuzione che sta di fianco al grande commutatore. Su queste ultime sbarre sono fatte le prese pei varii circuiti. Su ciascuna presa di corrente si trova un commutatore a catenaccio, un amperometro ed una lastra fusibile.

18 Quello, che abbiamo descritto, è un saggio di applicazione del sistema a tre fili nella sua forma primitiva ed ordinaria. Un altro modo di applicare il medesimo sistema è stato illustrato in una parte della mostra dalla *Thomson-Houston International Electric Company*. È un modo di applicazione, pel quale il prof. Elihu Thomson ha una privativa. Da esso non differisce sostanzialmente quello che, con altri particolari, e generalizzato per un sistema di distribuzione a cinque fili, è ora in istudio nello stabilimento Siemens ed Halske di Berlino. Mentre nel sistema a tre fili ordinario si hanno due macchine generatrici o due batterie di macchine riunite in serie, ed i tre conduttori partono dai poli liberi esterni e dal punto di congiunzione delle due macchine o dei due gruppi di macchine, nel sistema del prof. Elihu Thomson, invece, si adopera una sola macchina generatrice od una sola batteria di macchine generatrici, avente da sè sola la forza elettromotrice necessaria per mantenere fra i due poli la differenza di potenziali che si vuole fra i fili 1 e 3, 220 volt per esempio. I conduttori 1 e 3 della rete a tre fili partono dai due poli dell'unica generatrice; il conduttore 2, invece, ossia il filo intermedio, non è con tale macchina direttamente collegato. Finchè nei due gruppi (nel gruppo A derivato dai fili 1 e 2, e nel gruppo B derivato dai fili 2 e 3) sta acceso un egual numero di lampade, il filo 2, intermedio, non ha altro ufficio che quello di collegare tra di loro in serie i due gruppi di lampade; esso non ha da condurre alcuna corrente e non ha bisogno di essere collegato con alcuna generatrice. Quindi il sistema funziona, in tale caso, come nella disposizione ordinaria. Ma non appena il numero delle lampade accese in uno dei gruppi risulti diverso da quello delle lampade attive dell'altro gruppo, anche le intensità totali delle correnti nei due gruppi debbono essere diverse, se si vuole che le lampade dei due gruppi seguitino a funzionare con uguali differenze di potenziali; ed il conduttore intermedio deve poter portare la differenza delle due intensità; se ciò non potesse aver luogo, si produrrebbe una differenza fra la caduta di potenziali esistente tra i fili 1 e 2 e quella esistente tra i fili 2

e 3: la caduta di potenziale diventerebbe maggiore pel gruppo ove le lampade accese sono in minor numero, e minore per quello ove le lampade accese sono in numero maggiore. Per impedire che tale ineguaglianza si produca, e fare sì che comunque variino i numeri delle lampade accese nei due gruppi, sempre la caduta di potenziali disponibile tra i fili 1 e 2 uguagli quella disponibile tra i fili 2 e 3; il professore Elihu Thomson collega, nella stazione centrale, i tre conduttori con una speciale macchina dinamoelettrica ausiliaria alla quale dà il nome di *ugualizzatore*.

L'ugualizzatore è una macchina dinamoelettrica eccitata per mezzo di una derivazione presa sui conduttori estremi, cioè sui fili 1 e 3. L'armatura di questa macchina porta due spirali indotte identiche; e ciascuna di queste spirali ha un proprio collettore. La spazzola positiva del primo collettore è collegata col conduttore 1, la negativa col conduttore 2; la spazzola positiva del secondo collettore è collegata anch'essa col conduttore 2, e la negativa è congiunta col conduttore 3. Per tal modo una delle spirali dell'armatura, che noi diremo: spirale A, si trova inserita fra i fili 1 e 2 ai quali sono collegate le lampade del gruppo A; e l'altra, che noi diremo: spirale B, si trova inserita fra i fili 2 e 3 che servono alle lampade del gruppo B. Quando le lampade accese sono in ugual numero nei due gruppi, nessuna corrente si ha sul filo 2, le due spirali dell'armatura si trovano percorse da una medesima corrente, e su di essa il campo magnetico della macchina produce coppie di rotazione cospiranti ed uguali. L'armatura si mette adunque in moto e la sua velocità diventa costante quando la somma delle forze elettromotrici che si producono nelle due spirali e della piccola caduta di potenziali dovuta alla resistenza propria delle spirali medesime uguaglia la differenza di potenziali tra i fili 1 e 3. La macchina funziona allora come un motore il quale è attivato da una debolissima corrente derivata tra i fili 1 e 3, e gira a vuoto. E siccome le due spirali dell'armatura sono perfettamente identiche e girano in un medesimo campo magnetico, così le differenze di potenziali fra le estremità di esse sono esattamente uguali.

Sono adunque anche uguali le differenze di potenziali tra i conduttori con esse collegati. Così stando le cose, si supponga ora che tutto d'un tratto vengano spente alcune lampade in uno dei gruppi, per esempio nel gruppo B. La prima conseguenza di tale fatto è che la caduta di potenziali tra i conduttori 2 e 3 aumenta alquanto, mentre quella fra i conduttori 1 e 2 diminuisce; la intensità della corrente nella spirale B dell'ugualizzatore inserita tra 2 e 3 aumenta; quella nella spirale A inserita tra 1 e 2 diminuisce, e se la resistenza propria di tale spirale è piccola, presto si annulla e poi si inverte; il lavoro esercitato dal campo magnetico sulla prima spirale aumenta; quello sulla seconda spirale diminuisce, o si annulla, o cambia di segno. Mentre adunque la spirale B, la quale seguita a funzionare come quella dell'armatura di un motore elettrico, sviluppa un lavoro meccanico maggiore di quello ch'essa dava da prima, l'altra spirale, quella A, dà minor lavoro, o non ne dà affatto, oppure ne consuma e funziona come l'indotto di una macchina dinamoelettrica generatrice. Se si fanno molto piccole le resistenze ohmiche delle due spirali, l'ultimo caso si verifica anche per minime variazioni nel numero delle lampade. E allora mentre la spirale B utilizzando l'eccesso della corrente del gruppo A su quella del gruppo B, produce un lavoro meccanico, la spirale A utilizza tale lavoro per produrre corrente in favore del gruppo A. Se le spirali dell'armatura non presentassero veruna resistenza, l'apparecchio manterrebbe tra i fili 1 e 2 e tra i fili 2 e 3 differenze di potenziali assolutamente uguali ed invariabili, e se fosse possibile pure che nessuna resistenza meccanica si opponesse al movimento dell'armatura, l'ugualizzatore funzionerebbe senza alcun consumo d'energia.

Ma siccome non è possibile ridurre a zero nè la resistenza elettrica delle spirali, nè la resistenza d'attrito, così accadrà che l'ugualizzazione ottenibile coll'apparecchio non sarà nè assolutamente perfetta nè gratuita.

19. Possiamo facilmente vedere da quali elementi dipendano l'esattezza ed il costo della ugualizzazione ottenibile.

Supponiamo a quest'uopo che le due spirali dell'armatura siano esattamente uguali l'una all'altra, come il costruttore deve mirare a farle, e rappresentiamo con  $r$  la resistenza elettrica di ciascuna. Ammettiamo poi, come, fra i limiti pratici delle velocità possiamo ammettere con grandissima esattezza, che la forza elettromotrice d'induzione prodotta in ciascuna spirale sia proporzionale al numero  $n$  di giri fatti dall'armatura in ogni minuto secondo; rappresentiamola perciò con  $ne$ . Ammettiamo similmente che tra i limiti pratici della velocità il lavoro consumato in  $1''$  dalle resistenze meccaniche passive sia anch'esso proporzionale ad  $n$  e rappresentiamolo con  $nL$ . Se allora noi rappresentiamo con  $v$  la differenza di potenziali tra i fili 1 e 3, con  $v'$  quella tra i fili 1 e 2 e con  $v''$  quella tra i fili 2 e 3; se con  $i'$  rappresentiamo l'intensità della corrente nel filo 2, e la consideriamo come positiva quando essa è diretta verso l'ugualizzatore; se finalmente rappresentiamo con  $i'$  ed  $i''$  le intensità delle correnti nelle due spirali dell'armatura e le prendiamo come positive quando esse vanno rispettivamente da 1 a 2 e da 2 a 3; abbiamo le cinque equazioni:

$$v' - ne = ri', \quad (1)$$

$$v'' - ne = ri'', \quad (2)$$

$$v'i' + v''i'' = ri'^2 + ri''^2 + nL, \quad (3)$$

$$v' + v'' = v, \quad (4)$$

$$i'' - i' = I, \quad (5)$$

per mezzo delle quali, dati  $e$ ,  $L$ ,  $r$ ,  $v$ ,  $I$ , possiamo determinare  $v'$ ,  $v''$ ,  $i'$ ,  $i''$ ,  $n$ .

Dalle due prime ricaviamo per sottrazione, tenuto conto della (5):

$$v'' - v' = rI, \quad (a)$$

e combinando questa colla (4):

$$2v' = v - rI, \quad 2v'' = v + rI \quad (b)$$

Le (1) e (2) moltiplicate rispettivamente per  $i'$  e per  $i''$ , e poi sommate dànno :

$$v'i' + v''i'' = ri'^2 + ri''^2 + ne (i' + i'');$$

quindi la (3) si riduce a

$$ne (i' + i'') = nL,$$

e dà 
$$i' + i'' = \frac{L}{e}. \quad (c)$$

Questa poi e la (5) dànno :

$$2i' = \frac{L}{e} - I, \quad 2i'' = \frac{L}{e} + I. \quad (d)$$

Portando in (1) i valori (b) e (d), otteniamo finalmente

$$n = \frac{v}{2e} - \frac{rL}{2e^2}. \quad (f)$$

Queste semplici relazioni comprendono tutta la teoria dell'ugualizzatore. Esse pongono in chiaro i fatti seguenti :

Data la differenza di potenziale  $v$  tra i fili 1 e 3, e supposto che questa sia mantenuta costante per mezzo del regolatore della macchina dinamoelettrica generatrice, le differenze di potenziali  $v'$  e  $v''$  tra i fili 1 e 2 e tra i fili 2 e 3 non dipendono da  $L$  nè da  $e$ ; non dipendono cioè nè dalle resistenze meccaniche che si hanno da vincere per far girare l'armatura, nè dalla intensità del campo magnetico in cui l'armatura è collocata, nè dall'avvolgimento delle spirali di questa. Esse dipendono unicamente da  $r$  e da  $I$ . Data  $I$ , ossia data la differenza tra le somme delle correnti attraversanti i due gruppi di lampade, esse dipendono unicamente dalla resistenza elettrica  $r$  delle spirali dell'armatura; la loro differenza  $v'' - v'$  è proporzionale ad  $r$ . Ciò vuol dire che l'esattezza colla quale

l'ugualizzatore adempie il suo ufficio, l'uffizio cioè di ripartire in parti uguali fra i due gruppi di lampade la caduta totale di potenziale disponibile, dipende unicamente dalla resistenza elettrica delle spirali dell'armatura, ed è tanto maggiore quanto più piccola è tale resistenza. Se la resistenza  $r$  potesse farsi uguale a zero, sarebbe esattamente, sempre:  $v' = v'' = \frac{v}{2}$ ; e l'ugualizzazione sarebbe perfetta. Per un dato valore della resistenza  $r$ , le formole (b) danno:

$$I = 2 \frac{v'' - \frac{v}{2}}{r} = 2 \frac{\frac{v}{2} - v'}{r},$$

e permettono di calcolare il valore di  $I$ , e ciò che val lo stesso, la differenza tra le correnti totali nei due gruppi, che si può ammettere senza che le differenze di potenziali subiscano variazioni  $v'' - \frac{v}{2}$  oppure  $\frac{v}{2} - v'$  superiori al limite compatibile con un regolare servizio di illuminazione.

Mentre  $v'$  e  $v''$  sono indipendenti da  $L$  e da  $e$ , e dipendono solamente da  $r$ , le intensità  $i'$  ed  $i''$ , invece (formole (d)) sono indipendenti da  $r$  e dipendono da  $L$  e da  $e$ . Il loro valore medio  $\frac{i' + i''}{2}$ , uguale, per la (c), ad  $\frac{I}{2e}$ , è anche indipendente da  $I$ ; la loro differenza dal medio è uguale alla metà della corrente  $I$  del filo 2, la quale si divide in due correnti uguali percorrenti in sensi opposti le due spirali dell'armatura. Nel caso ideale di  $L = 0$ , ossia di un ugualizzatore non presentante alcuna, anche minima, resistenza di attrito, le (d) darebbero  $i'' = -i' = \frac{I}{2}$ , ossia le due spirali si troverebbero percorse sempre da due correnti uguali ed opposte. Per un dato valore di  $L$  tale stato di cose si può verificare con tanto maggiore approssimazione quanto più si fa grande la forza elettromotrice  $e$ .

Finalmente la formola (f) fa vedere che il numero dei giri  $n$  fatti dall'armatura in ogni minuto secondo dipende bensì da  $v$ ,

da  $e$ , da  $L$  e da  $r$ , ma è indipendente da  $I$ . Ciò vuol dire che data la costruzione dell'ugualizzatore, e data la differenza di potenziali  $v$  che la macchina dinamoelettrica generatrice principale mantiene costante tra i fili estremi 1 e 3, l'armatura dell'ugualizzatore assume una velocità determinata la quale si mantiene poi sempre costante, indipendentemente dalle variazioni che possono avvenire nel numero delle lampade nei due gruppi. Tale velocità non varia se non col variare di  $v$  e col variare dello stato di nettezza e di lubrificazione dei cuscinetti su cui gira l'armatura.

L'impiego dell'ugualizzatore dà luogo ad una perdita di energia. Per renderci conto di essa noi distingueremo la perdita di energia  $P$ , che si ha propriamente nell'ugualizzatore da quella,  $P'$ , che si ha sul circuito principale.

L'energia consumata propriamente nell'ugualizzatore si compone di quella convertita in calore nelle spirali e di quella impiegata a fare il lavoro  $nL$  necessario per vincere gli attriti. Detta  $\rho$  la resistenza della spirale magnetizzante degli elettromagneti di campo, l'intensità della corrente eccitatrice vale  $\frac{v}{\rho}$ ; e l'energia da essa trasformata in calore è  $\frac{v^2}{\rho}$ ; quindi l'energia consumata nell'ugualizzatore è :

$$P = \frac{v^2}{\rho} + ri'^2 + ri''^2 + nL.$$

Portando in questa espressione i valori ( $d$ ) di  $i'$  ed  $i''$ , ed eliminando  $n$  per mezzo della relazione ( $f$ ), la si trasforma nella

$$P = \frac{v^2}{\rho} + \frac{1}{2}rI^2 + v \frac{L}{2e}.$$

Si può notare che  $\frac{v}{2e}$  è il numero di giri che bisognerebbe far compiere in ogni minuto secondo all'armatura dell'ugua-

lizzatore per produrre, a circuito aperto, fra i capi di ciascuna delle due spirali, una differenza di potenziale uguale a  $\frac{v}{2}$ , ossia tra i morsetti estremi una differenza  $v$ . Detto  $\nu$  questo numero di giri, possiamo scrivere :

$$P = \frac{v^2}{\rho} + \frac{1}{2} r l^2 + \nu L \quad (g)$$

I tre termini di questa espressione contengono, separate, rispettivamente: la resistenza elettrica  $\rho$  delle spirali eccitrici del campo magnetico, la resistenza elettrica  $r$  delle spirali dell'armatura, ed il lavoro  $L$  che definisce le resistenze meccaniche; la formola adunque mostra chiaramente come ciascuno di questi elementi concorra nel produrre il consumo  $P$  di energia. È da notarsi che la spesa di energia dovuta ad  $L$ , ossia alle resistenze passive, è uguale al lavoro che bisognerebbe spendere per far girare l'armatura quando tenendola in circuito aperto, ossia tenendo le spazzole isolate dai circuiti esterni, si volesse produrre e mantenere tra le estremità delle spirali rotanti riunite in serie una differenza di potenziali uguale a  $v$ . Non tutto questo lavoro va speso nel vincere gli attriti, nè tutto si trasforma in calore sui cuscinetti, o negli altri pezzi dell'apparecchio ove succedono sfregamenti od urti; una parte di esso è spesa per produrre la corrente  $\frac{L}{2e}$  necessaria per produrre la coppia di rotazione, e questa parte si ritrova trasformata in calore nelle spirali dell'armatura. La parte che viene direttamente trasformata in calore dagli attriti e dagli urti è  $\nu L$ ; quella che si trasforma in energia elettrica e che si trasforma in calore nelle spirali dell'armatura è  $\frac{rL^2}{2e^2}$ ; la loro somma è appunto, come mostra l'equazione (f), uguale a  $\nu L$ .

Quella che abbiamo calcolato, e che abbiamo rappresentato con  $P$ , è l'energia consumata propriamente nell'apparecchio ugualizzatore. Essa però non è la sola a cui l'impiego del-

l'apparecchio dia luogo. Tale impiego infatti obbliga a mantenere nel circuito principale una corrente d'intensità maggiore di quella utilizzata nei circuiti. Dette  $J$ ,  $I_1$ ,  $I_3$  le intensità delle correnti nel circuito principale, nel conduttore 1 e nel conduttore 3, si ha

$$J = I_1 + \frac{v}{\rho} + i', \quad J = I_3 + \frac{v}{\rho} + i''.$$

e quindi per la relazione (c):

$$J = \frac{I_1 + I_3}{2} + \frac{v}{\rho} + \frac{L}{2e}.$$

Egli è in base a questa intensità  $J$  che hassi a calcolare il lavoro consumato nel circuito principale. Detta  $R$  la resistenza di tale circuito, ossia la resistenza della generatrice e dei due reofori che collegano questa coll'ugualizzatore, l'energia trasformata in calore è

$$RJ^2,$$

mentre quella che si trasformerebbe in calore, qualora non si facesse uso dell'ugualizzatore, sarebbe

$$R \left( \frac{I_1 + I_3}{2} \right)^2;$$

e con ciò si ha un'idea della perdita di cui l'ugualizzatore è causa. Si può osservare che l'eccesso di  $J$  su  $\frac{I_1 + I_3}{2}$ , e quindi il maggior consumo di energia, del quale stiamo discorrendo, dipendono unicamente da  $\rho$  e da  $\frac{L}{e}$ ; non da  $r$ , nè da  $I_1 - I_3$ .

La differenza di potenziali, che devesi mantenere tra i poli della generatrice è

$$V = v - R_1 J,$$

ove con  $R_1$  si rappresenti la resistenza dei reofori congiungenti la generatrice coll'ugualizzatore. Anche questa è indipendente da  $I_1 - I_3$  ossia dalla ripartizione delle lampade tra i due gruppi e dalla resistenza  $r$  delle spirali dell'armatura dell'ugualizzatore; dipende oltrechè dal numero totale delle lampade, da  $\rho$  e da  $\frac{L}{e}$ .

20. Le precedenti considerazioni mettono in chiaro il modo di funzionare dell'ugualizzatore, dànno un'idea dell'ordine di grandezza delle oscillazioni di potenziali che l'apparecchio concede, e somministrano criterii per valutare le spese di energia a cui l'impiego di esso conduce. Per la sicurezza, per la regolarità del funzionamento, per la facilità del governo, il sistema di distribuzione a tre fili coll'ugualizzatore è evidentemente meno buono di quello primitivo di Edison; e se si tratta di collocare l'ugualizzatore presso alla macchina generatrice, nella stazione centrale, esso non è certamente raccomandabile. Esso non dispensa dall'impiego di due macchine, e non semplifica nulla. Tuttavia l'idea ingegnosa che gli serve di base, può ricevere utili applicazioni. Un vantaggio importantissimo del sistema sta nel fatto che l'ugualizzatore può essere collocato, occorrendo, lontano dalla stazione centrale ove sta la macchina generatrice, in una stazione secondaria. Per tal modo si possono con un'unica stazione centrale, per mezzo di una rete principale, o primaria, a due fili, alimentare parecchie stazioni secondarie munite di ugualizzatori, ciascuna delle quali sia centro di una rete a tre fili. E non v'ha dubbio che in parecchi casi si possono fare con questo artificio distribuzioni su larghe superficie ed a grandi distanze con un notevole risparmio di spesa. Tale disposizione è analoga, e corrisponde nella sostanza, a quella che si potrebbe fare per mezzo di trasformatori a corrente continua, ma è certamente più semplice nell'impianto e più comoda nell'esercizio. All'ugualizzatore si possono evidentemente sostituire in ciascuna stazione secondaria, due serie di accumulatori riunite tra di loro in serie,

alimentate in serie dai due reofori primarii, ed alimentanti nella rete secondaria un sistema a tre fili.

Ciascuna batteria terrebbe il posto di una delle spirali dell'armatura dell'ugualizzatore. Meglio ancora gli accumulatori potrebbero disporsi in parallelo coll'ugualizzatore, in modo da servire come riserva.

Il principio dell'ugualizzatore può facilmente essere generalizzato. Invece di una armatura con due sole spirali, si possono adoperare più armature con più spirali; e si può così comporre un apparecchio che serva ad ugualizzare le differenze di potenziali in un sistema di distribuzione a quattro, a cinque ed a più fili.

Appunto una tale idea è attualmente coltivata e praticata dalla Casa Siemens e Halske di Berlino, la quale l'ha posta a base di progetti per distribuzioni con cinque fili. Uno di questi progetti, assai grandioso, è quello che la Casa Siemens e Halske presentava recentemente per l'illuminazione elettrica della città di Francoforte sul Meno. Tale progetto comprendeva una stazione centrale principale ed un certo numero di stazioni secondarie. La stazione principale doveva contenere le macchine dinamo elettriche a corrente continua destinate ad essere raggruppate in parallelo e ad alimentare con una costante differenza di potenziali di 440 volt un sistema di conduttori principali. Le stazioni secondarie dovevano essere centri di altrettante distribuzioni a cinque fili. Ciascuna di esse, doveva a quest'uopo contenere un egualizzatore; e questo era costituito da quattro macchine dinamo elettriche identiche aventi l'albero comune. Le quattro spirali delle armature, per mezzo delle relative spazzole erano riunite tra di loro in serie; coi due capi della serie erano collegati i conduttori primarii provenienti dalla stazione centrale principale; coi due capi medesimi e inoltre coi punti d'unione intermedi, tra le quattro armature erano collegati i cinque fili della rete parziale. Per tal modo la totale differenza di potenziali mantenuta sui reofori d'alimentazione dalle macchine della stazione centrale sarebbe stata divisa fra i cinque fili di ciascuna rete secondaria in quattro parti uguali. Ciascuna rete avrebbe alimentato

quattro gruppi di lampade, ciascuno con una differenza di potenziali uguale a 100 volt. Al posto degli ugualizzatori dinamoelettrici la Casa Siemens ed Halske proponeva pure di adoperare, se ciò si fosse preferito, ugualizzatori idroelettrici formati con quattro serie di accumulatori disposti in serie. Od anche essa proponeva di adoperare ad un tempo l'ugualizzatore dinamoelettrico e l'idroelettrico messi di fianco l'uno all'altro in modo che l'uno potesse all'altro servire come riserva.

L'idea di tale sistema non è nuova, ma solo adesso essa si presenta in forma pratica e con progetti chiari e completi. E siccome essa offre un nuovo modo di allargare il campo delle distribuzioni di energia elettrica, così la parte della esposizione di Thomson-Houston che serviva ad illustrarla aveva nella mostra mondiale di Parigi una speciale importanza.

21. Un altro sistema di distribuzione che ha fin d'ora numerose e grandi applicazioni è quello per *gruppi di lampade ad incandescenza in serie*. Esempi di tale distribuzione e parti del macchinario per essa necessario erano presentati nella esposizione di Parigi dalla Società Americana Edison, dalla Società Thompson-Houston e da quel C. Heisler di S. Louis (America) del quale abbiamo più sopra descritto la macchina dinamoelettrica.

Edison fu notoriamente il primo ad attuare praticamente, su larga scala, tale sistema. Egli lo denomina: *Sistema municipale*, ed ha pel medesimo un macchinario completo. Le lampade ad incandescenza pel sistema municipale sono fatte per essere attivate con una corrente di 3 ampere, e con tale corrente presentano ai due morsetti una differenza di potenziali di circa 20 volt, se sono di 16 candele, e di circa 13 se sono di 10 candele. Le lampade di 16 candele sono disposte in tante serie di 60 lampade; quelle di 10 candele in tante serie di 90 lampade. Le serie poi sono tra di loro riunite in parallelo ed alimentate da una macchina dinamo elettrica sui poli della quale è mantenuta, colla necessaria intensità di corrente, una differenza di potenziali di 1200 volt. Ecco uno specchio

de' varii modelli di macchine dinamo elettriche che la Società Edison impiega a quest'uso:

<i>Tipo</i>	X	A	B	C
Volt ai poli . . . . .	1200	1200	1200	1200
Ampere . . . . .	9	16	32	48
Chilowatt . . . . .	10,8	19,2	38,4	57,6
Massimo numero di circuiti da 3 ampere . . . . .	3	5	11	16
Numero delle sezioni del collettore	94	90	122	100
Velocità (N° di giri per 1'). . .	1600	1300	1000	700

La Società Thomson-Houston adopera anch'essa, in alcuni dei suoi impianti, sistemi di lampade ad incandescenza collegate in serie, e appunto con uno di questi sistemi essa illuminava la propria mostra nella galleria delle macchine.

Le lampade adoperate a quest'uso sono, come quelle di Edison, fatte per tre ampere e per 20 a 25 volt. Esse sono munite, come è necessario, di disposizioni automatiche per chiudere un corto circuito quando per accidente si spezza il filamento di carbone. Le disposizioni adoperate sono varie; in tutte però la chiusura del corto circuito ha luogo per effetto del notevole aumento della differenza di potenziali, che si produce fra i due morsetti della lampada quando si rompe il filamento di carbone. E l'artificio che serve a tale effetto è il seguente. La corrente che va alla lampada e quella che viene dalla medesima passano per due lamine metalliche vicine, facenti parte del porta-lampade, le quali per la propria elasticità tendono a stare appoggiate fortemente l'una contro l'altra. Ma un pezzetto di carta sottile frapposto impedisce che le lamine si tocchino. Quando si rompe il filamento di carbone e si produce perciò fra le due lamine una differenza di potenziali grandissima, la carta viene attraversata da una scarica che la distrugge, le due lamine vengono a contatto e richiudono il circuito. Disposizioni ingegnose permettono di ricambiare, dopo l'accidente, il foglietto di carta e di rimettere con ciò l'apparecchio in istato di servizio. In alcuni tipi di lampade si ha, oltre all'apparecchio solito a foglietto di carta, anche quest'altra disposizione, che

serve come riserva pel caso che l'effetto dell'apparecchio accidentalmente mancasse. I due fili (di rame), ai quali sono attaccati i capi del filamento di carbone, sono incrociati e passano vicinissimi l'uno all'altro, senza toccarsi. Nel caso di una rottura del filamento si produce fra i due fili, là dove essi son più vicini, un arco voltaico, il quale, quando l'apparecchio a carta non funziona e la rottura del circuito perduri, produce una saldatura fra i due fili.

22. Il sistema di distribuzione del sig. *C. Heisler*, del quale ci rimane a parlare, è anch'esso un sistema per serie, ma è nel tempo stesso un sistema a correnti alternative. La macchina dinamo-elettrica in esso adoperata è quella che abbiamo già descritta: è una macchina con due spirali indotte, nelle quali si producono forze elettromotrici con una differenza di fase di un quarto di periodo. Le due spirali indotte sono inserite in due distinti circuiti.

L'intensità della corrente in ciascun circuito è di 5 ampere; la forza elettromotrice, variabile col numero delle lampade, può salire fino a 3000 volt. In ciascun circuito è inserita una serie di lampade ad incandescenza di 70 watt, ognuna delle quali produce una caduta di potenziali di 14 volt; in ciascun circuito se ne possono inserire fino a 212.

A mantenere nei circuiti una intensità di corrente costante serve un regolatore automatico, che è la parte più interessante di tutto il sistema. Tale regolatore fa due uffizi: 1° Uguaglia tra di loro le intensità delle correnti nei due circuiti; 2° fa sì che il valore comune delle due correnti sia sempre quello che conviene alle lampade, 5 ampere. Adempie il regolatore il primo ufficio inserendo nel circuito ove è minore il numero delle lampade una resistenza equivalente a quella delle lampade mancanti. Adempie il secondo ufficio spostando le spazzole della macchina eccitatrice in modo da far variare, a seconda del bisogno, la forza elettromotrice della macchina principale.

Col sistema di Heisler si può estendere il raggio d'azione di un impianto per illuminazione con correnti alternative nella misura istessa nella quale ciò si può fare col sistema ordinario

dei trasformatori. È poi facile vedere che l'economia del metallo nelle condutture, che la distribuzione Heisler permette di ottenere, è del medesimo ordine di quella ottenibile nei trasformatori. E siccome colla distribuzione in serie si risparmia la spesa di costruzione e d'impianto dei trasformatori, e si evitano le perdite di energia inerenti all'impiego di questi apparecchi, così si può spiegare come l'idea di un tale sistema possa essere sorta e possa avere trovato fautori ed imitatori. Ma è pure evidente che i citati vantaggi non hanno nella pratica una importanza pari a quella che può apparire in un esame superficiale, e che, ciò che più monta, essi sono largamente compensati da inconvenienti gravissimi. Ciò che si risparmia nell'impianto dei trasformatori è in parte compensato dalla maggior spesa occorrente nelle condutture, le quali debbono essere tutte isolate per alti potenziali, mentre negli impianti con trasformatori gli alti potenziali sono limitati alla rete primaria. Il risparmio della energia che i trasformatori consumerebbero per isteresi e per correnti di Foucault è anche esso più che compensato dal consumo dovuto alle resistenze introdotte nei circuiti per la regolazione. La regolarità del servizio, intieramente affidata ad un regolatore automatico, è certamente mal sicura. Finalmente gli enormi potenziali di 2000 e di 3000 volt, che si ammettono nei circuiti, anche nelle case degli utenti, offrono tali pericoli per le persone da rendere il sistema, presso di noi, assolutamente inaccettabile.

### § 3°

## Applicazioni speciali.

### I. Motori elettrici.

23. Descrivendo le macchine dinamo elettriche che hanno figurato nella Esposizione, abbiamo più volte avuto occasione di accennare all'impiego di esse alla trasmissione della energia meccanica a distanza. Così, per esempio, abbiamo notato che

la grande macchina a quattro poli della fabbrica di Oerlikon somministrava la corrente ad un'altra macchina del medesimo tipo e di dimensioni poco diverse, la quale funzionava come motore nella galleria delle macchine agrarie. Così pure descrivendo le macchine di Marcel Deprez abbiamo fatto cenno della destinazione speciale per la quale esse furono studiate, che è quella della trasmissione dell'energia meccanica a distanza, ed abbiamo notato come anche nella Esposizione alcune di esse servissero a tale ufficio. Ora possiamo aggiungere che l'impiego dei motori elettrici agli usi più svariati era illustrato con una numerosa schiera di apparecchi ingegnosi, come quelli dei ponti scorrevoli, quelli pe' magli, pe' verricelli, pegli argani, per le gru e quelli delle ferrovie elettriche. Ma che il problema della trasmissione elettrica del lavoro meccanico tra una generatrice ed una riceptrice a corrente continua sia ormai completamente risolto, hanno dimostrato, assai prima dell'Esposizione parigina, ed assai meglio di qualunque esposizione, i risultati ottenuti nella vera pratica industriale. Basti citare quelli trovati dal prof. H. F. Weber nelle sue classiche esperienze sull'impianto eseguito dalla Società delle officine di Oerlikon per la trasmissione dell'energia tra Kriegstetten e Soletta. E che l'energia trasmessa possa poi con appropriati apparecchi essere adoperata per servigi svariati come a muovere argani, o gru, o ponti scorrevoli, o magli, è questione di cinematica, che presenta per l'elettrotecnica un interesse secondario. Perciò si capisce come il fastoso apparato di trasmissione elettrica offerto dalla esposizione, comunque fosse grandioso, abbia tuttavia potuto non corrispondere completamente al desiderio ed all'aspettazione degli studiosi dell'elettrotecnica.

Per corrispondere a tale aspettazione la mostra delle trasmissioni elettriche avrebbe dovuto presentare d'accanto ai saggi delle disposizioni e delle applicazioni già note, anche qualche accenno ai problemi nuovi. Ora il problema nuovo, attuale, è, per ciò che concerne le applicazioni meccaniche dell'elettricità, quello della trasmissione dell'energia meccanica per mezzo delle correnti alternative; e l'Esposizione invece non

presentava nemmeno un motore a corrente alternante che potesse considerarsi come d'uso pratico industriale, e dal quale si potessero ricavare dati d'importanza veramente tecnica.

Ma se non vi erano nella Esposizione motori fin d'ora pratici, e costrutti con criteri e con scopi industriali; non mancavano tuttavia oggetti di studio aventi relazione colle applicazioni meccaniche delle correnti alternative, e, se non per le attuali pratiche applicazioni, certamente per l'avvenire, interessantissimi. Tali erano quelli offerti dalla mostra speciale degli apparecchi elettrici del prof. Elihu Thomson, la quale figurava nella sezione degli Stati Uniti d'America.

Il prof. Elihu Thomson presentava in quella mostra una numerosa serie di apparecchi, che avevano servito alle proprie ricerche.

E di questi debbono essere notati alcuni, i quali hanno servito a mettere in evidenza certe azioni meccaniche prodotte per mezzo delle correnti alternative. Tali apparecchi che erano fatti funzionare in presenza del pubblico, e che hanno anche dato materia ad una conferenza davanti al Congresso internazionale degli elettricisti, formavano una delle parti più osservate di tutta l'Esposizione; essi poi avevano coll'argomento, del quale ora stiamo discorrendo, una stretta relazione.

I fatti che gli apparecchi e gli esperimenti del Thomson dimostravano ed applicavano, erano già stati in gran parte descritti dal Thomson stesso nella adunanza annuale dell'Istituto Americano degli Ingegneri elettricisti tenuto in Nuova York nel giugno 1887, e poi, a più riprese, in varii articoli di giornali tecnici. Ma non mai come ora essi avevano chiamato su di sé l'attenzione de' pratici. Io debbo qui esporre i principali.

Se in presenza di una spirale percorsa da una corrente alternativa, si porta un conduttore nel quale quella produca correnti indotte, quel conduttore è respinto dalla spirale. La disposizione più semplice per dimostrare questo fatto consiste nel far passare una corrente alternante di grande intensità in una spirale cilindrica coll'asse verticale, e collocare al di sopra di essa, a breve distanza, in un piano orizzontale un anello di grosso filo di rame.

Si osserva allora che l'anello è sollecitato da una forza verticale, che tende a sollevarlo. L'effetto risulta potentissimamente accresciuto, se nella spirale si colloca un nucleo fatto con un fascio di fili di ferro. Allora, se l'anello di rame è fatto con una grossa verga e presenta una piccola resistenza, la ripulsione è così intensa da lanciare l'anello in alto non appena lo si abbandona. Per tenerlo in posto, o per spingerlo in basso, in modo che esso circonda la spirale, occorre un notevole sforzo; se si fa tale sforzo, e si impedisce così che esso ubbidisca alla ripulsione elettrodinamica della spirale, esso si scalda vivamente. Questo fatto è facile a spiegarsi. La corrente alternativa circolante nella spirale produce per induzione un'altra corrente alternativa nell'anello; le due correnti poi esercitano forze l'una sull'altra; si attraggono quando hanno il medesimo verso, si respingono quando hanno versi opposti. Ora è noto che la corrente indotta e l'induttrice, hanno l'una rispetto all'altra, una differenza di fase; ed è noto di più, che tale differenza di fase è prossima ad un quarto di periodo quando il conduttore indotto ha una grande resistenza metallica ed una piccola auto-induzione; cresce e tende verso un mezzo periodo quando si fa diminuire la resistenza metallica e si fa crescere la resistenza apparente di auto-induzione. Si hanno a considerare due casi limiti: quello di un anello indotto presentante una resistenza metallica infinita, e quello di un anello indotto di resistenza metallica assolutamente nulla.

Nel primo caso le due correnti avrebbero una differenza di fase di un quarto di periodo, esse adunque sarebbero alternativamente, e per intervalli di tempo tutti eguali, ora concordanti ed ora opposte; per intervalli di tempo uguali ed alternati esse si attrarrebbero e si respingerebbero; l'anello indotto riceverebbe impulsioni alternate verso il basso e verso l'alto, e rimarrebbe a riposo.

Nell'altro caso limite, invece, quando la resistenza ohmica o metallica potesse ridursi assolutamente a zero, la differenza di fase sarebbe esattamente di un mezzo periodo, il che vuol dire che in ogni istante la corrente indotta avrebbe direzione

opposta a quella della corrente induttrice, in ogni istante, sempre, l'anello sarebbe respinto dalla spirale. Praticamente il caso è sempre intermedio e quindi l'anello è alternativamente respinto ed attratto, ma gli intervalli di tempo durante i quali esso è respinto sono sempre maggiori di quelli durante i quali esso è attratto. Quindi gli impulsi ripulsivi superano gli attrattivi; e quindi la ripulsione osservata.

La ripulsione è tanto più intensa quanto più le condizioni dell'anello indotto si approssimano a quelle corrispondenti al secondo caso limite; quanto più, cioè, è piccola la resistenza metallica. Quindi la convenienza di adoperare, per fare l'anello, una grossa verga di rame.

Invece di un anello di rame si può adoperare un disco. Questo, posto orizzontalmente al di sopra dell'elettromagnete a corrente alternativa, ne è respinto. E invece di un anello o di un disco si possono adoperare conduttori di altre forme, a constatare che l'elettromagnete esercita forze ripulsive su tutte quelle parti di essi alle quali arrivano linee di forza. Il fatto diventa evidente, e tutte le sue modalità si possono facilmente prevedere, se si pensa al teorema generale dimostrato da Lippmann sull'induzione nei conduttori privi di resistenza. Tale teorema dice che se in un campo magnetico variabile si colloca un conduttore privo di resistenza, si generano in questo correnti indotte tali che il flusso di induzione complessivo passante dentro al conduttore rimane costante, indipendente dal tempo. Se il campo magnetico è prodotto con una corrente alternativa, così che in ogni suo punto l'intensità media sia nulla, il flusso d'induzione passante dentro al conduttore indotto rimane costantemente uguale a zero.

Il conduttore privo di resistenza elettrica si comporta adunque in questo caso come un corpo impermeabile alle linee di induzione. Le linee di induzione, che, qualora il conduttore non esistesse, passerebbero attraverso allo spazio da questo occupato, per effetto delle correnti indotte in esso risultano deviate così da evitarlo. Tali linee di forza prendono adunque direzioni divergenti o convergenti, parallele alla superficie del conduttore. Ma una nota legge di Faraday dice che le linee di forza

parallele si respingono mutuamente; dunque si ha la ripulsione che l'esperienza di Elihu Thomson ha constatato. Praticamente non è possibile sperimentare con conduttori privi assolutamente di resistenza; quindi alcune linee d'induzione attraversano il conduttore; ma molte linee di forza divergono nel modo detto e danno luogo alla ripulsione.

Se si presenta in questa forma la spiegazione del fenomeno, risulta facilmente prevedibile e chiaro un altro fatto che il prof. Thomson ha pure dimostrato co' suoi esperimenti. Se tra l'elettromagnete eccitato colla corrente alternativa ed il conduttore mobile si frappone un altro conduttore, per esempio un foglio di rame, il quale copra completamente il magnete, ogni ripulsione scompare. Egli è che la lastra conduttrice frapposta intercetta il flusso di forza e gli impedisce di arrivare al conduttore mobile; agisce come uno schermo, o, come ama esprimersi il prof. Thomson, proietta un'ombra su di esso.

Se la lastra conduttrice interposta fra l'elettromagnete ed il conduttore mobile viene collocata così che l'ombra da essa proiettata copra soltanto una parte del conduttore medesimo, sussistono le forze repulsive soltanto sulla parte non ombreggiata. Si può per tal modo produrre sul conduttore mobile una distribuzione di forze dissimmetrica, tale da dar luogo a momenti di rotazione. Vari esperimenti semplicissimi mettono questo fatto in evidenza. Si tenga per esempio al di sopra dell'elettromagnete una lamina di rame orizzontale, in modo che essa copra solo una parte dell'estremità polare del nucleo; sulla lastra si appoggi una sfera vuota pure di rame, così che essa sporga alquanto fuori del contorno della lastra; la parte sporgente, che non è ombreggiata, riceve la ripulsione, mentre la parte ombreggiata è schermata; quindi la ripulsione ha un momento rispetto al punto di appoggio della sfera, e produce in questa un moto di rotazione. Alla sfera si può sostituire una ruota; e alla lastra di rame ombreggiante si può sostituire una appendice metallica applicata direttamente sull'estremità polare del magnete; si può quindi modificare in mille modi l'esperimento ed ottenere con esso effetti di moto svariati.

Fra le varie forme che si possono dare all'esperimento, è notevole questa. Se il nucleo dell'elettromagnete è prolungato fuori dello spirale, e se sulla parte sporgente si avvolge un grosso filo di rame, che formi come una cerchiatura conduttrice, questa cerchiatura diventa sede di correnti indotte, le quali impediscono alle linee di induzione di seguire tutte il loro cammino nel ferro. Molte di queste divergono adunque, e si sparpagliano lateralmente. L'anello di rame fa adunque per le linee di induzione l'effetto di una *strozzatura*; e lateralmente si ha un campo magnetico oscillatorio nel quale portando corpi conduttori si possono produrre e variamente utilizzare le forze repulsive ed i movimenti, dei quali abbiamo parlato.

24. Basta questo rapido cenno per far capire come i fenomeni dimostrati da Elihu Thomson si possano utilizzare per produrre moti rotatori continui, e come si possano facilmente immaginare apparecchi, che, producendo regolarmente tali movimenti si possano considerare come veri motori elettrici. Ed effettivamente lo stesso prof. Thomson compose alcuni piccoli motori, e due di questi egli presentò pure alla Esposizione.

Il primo di essi, il più semplice, è composto nel modo seguente :

La parte mobile dell'apparecchio, l'*armatura* è costituita da un nucleo cilindrico formato con dischi sottili di ferro isolati, come quello di una ordinaria macchina dinamoelettrica d'Edison. Tale tamburo cilindrico è, come al solito, portato da un albero coassiale, perpendicolare ai piani dei dischi, il quale può girare su due cuscinetti. Sul tamburo di ferro sono avvolte tre spirali, o matasse, di filo di rame isolato, analoghe alle spirali elementari di un ordinario avvolgimento alla Siemens. I piani delle spire di ciascuna matassa fanno con quelli delle due altre angoli uguali a  $120^\circ$ . I capi delle tre spirali non sono però uniti insieme come nelle macchine a corrente continua di Siemens, ma sono semplicemente collegati a sei settori di bronzo isolati fra di loro e disposti come quelli di un ordinario collettore. Due coppie di spazzole, diametralmente opposte, si

appoggiano su tale collettore; ciascuna spazzola poi è permanentemente collegata colla spazzola diametralmente opposta per mezzo di un grosso e corto filo. Per tal modo ciascuna spirale si trova chiusa in corto circuito ogni qualvolta i segmenti sui quali termina sono in contatto colle spazzole, si trova invece aperta ogni qualvolta i segmenti non toccano le spazzole. Queste ultime sono collocate così, che ciascuna spirale si chiuda in corto circuito quando il piano delle sue spire oltrepassa, girando, la posizione orizzontale; si apra invece nell'istante nel quale il piano delle sue spire passa per la posizione verticale. Ciascuna spirale rimane adunque chiusa in corto circuito due volte per ogni giro, e precisamente per tutto il tempo durante il quale essa passa da una posizione orizzontale ad una verticale; rimane aperta per i due altri quarti di giro, cioè quando essa passa da una posizione verticale ad una orizzontale.

La parte fissa della macchina consiste in un anello fatto con dischi sottili di ferro isolati, il quale circonda l'armatura. Tale anello, la cui larghezza di petto, nel senso dell'asse, è uguale alla lunghezza dei tratti rettilinei dei fili dell'armatura, presenta sulla superficie cilindrica interna due profonde e larghe scanalature di sezione rettangolare, diametralmente opposte, nel piano orizzontale passante per l'asse. Dentro a queste scanalature sono adagiate le spire di due matasse di filo isolato; matasse che fuori dell'anello di ferro sulle due fronti di questo, sono ripiegate in modo da concedere il necessario spazio alle teste dell'armatura. Le due matasse poi sono collegate in serie e fanno capo ai due morsetti pei quali si manda alla macchina la corrente alternativa che deve metterla in moto.

Per fare agire l'apparecchio basta mandare nelle spirali fisse una corrente alternativa. Questa produce in quelle spirali dell'armatura, che sono chiuse in corto circuito, correnti che poi respinge. Le spirali chiuse in corto circuito si trovano adunque sollecitate da forze che tendono a portarle in un piano perpendicolare a quelle delle spirali fisse, ossia in un piano verticale.

E siccome appunto le spirali che hanno oltrepassata la posizione orizzontale sono quelle che si trovano chiuse, mentre

le altre, che hanno oltrepassato la posizione verticale sono aperte, così tutte le forze agenti sull'armatura tendono costantemente a produrre la rotazione. Siccome, in qualunque posizione si trovi l'armatura, v'ha sempre qualche spirale chiusa in corto circuito, così la macchina non ha punto morto e s'incammina sempre da sè.

Il motore che abbiamo descritto è asincrono, e, come notammo, si incammina da sè. Si può aggiungere ancora: appunto quando la velocità è nulla, o piccola, il momento della coppia che tende a metterlo in rotazione, ha il massimo valore. In tale caso, cioè quando l'armatura si sposta poco durante il periodo della corrente alternativa, si possono applicare senz'altro alle spirali dell'armatura i risultati delle esperienze sulle ripulsioni elettrodinamiche, e dimostrare con essi come le spirali sieno sollecitate a girare per mettersi in posizione perpendicolare alle spirali fisse. Ma quando l'armatura ha cominciato a girare ed ha assunto una velocità tale, che nella durata del periodo della corrente le spirali si spostino di un angolo considerevole, allora intervengono altri fatti che complicano notevolmente il fenomeno. Nascono allora nelle spirali rotanti forze elettromotrici tendenti a produrre correnti sulle quali il campo magnetico prodotto dalla corrente alternativa circolante nelle spirali fisse agisce con forze opposte al movimento. Debbono poi prodursi effetti di estracorrenti assai complicati ne' momenti dei passaggi delle spazzole da un segmento all'altro del collettore, effetti, che non solo complicano vieppiù i fenomeni, ma che evidentemente non si possono conciliare con un regolare e lodevole funzionamento della macchina.

Nella esposizione il motore non funzionava; quindi non offriva il mezzo di controllare colla esperienza la verità e la importanza di queste nostre considerazioni; ma il fatto stesso che il motore, solo in mezzo ad una brillante mostra di apparecchi in azione, era lasciato inerte, fa credere che in realtà gli inconvenienti accennati si sieno verificati, e si sieno riconosciuti gravi.

L'altro motore a corrente alternativa presentato dal professore Elihu Thomson appartiene alla classe dei motori *sincroni*.

Quando esso è avviato ed ha assunto la velocità normale, la posizione relativa delle spirali dell'armatura rotante rispetto a quelle fisse varia periodicamente collo stesso periodo della corrente alternativa eccitatrice; quindi non v'ha luogo di considerare in esso forze ripulsive elettrodinamiche prodotte nelle condizioni di quelle studiate cogli esperimenti sovradescritti, forze dovute a correnti alternative indotte in un conduttore immobile, v'ha luogo invece di applicare semplicemente le considerazioni relative alle macchine dinamoeltriche a correnti alternative funzionanti come motori.

Ma, a differenza de'soliti motori sincroni, il motore di cui stiamo parlando ha, nel funzionamento normale, la spirale di armatura semplicemente chiusa su sè stessa e percorsa da correnti indotte dalla parte fissa della macchina; esso è un motore *a reazione*, ed a questo titolo può essere classificato insieme agli altri apparecchi dei quali abbiamo parlato.

La disposizione di questo motore è, nel complesso, quella di una macchina dinamoeltrica a corrente alternativa con indotto a tamburo. Sei spirali piatte, oblunghe, sono fissate sulla superficie interna di un tamburo cilindrico di ferro, fatto con dischi isolati. Brevi sporgenze del ferro, in forma di denti, formano i nuclei delle sei spirali. Il tutto rappresenta esattamente l'induttore di una macchina alternante del tipo *Whe-stinghouse* o *Thomson-Houston*, con questa sola differenza: che il ferro è lamellare. L'armatura, che sta nell'interno, consiste in un nucleo cilindrico di ferro formato di dischi isolati, sulla superficie convessa del quale sono adagiate sei spirali oblunghe identiche a quelle dell'indotto delle macchine dinamoeltriche alternanti sovra nominate. La corrente alternativa proveniente dalla macchina generatrice passa nelle spirali fisse, le quali sono avvolte in direzioni alternate; passa quindi, attraverso ad un commutatore, nelle spirali dell'armatura, le quali, anch'esse sono avvolte in direzioni alternate. Il commutatore è della forma solita, ha sei segmenti comunicanti alternativamente coll'uno e coll'altro capo del filo dell'armatura, ed inverte le comunicazioni negli istanti nei quali le spirali rotanti oltrepassano le spirali fisse. Per tal modo si ottiene

che in ogni istante ciascuna spirale mobile sia respinta dal polo fisso che essa ha oltrepassato e sia attratta da quello verso cui si muove; e si ottiene così una coppia di rotazione diretta sempre nel medesimo verso, per effetto della quale il motore si incammina sempre. Tale disposizione però non è adoperata se non in principio, per avviare il motore e per portare l'armatura alla velocità normale, che è quella per la quale ciascuna spirale mobile percorre l'intervallo fra due poli fissi nella durata di un periodo della corrente.

Quando tale velocità è raggiunta, la spirale dell'armatura vien chiusa su sè stessa in corto circuito, e le spazzole vengono distaccate dal commutatore e congiunte direttamente tra di loro con un corto circuito, così che la corrente introdotta nella macchina dall'esterno prenda a circolare unicamente nelle spirali degli elettromagneti fissi senza più passare nell'armatura, mentre le spirali di quest'ultima sono percorse unicamente da correnti indotte in esse dagli elettromagneti.

La chiusura dell'armatura in corto circuito si fa automaticamente, e l'apparecchio a ciò destinato trovasi dentro al commutatore. Tale apparecchio consiste in due pezzi metallici che la forza centrifuga tende ad allontanare contro l'azione di una molla. Quando la velocità ha raggiunto il voluto valore normale, la forza centrifuga prevale sulla tensione della molla ed allontana i pezzi metallici tanto che questi vengono ad appoggiarsi contro la superficie interna dei segmenti del commutatore. Per tal modo viene stabilita una comunicazione diretta fra segmenti contigui e quindi la spirale dell'armatura viene a trovarsi chiusa in corto circuito.

La congiunzione delle spazzole in corto circuito ed il distacco delle medesime dal commutatore si fanno simultaneamente, a mano, per mezzo di un manubrio, il quale mentre comanda un commutatore stabiliente la diretta comunicazione fra le spazzole, comanda nel tempo stesso, un bocciuolo che solleva le spazzole medesime.

Quando le su descritte commutazioni hanno avuto luogo, la macchina entra nel suo funzionamento normale. Essa conserva

la sua velocità di regime e non esce *dal passo* se non quando si applichi all'albero una eccessiva coppia resistente.

Questo, che abbiamo descritto, era il solo modello di motore elettrico che nella mostra del prof. E. Thomson venisse fatto funzionare, esso era evidentemente quello al quale l'inventore attribuiva la maggiore importanza; ed era anche uno degli oggetti che più attraevano, in quella mostra, l'attenzione del pubblico.

Ora facciamoci a considerare quale effettivamente possa essere la sua importanza pratica.

Il motore è *sincrono*: ha adunque il pregio ed il difetto inerenti al sistema, e comuni a tutti i motori sincroni. Il pregio consiste nella assoluta autoregolabilità che il motore ha quando è avviato; la velocità infatti si mantiene allora assolutamente costante se tale è quella della macchina generatrice; le variazioni della coppia resistente, o come suol dirsi: le variazioni di carico, sempre quando non oltrepassino un certo limite, al di là del quale il motore si arresta del tutto, non hanno altro effetto che quello di far variare alquanto la fase del movimento rispetto alla corrente alternativa. Il difetto sta nel bisogno di una commutazione per la quale nel periodo di avviamento i circuiti sieno collegati altrimenti che nel funzionamento normale, e, ciò che è più grave, nella proprietà di fermarsi assolutamente non appena la coppia resistente superi un certo limite. Pregi speciali il motore non ha, salvochè si voglia considerare come un vantaggio d'importanza l'essere autoeccitatore. Presenta per contro un inconveniente che io giudico gravissimo, il quale mette il nuovo motore molto al di sotto degli ordinari motori sincroni, e limita moltissimo la sfera di applicabilità di esso. L'inconveniente è questo: Tutta la corrente passa nelle spirali fisse producenti il campo magnetico; quindi il motore ha una autoinduzione grandissima, proporzionale alla potenza; in grazia di tale autoinduzione si produce una notevole differenza di fase tra la corrente alternativa che attraversa il motore e la differenza di potenziali ai morsetti di esso; ed il lavoro meccanico che il motore fa, lavoro proporzionale al coseno di tale differenza di fase, risulta

notevolissimamente minore del prodotto della intensità efficace della corrente per la differenza efficace di potenziali, minore cioè di quello che assai opportunamente si può denominare col Blatby: il lavoro apparente.

Conseguenza di tale fatto è che la potenza effettiva di un impianto del quale facciano parte motori elettrici del descritto tipo, di grande potenza oppure numerosi, risulta notevolmente diminuita; risulta diminuito ciò che molto acconciamente il Kapp denomina *l'efficacia dell'impianto* o del sistema.

Un simile inconveniente non presentano, o presentano in misura molto minore i motori sincroni ordinarii, consistenti in semplici macchine dinamo elettriche a corrente alternativa. In tali macchine gli elettro magneti di campo, che sono le sole parti presentanti inevitabilmente grandi coefficienti d'induzione propria, possono essere eccitati con una corrente continua, od almeno con una corrente raddrizzata; e la sola armatura è percorsa dalla corrente alternativa. Ora l'armatura, da sola, presenta una autoinduzione, che si può, con una opportuna scelta del tipo delle macchine, rendere piccola od anche praticamente trascurabile.

La considerazione dell'induzione propria del motore elettrico, e della influenza di essa sull'efficacia del complessivo impianto ha una capitale importanza. Essa potrebbe bastare da sola a giustificare l'asserzione da noi fatta intorno al merito del motore Elihu Thomson ed al probabile suo avvenire in confronto con quello degli ordinari motori sincroni.

Le esperienze del prof. Thomson adunque, benchè per sè stesse importantissime e feconde di applicazioni, non avranno probabilmente alcuna influenza sull'avvenire della costruzione e dell'impiego dei motori elettrici a corrente alternativa. Tale avvenire è ormai nettamente delineato; e la storia delle invenzioni e delle esperienze è ormai abbastanza svolta, perchè si possa, senza tema di gravi smentite, prevedere l'ulteriore svolgimento di esse.

25. Che una macchina dinamo elettrica a corrente alternativa, possa, attivata dalla corrente prodotta da un'altra mac-

china simile, funzionare come un motore, è cosa saputa da parecchi anni. Già nella esposizione di elettricità di Torino, nel 1884, il *Gaulard* tentava, non senza qualche successo, l'esperimento; e nel medesimo anno, il 13 novembre, il dottore *J. Hopkinson*, al quale spetta in questa materia il massimo merito, leggeva davanti alla Società degli ingegneri telegrafici ed elettricisti di Londra, una memoria, ove con una chiarezza di vedute ammirabile in quel tempo, trattava teoricamente le questioni concernenti l'accoppiamento di due macchine alternatrici in un medesimo circuito, ed il funzionamento di esse come generatori o come motori.

In quella memoria era nettamente enunciato e teoricamente dimostrato il teorema, che una macchina dinamolettrica alternatrice inserita in un circuito, in serie con un'altra, tende a mettersi in opposizione con questa ed a funzionare come motore; e questo teorema che è il principio fondamentale della teoria dei motori sincroni, non aveva, fin d'allora, bisogno d'altro che di una conferma sperimentale per servire subito di base alla trasmissione elettrica dell'energia con macchine alternatrici, senza bisogno di nuove radicali invenzioni. Se le effettive applicazioni non tennero immediatamente dietro alla scoperta del principio, e nemmeno oggidì sono avviate, ciò deve attribuire a due ragioni. In primo luogo erano necessarie esperienze, non tanto per confermare le previsioni della teoria, quanto per accertare fra quali limiti si potesse far variare il carico, ossia la coppia resistente al movimento, senza che il motore uscisse dal sincronismo e cessasse con ciò dal funzionare, e per rendersi inoltre conto della facilità della regolazione e della condotta del motore.

Esperienze veramente concludenti non si fecero che in questi ultimi tempi, e sull'accennato punto gli elettricisti non incominciarono a formarsi idee chiare e convinzioni assodate se non recentissimamente dopo i notevoli esperimenti del *Mordey*, e dopo quelli, aventi carattere ufficiale, che nello scorso autunno furono eseguiti dalla Commissione scientifica di Francoforte sul Meno. In secondo luogo si esagerò forse la importanza dell'inconveniente, proprio del sistema, che i motori

sincroni presentano quando non sono muniti di acconcie disposizioni accessorie, all'inconveniente cioè di non potersi mettere in moto da sè, e di dover essere portati inizialmente, a mano, o con un motore ausiliare, alla velocità di regime prima di incominciare a lavorare regolarmente da sè. Quest'ultima circostanza ha dato luogo a studi ed a tentativi, che se portarono frutti di incontestabile utilità pratica, ebbero però nel tempo stesso l'effetto di ritardare le applicazioni.

Intanto la stessa proprietà del sincronismo, che in molti casi e specialmente pe' motori di grande potenza è utilissima, siccome quella che assicura di per sè la autoregolazione la più perfetta e la più assoluta, può essere in altri casi, e specialmente per i piccoli motori, troppo rigida e costituire un inconveniente. E questa considerazione unita alle sovresposte, indusse più di un inventore a cercare altre forme di motori non sincroni.

Si ebbe adunque una serie di invenzioni, di proposte e di esperienze che, specialmente ne' due ultimi anni attrassero su di sè l'attenzione degli elettricisti.

I motori elettrici per correnti alternative finora proposti sono di due specie: *sincroni* ed *asincroni*. I sincroni poi si possono dividere in tre classi:

1° Nella prima classe collochiamo i motori consistenti in semplici macchine a corrente alternativa con eccitazione separata fatta con una corrente continua. Tali motori quando non sono di potenza così piccola che si possono avviare colla mano, debbono essere provvisti di qualche disposizione o di qualche apparecchio accessorio che serva a metterli inizialmente in moto ed a portarli fino alla velocità normale a cui corrisponde il sincronismo. La difficoltà pratica principale sta nello studio di questo meccanismo ausiliario, ed appunto a tale meccanismo si riferiscono numerosi brevetti di privativa che ancora aspettano la sanzione della pratica.

Un'altra difficoltà sta nella necessità di ricorrere ad apparecchi ausiliari per la eccitazione, ed anche questa difficoltà contribuisce a ritardare l'impiego del sistema. Ma io penso che se le cennate difficoltà possono parere gravi quando si tratti

di un motore di piccola o di mediocre potenza, destinato ad usi domestici od alla piccola industria, esse perderebbero ogni importanza quando si trattasse di un motore potentissimo, destinato a funzionare come macchina ricettrice nella trasmissione di una cospicua quantità di energia ad una grande distanza. Allora infatti nessun ingegnere potrebbe considerare come ostacolo grave alla utilizzazione del sistema la necessità di provvedere la stazione ricettrice di un piccolo motore ausiliario, a vapore od a gas od idraulico, od anche elettrico, destinato a mettere in moto l'armatura della grande macchina ricettrice per portarla inizialmente fino alla velocità normale; nè quella di provvedere la stazione di una macchina dinamoelettrica a corrente continua, la quale, comandata inizialmente dal motore speciale, ed in seguito, a regime stabilito, dal grande motore medesimo, dia la corrente necessaria per la eccitazione. Superate le difficoltà e le incertezze inerenti a tutte le cose nuove, l'impiego dei motori di cui stiamo parlando diventerà pratico e sicuro, ed io oso affermare che appunto un tale impiego darà finalmente la soluzione più pratica e più semplice del problema di trasmettere a grande distanza tra due stazioni una grande quantità di energia. Occorrono per fare economicamente la trasmissione, macchine potenti e di grandi forze elettromotrici; ora le macchine dinamo elettriche a corrente alternativa sono appunto quelle più facili a costruirsi per grandi potenze e per grandi forze elettromotrici. L'impiego di tali macchine eliminerebbe d'un sol tratto tutte le maggiori difficoltà che il Marcel Deprez non riuscì a superare nelle sue disgraziate e sconcertanti esperienze di Creil.

L'avvenire delle grandi trasmissioni elettriche dell'energia su grandi distanze sta adunque molto probabilmente nello impiego delle correnti alternative e dei motori sincroni della classe ora considerata.

2° Poniamo nella seconda classe i motori sincroni, consistenti, come i precedenti, in semplici macchine a correnti alternative, quando gli elettromagneti, invece che da una corrente indipendente, continua, sono eccitati dalla stessa corrente alternativa attivante il motore, o da una derivazione di

essa. Tali motori hanno un commutatore che orienta la corrente degli elettromagneti.

Un motore di questa classe è quello degli ingegneri Ziperowsky, Déri e Blaty della casa Ganz e Comp. di Budapest; il quale sia per le esperienze ufficiali di cui è stato oggetto, sia per le applicazioni pratiche che fin d'ora ha ricevuto, ha attualmente una speciale importanza.

Sostanzialmente la sua costruzione è la seguente: L'armatura e gli elettromagneti sono fatti e disposti esattamente come nelle macchine alternatrici della casa Ganz: l'armatura è fissa, esterna; gli elettromagneti, disposti radialmente su di un albero, sono girevoli nell'interno. Nell'armatura si manda la corrente alternativa derivata direttamente dalla rete primaria oppure dai morsetti secondari di un trasformatore. Negli elettromagneti si manda la corrente secondaria prodotta da un apposito trasformatore, a cui si dà il nome di *magnetizzatore*; tale corrente secondaria passa però per un commutatore posto sull'albero della macchina, il quale inverte le comunicazioni tra i capi delle spirali degli elettromagneti ed i due morsetti secondari del magnetizzatore negli istanti nei quali gli elettromagneti, girando, passano di fronte alle spirali dell'armatura.

Collocando convenientemente le spazzole, si può far sì che ciascun polo degli elettromagneti sia costantemente respinto dallo spirale d'armatura che esso ha oltrepassato, ed attratto dallo spirale verso cui è avviato. Soddisfatta questa condizione, gli elettromagneti si trovano sollecitati a girare sempre nel medesimo verso, qualunque sia il verso della corrente nell'armatura. Il motore può adunque avviarsi da sè solo, oppure con l'aiuto di un piccolo impulso iniziale; se il motore è di piccolissime dimensioni si avvia da sè purchè inizialmente i poli degli elettromagneti non si trovino eventualmente affacciati alle spirali dell'armatura; se il motore ha grandi dimensioni, esso si avvia coll'aiuto di un piccolo impulso che si può dare colla mano. Così stando le cose, il motore può lavorare con tutte le velocità, esso non è un motore sincrono; ma è evidente che le condizioni del suo funzionamento non possono es

sere buone se non quando la velocità ha il valore corrispondente al sincronismo. Finchè infatti il sincronismo non sussiste, le commutazioni prodotte dal commutatore possono avvenire ed avvengono in istanti nei quali le correnti hanno grandi intensità, e danno allora luogo a scintillazioni grandissime.

Inoltre si hanno allora correnti alternanti non solo nell'armatura, ma anche negli elettromagneti, i quali presentano grandi coefficienti di induzione propria, ed anche ciò, come già notammo più avanti, è incompatibile con un pratico e buono funzionamento del motore; se anche il motore potesse lavorare sempre così, esso affievolirebbe a dismisura l'efficacia dell'impianto. S'aggiunga che gli effetti delle correnti di Foucault e della isteresi si farebbero allora gravissimi. Quando, invece, la velocità ha raggiunto il valore corrispondente al sincronismo, gli inconvenienti notati scompaiono od almeno si affievoliscono moltissimo. Infatti le commutazioni coincidono allora colle inversioni delle correnti, e si possono quindi fare senza grandi scintille, inoltre gli elettromagneti, che ricevono le correnti commutate, si trovano allora eccitati da correnti orientate, rimangono magnetizzati sempre nel medesimo verso e danno luogo a minime induzioni proprie, a minime correnti di Foucault, a minimi effetti di isteresi.

In tali condizioni il motore può lavorare lodevolmente e regolarmente.

Tali a grandi tratti è il modo di funzionare del motore Ganz, ma la particolarità caratteristica di questo motore, quella a cui si debbono i buoni risultati ottenuti, quella che costituisce il cuore della invenzione, è un sistema di commutatori, col quale si operano nel periodo di avviamento collegamenti diversi da quelli corrispondenti al funzionamento normale, in modo da migliorare le condizioni di quell'ultimo, e da diminuire gli inconvenienti del primo.

Per migliorare le condizioni del funzionamento normale occorre attenuare, per quanto è possibile, la produzione delle scintille sul commutatore; occorre inoltre affievolire, possibilmente, le variazioni della magnetizzazione degli elettromagneti. L'una cosa e l'altra sono ottenute, nel motore di Ganz, con

un artificio semplicissimo, che consiste nell'applicare al commutatore, invece di due sole spazzole, due coppie di spazzole, con una distanza angolare tale che ad ogni inversione le spirali degli elettromagneti rimangano per qualche tempo chiuse in corto circuito. Una resistenza inserita nel circuito di eccitazione, ossia nel circuito secondario del trasformatore magnetizzatore, serve a limitare la intensità della corrente esterna al commutatore durante i corti circuiti.

Per migliorare le condizioni del periodo di avviamento, occorre, invece, evitare la produzione di corti circuiti e di estracorrenti che ritardino le inversioni della magnetizzazione negli elettromagneti; conviene anzi rendere pronte quanto è possibile tali inversioni. Ciò si ottiene escludendo dal circuito una delle coppie di spazzole del commutatore. Siccome poi durante il periodo di avviamento le spirali degli elettromagneti, che allora sono percorse da correnti alternative, presentano una grande resistenza apparente, così nel trasformatore magnetizzatore la spirale secondaria è fatta di due pezzi: nel periodo di funzionamento normale, quando il circuito secondario, che è per la macchina il circuito di eccitazione, ha una piccola resistenza apparente, si utilizza un solo pezzo; nel periodo di avviamento quando il circuito d'eccitazione ha una resistenza apparente più grande, si utilizzano entrambi i pezzi. Finalmente per fare sì che la forza elettromotrice nel circuito di eccitazione, dopo di essere stata massima in principio, a motore fermo, diminuisca poi gradatamente di mano in mano che col crescere della velocità diminuisce la resistenza apparente delle spirali dei magneti, e per moderare nel tempo stesso l'intensità della corrente nell'armatura mentre la contro-forza-elettromotrice del motore non ha ancora raggiunto il valore normale, si adopera un altro trasformatore, detto *compensatore*. Durante il periodo di avviamento la spirale primaria di questo trasformatore viene inserita *in serie* coll'armatura, mentre la spirale secondaria è inserita nel circuito di eccitazione.

Un gruppo di quattro commutatori, che si comandano a mano con un unico manubrio, serve a ottenere d'un colpo tutti i descritti effetti. Esso può prendere due posizioni: la posi-

zione per l'avviamento e quella pel lavoro normale. Colla prima posizione, due sole spazzole sono in circuito, entrambe le parti della spirale secondaria del magnetizzatore sono in circuito, il compensatore funziona. Colla seconda posizione, entrambe le coppie di spazzole sono in circuito, un solo pezzo della spirale secondaria del magnetizzatore è utilizzato, il compensatore è escluso.

Colle descritte disposizioni, che per piccoli motori possono anche essere semplificate, e che in ogni caso possono venire applicate praticamente in molteplici modi, gli ingegneri della casa Ganz sono riusciti a comporre un tipo di motore elettrico per corrente alternativa che per potenze moderate, non superiori, per esempio, a 40 o 50 cavalli, può fin d'ora considerarsi come perfettamente pratico. È questo fin ora il solo motore elettrico che abbia servito a prove ufficiali. La commissione scientifica incaricata dalla città di Francoforte sul Meno dello studio delle questioni tecniche concernenti la scelta del sistema per un impianto elettrico civico, eseguì negli ultimi giorni di ottobre e nei primi di novembre del 1889 una notevole serie di esperienze sopra tre motori elettrici della casa Ganz dati rispettivamente per le potenze di 25, di 5 e di 0,2 cavalli. I risultati furono soddisfacentissimi: il coefficiente di rendimento salì fino al valore 0,86 pel motore di 25 cavalli, ed al valore 0,80 per quello di 5 cavalli; i motori conservarono inalterata la loro velocità normale, anche quando si fece variare bruscamente, e molto, la coppia resistente; quello di 25 cavalli non uscì dal sincronismo se non quando si elevò la carica ad oltre 40 cavalli.

Le scintillazioni, assai energiche nel periodo di avviamento, sono tollerabili nel lavoro normale; pei piccoli motori esse sono assolutamente insignificanti. Il solo inconveniente sta nel rumore, che pel motore di 25 cavalli risultò assai intenso, e che naturalmente potrebbe limitare in alcuni casi l'applicabilità del sistema.

Dopo tali risultati di esperienza si può asserire che i motori elettrici alternativi sincroni di questa classe risolvono il problema della distribuzione dell'energia con correnti alternative

in tutti i casi nei quali il rigido sincronismo non è un inconveniente.

3° La terza classe di motori sincroni è per ora rappresentata da un solo apparecchio, il quale non fu peranco sperimentato in modo industriale, ma che merita tuttavia d'essere notato. Questo motore venne descritto nell'ultimo settembre in una lettura fatta nell'Istituto americano degl'Ingegneri elettricisti dal sig. F. Jarvis Patten. È un motore sincrono auto-eccitatore, atto a mettersi in moto da sè. Come in quello di Ganz gli elettromagneti di campo, che nel funzionamento normale, sincrono, si trovano percorsi da correnti orientate, sono invece eccitati con una corrente alternata durante il periodo di avviamento. Ma mentre nel motore di Ganz l'armatura è sempre percorsa da correnti alternative; in quello del Patten essa pure viene attraversata da correnti orientate quando il sincronismo è raggiunto. Il motore proposto dal Patten ha la forma di una macchina dinamo-elettrica a corrente continua ordinaria con elettromagnete laminato; ha però un collettore disposto in modo speciale. Tale collettore è doppio; è formato di due collettori contigui portati, l'uno d'accanto all'altro, dal medesimo albero. Uno di questi è un collettore ordinario, i suoi segmenti sono collegati nel modo solito alle spirali dell'armatura. L'altro, che, come si disse, è posto d'accanto al primo, ha i suoi segmenti collegati uno ad uno coi segmenti di questo; e precisamente ciascun segmento di ordine impari è collegato col contiguo, e ciascun segmento di ordine pari è collegato col segmento diametralmente opposto del primo collettore. Sul secondo collettore si appoggiano due spazzole per mezzo delle quali il motore riceve la corrente alternativa; sul primo collettore si appoggiano altre due spazzole colle quali sono collegati i capi del circuito di eccitazione per l'elettromagnete. Se l'armatura gira con una velocità tale che le spazzole passino da un segmento all'altro precisamente negli istanti nei quali si inverte la corrente esterna, la corrente si trova raddrizzata e trasformata in una corrente pulsativa tanto nell'armatura quanto nelle spirali eccitatrici nell'elettromagnete: allora la macchina funziona

come un motore ordinario a corrente continua. Se la velocità non è quella del sincronismo la corrente rimane alternativa tanto nell'armatura quanto nell'elettromagnete; ma le inversioni di essa sono simultanee, così che la coppia di rotazione conserva sempre il medesimo verso. Con la descritta disposizione la velocità normale è quella per cui durante un giro dell'armatura la corrente alternativa si inverte tante volte quanti sono i segmenti nel collettore; ma si possono facilmente modificare i collegamenti in modo che la velocità normale sia diversa. Se si vuole, per esempio, che la velocità sia doppia, si collegano i segmenti 1 e 2 del secondo collettore coll'1 e 2 del primo, i segmenti 3 e 4 coi segmenti opposti del primo, ecc.

In generale si possono formare coi segmenti di ciascun collettore gruppi di  $n$ , e collegare i gruppi del secondo alternativamente coi gruppi corrispondenti e coi diametralmente opposti del primo; in tal modo la velocità normale è quella per cui durante ogni giro dell'armatura si ha un numero di inversioni di corrente uguale alla  $n^{\text{ma}}$  parte del numero dei segmenti.

Il Patten colloca tra i gruppi di segmenti del secondo collettore segmenti *oziosi*, isolati cioè dalle spirali, ai quali attacca i capi di resistenze disposte dentro al collettore medesimo. Tali resistenze sono destinate ad evitare le complete interruzioni della corrente ed a diminuire per tal modo le scintille. Nessuna esperienza si ha finora sul motore di Patten, nè è finora dimostrato che esso possa effettivamente funzionare in modo regolare; e se esperienze si faranno, è probabile che esse abbiano da mettere in evidenza gravi inconvenienti inerenti al sistema. Il cenno ora dato sarà tuttavia utile per facilitare e completare i confronti ed i ravvicinamenti; il motore del Patten infatti, mentre è sincrono, ha la forma esterna e la disposizione meccanica complessiva di uno dei motori asincroni dei quali dobbiamo ora discorrere.

26 Di motori *asincroni* si proposero vari sistemi.

Non per la sua importanza, chè non ne ha alcuna, ma perchè è affine ai motori sincroni già descritti, e perchè fu

anche oggetto di una lettura nel Congresso degli elettricisti tenutosi a Parigi in occasione dell'Esposizione, cito pel primo un motore proposto dal sig. Maurice Le Blanc. L'inventore, esagerando nella propria mente gl'inconvenienti proprii dei motori sincroni, e non avendo un'idea chiara dei larghi limiti entro i quali un ordinario motore sincero può venir sovraccaricato senza uscire dal sincronismo, immaginò una disposizione mirante a far rotare, per mezzo di spazzole scorrevoli su di un ordinario collettore, il campo magnetico. Con ciò egli suppone di poter dare al motore una velocità variabile pur mantenendo costante la velocità relativa dell'armatura rispetto al campo magnetico. Le disposizioni però da lui proposte non risolvono affatto il problema e sono basate su di una pura illusione.

Un modo che si presenta spontaneamente coi caratteri di una grande semplicità, per fare un motore asincrono consiste nell'impiegare a quest'uopo una pura e semplice macchina dinamo-elettrica a corrente continua eccitata in serie, differente dalle ordinarie solo per avere l'elettromagnete col ferro suddiviso, onde evitare gli effetti delle correnti di Foucault. Motori così fatti furono sperimentati da vari ingegneri, fra i quali è da citare Gisbert Kapp. Ma i risultati furono scoraggianti. E la ragione principale dell'insuccesso sta nel fatto di cui abbiamo già ragionato discorrendo dei motori di Elihu Thomson, nel fatto cioè che la forza elettromotrice dovuta all'autoinduzione è sproporzionatamente grande in confronto della controforza elettromotrice utile dovuta al movimento dell'armatura; tale forza elettromotrice di autoinduzione dà luogo ad un grande ritardo di fase, ed affievolisce enormemente l'efficacia dell'impianto. Secondo il Kapp, nelle migliori condizioni immaginabili l'efficacia dell'impianto non potrebbe superare 0,70; ed anche questo valore non si potrebbe ottenere se non alla condizione di poter ridurre la forza elettromotrice di self-induzione ad essere appena uguale alla controforza elettromotrice utile, cosa questa, che pare difficile, se non impossibile, di poter ottenere. Nelle esperienze fatte dal Kapp il lavoro ottenibile con un simile motore, attivato con una data intensità

efficace della corrente e con una data caduta efficace di potenziali, risultò appena uguale al quinto di ciò che sarebbe stato adottando una corrente continua della medesima intensità e con una medesima caduta di potenziali. Oltre a questo inconveniente gravissimo, il motore ne presenta un altro, che merita pure di essere notato: l'armatura corre rischio di venire abbruciata quando per avventura il motore per una eccessiva resistenza si abbia a fermare. Quando l'armatura è in riposo ed una corrente alternativa circola nella macchina, quelle spirali dell'armatura, le quali in quel momento si trovano chiuse in corto circuito dalle spazzole, sono nelle medesime condizioni della spirale secondaria di un trasformatore chiuso in corto circuito su sè stesso. Esse adunque vanno soggette ad abbruciarsi se per caso l'armatura non si può subito avviare.

Il sig. Patten ha proposto, come abbiamo veduto, un rimedio allo inconveniente maggiore, ossia a quello della soverchia auto-induzione; ma, ciò facendo, egli ha trasformato l'apparecchio in un motore sincrono, e probabilmente in un cattivo motore sincrono.

I soli motori asincroni coi quali finora si sieno ottenuti risultati sufficienti per dar luogo ad una fabbricazione industriale sono quelli nei quali si utilizza un campo magnetico rotante prodotto per mezzo di due correnti alternative presentanti una differenza di fase. Il principio su cui riposa il funzionamento di questi apparecchi è stato dimostrato dall'autore di queste note, ed un primo modello di motore fu sperimentato nel laboratorio di Elettrotecnica del Museo Industriale italiano già nello autunno del 1885 (1). Il principio è il seguente:

Se in uno spazio si sovrappongono due campi magnetici alternativi di uguale frequenza, aventi direzioni diverse, e presentanti l'uno rispetto all'altro una differenza di fase, si ottiene in quello spazio un campo magnetico risultante, che non si annulla in nessun istante e la direzione del quale ruota in un piano parallelo ai campi magnetici componenti, compiendo un

(1) Le esperienze alle quali qui si allude furono eseguite e pubblicamente presentate nei mesi di agosto e settembre del 1885.

giro in ogni periodo di questi. Se i due campi magnetici alternativi componenti seguono la legge sinusoidale, il campo magnetico risultante può per ogni punto rappresentarsi in grandezza ed in direzione col raggio vettore di un'ellisse avente il centro in quel punto. Se, in particolare, i due campi componenti sono l'uno all'altro perpendicolari, se hanno uguali intensità e se la loro differenza di fase corrisponde ad un quarto di periodo, l'ellisse si riduce ad un cerchio; il che vuol dire che il campo magnetico risultante ha allora un'intensità costante ed una direzione, la quale ruota con velocità uniforme compiendo un giro in ogni periodo. Se nel campo magnetico rotante si colloca un corpo conduttore, nascono in questo correnti indotte in virtù delle quali il conduttore è trascinato nella rotazione. I due campi magnetici alternativi si possono produrre per mezzo di due correnti alternative circolanti in due spirali gli assi delle quali comprendano fra di loro un angolo, per esempio un angolo retto; si possono adunque produrre rotazioni continue per mezzo di correnti alternative.

Le due correnti alternative necessarie per quest'uso possono essere ottenute in due circuiti distinti, direttamente, con una macchina dinamoelettrica appositamente costrutta, per esempio con una macchina avente sull'armatura due sistemi di spirali.

Oppure possono essere ricavate da un unico circuito e ciò in più modi.

Un modo consiste nell'adoperare le correnti di due circuiti derivati dei quali l'uno abbia una piccola resistenza reale ed una grande resistenza apparente di selfinduzione, e l'altro abbia invece una grande resistenza effettiva e sia privo di selfinduzione.

Un altro modo consiste nell'adoperare le due correnti primaria e secondaria di un trasformatore, nel circuito secondario del quale siasi inserita, per produrre la voluta differenza di fase, una resistenza esente da autoinduzione. Un terzo modo, che non è che una modificazione di quest'ultimo, consiste nello inserire nel circuito di una corrente alternativa una sola delle spirali impiegate per la produzione dei campi magnetici, e nel chiudere l'altra spirale semplicemente su sè

stessa. Se allora si ha l'avvertenza di collocare quest'ultima in modo che i piani delle sue spire facciano un angolo obliquo con quelli delle spire della prima, si produce senz'altro in essa la seconda corrente alternativa di cui si ha bisogno.

Ma secondochè si opera in un modo o nell'altro, secondochè si adoperano due correnti alternative prodotte in due circuiti distinti, direttamente, con una speciale macchina dinamoelettrica, oppure si adoperano due correnti ricavate da un'unica corrente alternativa con uno degli artifizi sovra enumerati, le condizioni del motore risultano molto diverse. Nel primo caso la differenza di fase fra le due correnti, necessaria per la produzione del campo magnetico rotante, è prodotta dalla macchina dinamoelettrica stessa, e si mantiene indipendentemente dal valore dei coefficienti di induzione delle due spirali del motore, purchè tali coefficienti non siano molto diversi tra di loro. Nel secondo caso, invece, la necessaria differenza di fase si può ottenere soltanto coll'inserire nel circuito di una delle spirali una resistenza grande a fronte della resistenza apparente di autoinduzione esistente nella spirale medesima. Tale resistenza oziosa dev'essere tanto più grande quanto più è grande l'induzione propria della spirale, quanto più è grande il flusso d'induzione che essa produce. Si è adunque, in questo caso, obbligati a sciupare una notevole quantità di energia col solo scopo di produrre la differenza di fase; o, date le condizioni del circuito e le costanti della corrente, si è obbligati a limitare la quantità di ferro contenuto nel motore, ed a limitare la potenza di questo.

Per questo motivo il primo motore a campo magnetico rotante, il quale servì alle esperienze fatte nel 1885 nel Museo industriale era stato composto senza ferro. Esso consisteva semplicemente in due spirali messe in croce cogli assi mutuamente perpendicolari, circondanti un cilindro di rame portato da un albero girevole su due cuscinetti. Una delle spirali, avente poche spire di grosso filo, era inserita nel circuito primario, l'altra comprendente molte spire di filo più sottile, era inserita nel circuito secondario di un trasformatore di Gaulard. L'apparecchio era destinato soprattutto a verificare il principio

ed a dimostrare la possibilità di applicarlo alla costruzione di contatori e di altri strumenti di misura.

Per motori di maggiore potenza destinati a servire come motori industriali, nei quali naturalmente le spirali debbono essere avvolte su nuclei di ferro, bisogna adoperare due correnti alternative prodotte direttamente colla voluta differenza di fase dalla macchina generatrice. Così infatti si fanno funzionare i motori industriali che finora si costrussero sul principio del campo magnetico rotante. Il più conosciuto di questi apparecchi è il motore per cui prese una privativa nel 1888 Nicola Tesla.

In tale motore il campo magnetico rotante è prodotto da un anello di ferro sul quale sono avvolte quattro spirali occupanti ciascuna un quadrante. Ciascuna spirale è collegata in serie con quella diametralmente opposta, in modo che risultano due sole spirali formate ciascuna da due pezzi uguali ed opposti: in esse si mandano le due correnti alternative discordanti. L'armatura, che gira dentro all'anello, è costituita da un nucleo laminato di ferro sul quale sono avvolte spirali chiuse su sè stesse. Con modificazioni facili ad immaginarsi la macchina può anche essere fatta multipolare. La Società Westinghouse di Pittsburg (Stati Uniti) ha fatto di questo motore una fabbricazione commerciale ed ha dato così al medesimo una speciale rinomanza. Per l'impiego dei motori in un sistema di distribuzione di energia, Tesla e la Società Westinghouse hanno proposto un sistema a tre fili, che evidentemente è sufficiente per la trasmissione delle due correnti alternative.

Per un sistema affatto analogo prese una privativa anche la casa Ganz di Budapest.

Più tardi, il signor Tesla ridusse l'ufficio del suo motore asincrono a quello di servire all'incamminamento di un motore sincrono. Egli propose allora di far servire, nel breve periodo di avviamento, la terra come conduttore neutro riducendo così a due i conduttori metallici della rete di distribuzione.

Il motore Tesla rappresenta la più conosciuta, ma non la sola forma di apparecchio colla quale si possa applicare praticamente il principio delle rotazioni elettrodinamiche. Per

dare un'idea della varietà delle disposizioni immaginabili, citiamo dopo il motore Tesla ancora un motore asincrono di *Rankin Kennedy*. Questo è costituito da due macchine dinamo-elettriche bipolari identiche, nella forma, a macchine ordinarie a corrente continua, ma col ferro degli elettromagneti lamellare. Le due macchine sono poste l'una d'accanto all'altra su di una medesima base, ed hanno l'albero comune. Le due armature, portate dall'albero comune non hanno commutatori nè collettori, ma semplicemente ciascuna spirale dell'una è collegata con una spirale dell'altra e forma con essa un circuito chiuso. Il collegamento è fatto in modo che mentre la spirale appartenente ad una delle armature passa nel piano neutrale, quella dell'altra armatura, che è in circuito insieme ad essa, si trovi nel piano perpendicolare al piano neutrale. Per far funzionare il motore basta inserire gli elettromagneti delle due macchine in due circuiti nei quali si abbiano correnti alternative presentanti una discordanza di fase di un quarto di periodo. Per i maggiori modelli il Kennedy propone una disposizione multipolare.

Bastano le sommarie descrizioni sovraesposte per mettere in chiaro i pregi ed i difetti dei motori a campo magnetico rotante.

Un pregio sta nella estrema semplicità della costruzione, e soprattutto nella assenza di qualunque commutatore o collettore. La semplicità del servizio derivante dalla mancanza del collettore, che è l'organo più delicato di tutte le macchine dinamo-elettriche e di tutti gli altri motori elettrici, è tale un vantaggio che basta da solo a spiegare il grande favore col quale i nuovi motori furono salutati dai pratici. Un altro pregio sta nella proprietà che essi, come del resto tutti i motori asincroni, hanno di mettersi spontaneamente in moto; e tale pregio è qui ancora accresciuto dalla circostanza, che il verso della rotazione, il quale per un dato collegamento dei circuiti è determinato e costante, si può invertire, quando occorra, colla più grande facilità. Basta a tal uopo invertire con un semplice commutatore le connessioni di una delle spirali col rispettivo circuito. In tal modo si fa variare di  $180^\circ$  la dif-

ferenza di fase fra le due correnti, e si inverte con ciò la rotazione del campo magnetico risultante.

In molti casi, e specialmente quando si tratti di piccoli motori, bastano evidentemente gli esposti pregi a far preferire i motori a campo rotante non solamente a tutti gli altri motori elettrici a corrente alternativa, ma anche agli ordinari motori a corrente continua.

Ma se si tratta di motori di considerevole potenza, si presentano anche inconvenienti che giova qui riassumere. In primo luogo dobbiamo ricordare che se la potenza del motore elettrico non è così piccola che non si abbia da tenere alcun conto del rendimento, non si può pensare ad eccitarlo con due correnti alternative ricavate entrambe da un unico circuito; così facendo si sarebbe obbligati, per produrre tra le due correnti la necessaria differenza di fase, ad inserire nel circuito di una di esse una resistenza ohmica grande a fronte della resistenza apparente dovuta alla autoinduzione. Quindi si andrebbe incontro ad uno spreco di energia inevitabile e grandissimo. Bisogna adunque eccitare il motore con due correnti alternative prodotte direttamente nella stazione centrale colla voluta differenza di fase, e distribuite per mezzo di due distinti circuiti. Occorre allora costruire l'intera rete di distribuzione almeno con tre fili; e questo è un inconveniente che limita evidentemente l'applicabilità del sistema. A questo inconveniente, che è proprio del sistema, si sovrappone poi l'altro, che è comune a tutti i motori asincroni: l'inconveniente derivante dal dover far passare le correnti alternative in spirali presentanti necessariamente notevoli coefficienti di induzione propria. Noi abbiamo già considerato poco sopra questo fatto ed abbiamo notato che in conseguenza di esso la caduta di potenziale prodotta dal motore ne' circuiti in cui è inserito risulta notevolmente maggiore di quella dovuta alla controforza elettromotrice utile; quindi l'efficacia dell'intero impianto risulta diminuita.

Questi inconvenienti si potranno certamente attenuare. Ed un mezzo potrà consistere nell'impiegare per la produzione del campo magnetico rotante non due sole, ma tre o più correnti con fasi diverse. Intanto essi spiegano le difficoltà finora

incontrate. Prevedendo le quali, noi nel pubblicare le nostre esperienze (1), prima che venissero alla luce i brevetti di Tesla, di Kennedy e di altri, abbiamo chiamata in modo speciale l'attenzione su alcune applicazioni ove le difficoltà suaccennate non esistono. E tali applicazioni appunto ora si vanno facendo con pieno successo; sono le applicazioni alla costruzione di contatori per correnti alternative, come quelli ora notissimi che portano i nomi di Borel, di Schallenberger, di Ferranti, di Blathy, ecc. Un'altra applicazione è quella ora coltivata dal Tesla, quella colla quale si fa servire un motore a campo magnetico rotante come apparecchio ausiliario per la messa in moto di un motore sincrono. Ma in tal caso è questo, il motore sincrono, il motore principale e non v'ha dubbio che per esso è serbato un grandissimo avvenire.

## II. Saldatura elettrica.

27. Nella esposizione di Parigi del 1881 Sir *William Siemens* presentava, nella splendida mostra della casa *Siemens Brothers* di Londra un apparecchio per la fusione de' metalli, ed eseguiva con esso notevolissimi esperimenti. Il procedimento adoperato consisteva nell'accumulare in uno spazio chiuso in pareti refrattarie il calore svolto da un arco voltaico. L'apparecchio era semplicissimo: consisteva in un crogiuolo di grafite, a grossa parete, il fondo del quale era messo in comunicazione col reoforo positivo di una macchina dinamo-elettrica. Il crogiuolo si riempiva fino a metà col metallo da fondere, e si chiudeva con un grosso coperchio di terra refrattaria avente nel centro un foro circolare destinato a dar passaggio al reoforo negativo. Tale reoforo poi era costituito da un grosso bastone cilindrico di carbone, fabbricato come quelli che servono per le lampade elettriche ad arco vol-

(1) Memoria citata. *Atti R. Accademia delle Scienze di Torino*, volume XXIII. Adunanza 18 marzo 1888.

taico. Esso era sospeso all'estremità di una leva di prima specie che coll'altra estremità sosteneva un nucleo di ferro, il quale colla sua metà inferiore penetrava nel vano di una spirale cilindrica verticale, fatta con grosso filo di rame isolato e collegata in serie col carbone. Il tutto costituiva un semplice regolatore analogo a quello di una lampada elettrica ad arco voltaico con avvolgimento in serie. Quando il circuito era rotto e nessuna corrente circolava nella spirale, il carbone stava abbassato e si appoggiava colla sua estremità inferiore sul metallo contenuto nel crogiuolo. Ma chiuso il circuito, la corrente circolante nel solenoide esercitava sul nucleo di ferro una forza succhiante, per cui il carbone si sollevava alquanto, distaccandosi dal metallo. Si produceva per tal modo tra il metallo ed il carbone un arco voltaico. Il calore dell'arco, accumulandosi man mano nel crogiuolo, produceva dopo qualche tempo, in quello spazio confinato, una temperatura elevatissima, per la quale il metallo fondeva.

Quell'apparecchio costituì il primo *forno elettrico*, e nella sua primitiva e grossolana semplicità si presentò subito come invenzione feconda di numerose ed importantissime applicazioni. Nel corso di tali invenzioni l'apparecchio ricevette poi forme e disposizioni svariate.

Presentemente si hanno due distinti sistemi di forni elettrici; i forni ad *arco voltaico* che hanno per tipo primitivo il descritto apparecchio di Siemens; ed i forni che possiamo denominare a *circuito chiuso*, che hanno per tipo quello adoperato da *Cowles* nell'elettrometallurgia dell'alluminio. I forni di questo secondo tipo servono quando si hanno a fondere materiali poco conduttori a freddo, mediocrementemente conduttori allo stato di fusione. I due carboni si fanno allora penetrare nel materiale contenuto nel forno fino ad una breve distanza l'uno dall'altro.

La corrente passa così attraverso al frapposto materiale, lo scalda e lo fonde. Di mano in mano, che, procedendo il riscaldamento e la fusione, la resistenza specifica del materiale diminuisce, si allontanano gradatamente i carboni per mezzo di un apposito manubrio comandato colla mano. Per tal modo

si mantiene costante la resistenza e si continua regolarmente l'accumulazione progressiva del calore.

L'importanza dei forni elettrici sta nel fatto, che con essi si può accumulare in uno spazio chiuso, che può anche essere piccolissimo, una grandissima quantità di calore, la quale non è limitata che dalla conduttività e dalla fusibilità delle pareti. Le conseguenze del quale fatto sono due. In primo luogo si possono con un forno elettrico produrre temperature incompatibilmente più elevate di quelle ottenibili con forni ordinari a combustione, nei quali la temperatura è limitata dalla necessità di disseminare il calore nella grande massa dei gas prodotti dalla combustione, e dal fatto della dissociazione, che comincia ad acquistare una importanza quando la temperatura supera i 1500°, e che stabilisce per questa un limite teorico insuperabile. In secondo luogo parecchie operazioni metallurgiche consistenti in riduzioni di ossidi in presenza del carbonio, le quali coi forni a combustione sono impossibili perchè consumano una quantità di calore maggiore di quella che si può produrre colla combustione, sono invece possibili, e si possono razionalmente tentare per mezzo di un forno elettrico.

Le applicazioni più importanti fin d'ora tentate, quelle che presumibilmente avranno il più splendido avvenire, sono appunto applicazioni metallurgiche: sono quelle che si vanno provando con impianti veramente industriali e grandiosi nella metallurgia dell'alluminio. Fra i procedimenti elettrometallurgici per l'alluminio, i soli che finora abbiano dato serie speranze di pratica riuscita e che si possano dire applicati in scala industriale sono quelli di *Cowles*, di *Heroult* e gli affini, nei quali il minerale viene ridotto col carbone in un forno elettrico. Nella esposizione si notavano, nella sezione americana, alcuni campioni di bronzi di alluminio ottenuti con tali procedimenti. Sgraziatamente però nulla era esposto o descritto relativamente agli apparecchi ed ai procedimenti adoperati; quindi in queste note, che si riferiscono unicamente alla elettrotecnica, non si può far luogo che al cenno precedente.

28. Ma per compenso l'esposizione presentava cose notevolissime relativamente ad un'altra applicazione termica della corrente elettrica: alla *saldatura elettrica*.

Anche la saldatura elettrica risale al 1881; ma nella esposizione di quell'anno non figurava ancora; quindi essa costituiva nell'ultima esposizione una novità saliente.

Coi procedimenti elettrici si ottiene la saldatura autogena di due pezzi metallici per mezzo del calore prodotto da una corrente. Ma i modi per ottenere tale risultato sono due, e corrispondono ai due sistemi di forni elettrici sovradescritti. Nell'uno il calore viene svolto in un arco voltaico prodotto tra i pezzi da saldarsi ed un reoforo di carbone tenuto a breve distanza da essi; nell'altro il calore viene prodotto nei pezzi medesimi, messi a contatto, da una corrente che li attraversa. Anche storicamente i due procedimenti si seguirono coll'ordine stesso nel quale si seguirono i forni elettrici. Il primo procedimento tentato fu quello basato sull'impiego dell'arco voltaico, ed è dovuto all'ingegnere russo *De Benardos*. Le prime prove che diedero origine al procedimento, furono eseguite da De Benardos e da Kotinsky nel laboratorio del signor De Kabath per la saldatura autogena delle lastre di piombo per gli accumulatori. Più tardi il De Benardos generalizzò il suo processo, rendendolo applicabile alla saldatura di diversi metalli, ed ottenne in proposito nel 1885, una privativa.

In tale procedimento la saldatura di due pezzi si opera su di una così detta *incudine elettrica*; la quale consiste in una lastra di ghisa portata da una tavola isolante e tenuta in permanente comunicazione col polo negativo di una macchina dinamo-elettrica o di una batteria di accumulatori di forza elettromotrice sufficiente per la produzione di un arco voltaico. Sull'incudine elettrica si collocano i pezzi da saldare in quella posizione relativa che dovranno avere ad operazione compiuta. Il polo positivo della macchina dinamo-elettrica o degli accumulatori si mette in comunicazione, per mezzo di un cordone flessibile, con un'asta di carbone portata da un manico isolante, che l'operaio tiene colla mano destra.

Appoggiando per un istante il carbone sul metallo e poi sollevandolo alquanto, si dà origine ad un arco voltaico, che

fa fondere i metalli. Facendo allora scorrere l'arco lungo i lembi de' due pezzi, si opera tra questi la saldatura autogena. È inutile notare che durante tutta l'operazione l'operaio deve avere gli occhi protetti da vetri affumicati portati da una maschera o da un telarino a mano, o da appropriati occhiali. L'intensità della corrente deve variare colla natura del lavoro che si ha da fare. Perciò in uno stabilimento industriale ove si voglia applicare il procedimento a vari lavori giova adoperare, come di fatto si fa, una batteria di accumulatori, della quale si possa utilizzare in ogni singolo caso quel numero di elementi che meglio conviene.

Secondo Ruhlmann la cosa più importante dell'invenzione di De Benardos consiste nell'attaccare il carbone al polo positivo invece che al negativo come faceva Siemens nel suo forno elettrico. Il più rapido consumo del carbone è infatti compensato da un grande vantaggio: si produce sul metallo un'atmosfera riduttrice che impedisce l'ossidazione. Il metallo non richiede alcuna preparazione; gli ossidi fondono e si riducono rapidamente, o formano coll'argilla sabbiosa spesso impiegata come fondente una scoria che protegge il metallo.

Si può anche operare sott'acqua.

È facile capire come oltre alle ordinarie saldature si possano col descritto procedimento fare altri lavori, come fori, tagli, chiodature, ecc. È similmente facile capire come apparecchi svariati possano impiegarsi nei vari casi. E infatti lo stesso De Benardos ottenne per tali apparecchi più di una privativa.

Fra i congegni meritevoli di nota proposti da questo inventore cito il cosiddetto *chalumeau elettrico*. Questo si compone di una *incudine elettrica* e di due carboni per la produzione dell'arco. L'incudine non è, come quella or ora descritta, tenuta in comunicazione col polo negativo del generatore di corrente, è invece isolata, ed appoggiata su di una potente elettrocalamita attivata dalla corrente stessa colla quale si opera. I due carboni sono tenuti l'uno d'accanto all'altro, alquanto convergenti, da un comune sostegno che si può far passeggiare colla mano al disopra dell'incudine. Un semplice apparecchio regola la distanza delle punte dei carboni fra le quali si pro-

duce l'arco voltaico. La corrente adunque non passa attraverso i metalli da saldare ed alla incudine, e l'arco anzichè tra un carbone ed il metallo, si forma tra i due carboni, vicino al metallo. Ma l'elettrocalamita su cui si appoggia l'incudine attrae l'arco e lo incurva così che esso forma un dardo il quale colpisce il metallo, un dardo analogo a quello prodotto dalle ordinarie lampade dei saldatori.

Il procedimento De Benardos ebbe qualche applicazione pratica. Una di queste, la quale fece parlare molto di sè, e che diede effettivamente buoni risultati, è quella che fece *Legrand* alla fabbricazione dei serbatoi metallici ermetici. Tuttavia l'impiego di essi dopo alcuni anni di esperimento non si è esteso nè attualmente accenna ad estendersi notevolmente.

29. È probabile invece che ad un grande avvenire sia chiamato l'altro procedimento, quello ove non si fa uso di alcun arco voltaico, ma si fa passare la corrente direttamente attraverso ai pezzi da saldare, messi a contatto. Questo procedimento, dovuto al prof. Elihu Thomson, ha fin d'ora acquistato una certa importanza industriale, e le privative, che lo riguardano, sono attualmente proprietà di una società americana, della *Thomson Electric Welding Company*, avente sede a Boston, la quale impiega per esso notevoli capitali. Questa società ha presentato a Parigi i principali suoi apparecchi ed ha eseguito con essi esperimenti brillantissimi. Benchè nei loro tratti principali gli apparecchi di Thomson fossero già universalmente conosciuti, tuttavia la mostra della *Thomson Electric Welding Company* fu una delle cose più notevoli dell'Esposizione.

Il procedimento di Elihu Thomson consiste nel far passare attraverso ai pezzi da saldare, messi a contatto e convenientemente premuti l'uno contro l'altro, una corrente di grande intensità. Per effetto di questa i pezzi si riscaldano sulla superficie di contatto e nelle vicinanze di essa, si rammolliscono, e coll'aiuto della pressione, che intanto si va esercitando su di essi, penetrano l'uno nell'altro e si saldano perfettamente. L'incandescenza comincia sulla superficie di contatto dei due

pezzi, e poi si propaga a sinistra ed a destra di essa per un piccolo tratto, per un tratto dell'ordine di grandezza del diametro dei pezzi che si saldano. Essa intanto, continuando l'operazione, si fa di più in più viva. Egli è appunto dalla vivezza dell'incandescenza, che l'operatore, edotto dalla pratica, giudica del momento opportuno per sospendere l'operazione. La saldatura comincia nell'interno, e si propaga gradualmente verso l'esterno, per modo che, quando essa appare fatta sulla superficie, essa è certamente perfetta anche nell'interno.

Il procedimento riposa su questo fatto notevole: che durante tutta l'operazione il calore prodotto dalla corrente si manifesta localizzato in uno strettissimo spazio in vicinanza della superficie di contatto dei due pezzi. Tale fatto si spiega facilmente. In principio, quando i due pezzi sono semplicemente appoggiati l'uno contro l'altro, la resistenza elettrica è evidentemente maggiore sulla superficie di contatto che nelle altre parti del circuito, ove si ha la continuità metallica. Quindi là sulla superficie di contatto si svolge, per l'effetto di Joule, la massima parte del calore equivalente all'energia della corrente, là si produce subito l'incandescenza e la fusione parziale del metallo. Quando poi questa prima fase dell'operazione è compiuta ed i due pezzi hanno cominciato a saldarsi insieme, il metallo, che nel luogo della saldatura è caldissimo e semifuso, presenta una resistenza specifica notevolmente maggiore di quella che presenta là dove è freddo; quindi l'effetto di Joule seguita a prodursi specialmente in quella regione, e l'incandescenza non solo si mantiene, ma seguita ad aumentare.

In causa della compressione, che si esercita tra i pezzi mentre sono rammolliti dal calore, si produce nel luogo della saldatura un rigonfiamento della sbarra, cha bisogna poi togliere colla lima.

Ma tolto questo rigonfiamento la struttura del metallo nel luogo ove è stata fatta la saldatura si mostra così omogenea da rendere irriconoscibile l'esistenza della saldatura medesima. La struttura del metallo nel luogo dove si è fatta la saldatura è generalmente fibrosa se si tratta di ferro, granulosa se si

tratta di acciaio. La resistenza alla trazione risulta nel luogo della saldatura pressochè uguale a quella che si ha nelle altre parti del metallo.

Per mettere in pratica il descritto metodo di saldatura, bisogna far passare attraverso i pezzi che si hanno da riunire, una corrente di tale intensità da provocare nei pezzi medesimi, nel modo che abbiamo detto, una elevatissima temperatura. Occorrono adunque correnti di intensità proporzionata alla sezione dei pezzi sui quali si vuole operare; e se tale sezione misura qualche centimetro quadrato, la corrente deve avere una intensità di migliaia di ampère. Per compenso il circuito si può sempre fare così che la sua resistenza elettrica sia minima; e quindi la necessaria corrente si può ottenere per mezzo di piccolissime forze elettromotrici, per esempio, per mezzo di una frazione di volt.

Per produrre le minime forze elettromotrici e le enormi intensità di corrente di cui si ha bisogno, e per far variare e regolare a seconda della natura del lavoro i valori delle une e delle altre, la cosa più comoda e più pratica che si possa fare, è di far uso di apparecchi a corrente alternativa comprendenti opportuni trasformatori. Così fa il professore Elihu Thomson, ed anzi il nodo della sua invenzione e la ragione del suo successo stanno appunto nell'idea di far servire alla operazione della saldatura elettrica correnti alternative.

Gli apparecchi che Elihu Thomson fecesi brevettare, sono numerosi, e parecchi di essi figuravano nella mostra di Parigi, ma tutti sono a corrente alternativa.

Per la saldatura di piccoli pezzi, di fili o di verghette di diametro minore di 13 millimetri, si adopera direttamente, senza l'intermediario di alcun trasformatore, la corrente alternativa data da una macchina dinamoelettrica bipolare, identica, nell'insieme, ad un'ordinaria macchina a corrente continua, ma avente sull'indotto una spirale unica collegata con un collettore a due anelli.

Per la saldatura di verghe più grosse si adopera, invece, sempre la corrente secondaria di un trasformatore. Il trasformatore poi è variamente conformato e proporzionato a seconda

della grandezza delle verghe. Io descriverò, come esempio, il più grande di tutti, quello col quale nell'Esposizione si eseguivano le più brillanti esperienze, saldando in pochi minuti aste di acciaio o di ferro da 5 a 6 centimetri di diametro.

È questo un trasformatore a circuito magnetico chiuso. Il nucleo di ferro formante il circuito magnetico è costituito da un tamburo cilindrico coll'asse orizzontale, composto con lamine di ferro isolate. Esso è solidamente fissato su di uno zoccolo di ghisa servente di base a tutto l'apparecchio.

La spirale primaria è avvolta su di una parte del tamburo nella maniera solita, come una parte di una spirale di Gramme. Data la natura del lavoro che si vuole eseguire, data quindi l'intensità della corrente secondaria, il numero delle spire ed il diametro del filo dipendono dalla forza elettromotrice della macchina dinamoelettrica e dall'intensità della corrente primaria che si ha da adoperare. Ed un pregio dell'apparecchio sta appunto in questo: che senza modificare nulla nell'ossatura, ma modificando semplicemente il numero delle spire adoperate, si può far servire il medesimo trasformatore a lavori diversi, oppure si possono far servire a compiere un medesimo lavoro macchine dinamo elettriche diverse. Il circuito secondario è costituito da un semplice quadro o telaio rettangolare passante, con uno de' suoi lati maggiori, dentro al tamburo di ferro in modo da risultare con questo concatenato. Tale telaio rappresenta una spira avvolta sul nucleo di ferro: rappresenta la spirale secondaria: una spirale composta di un'unica spira. Il telaio di cui parliamo è nel piano orizzontale passante per l'asse del tamburo di ferro.

Esso poi è formato con una grossissima sbarra massiccia di rame. La sezione trasversale della sbarra è quadrata ed ha una superficie non minore della somma delle sezioni delle spire primarie. Nel modello, che ha funzionato a Parigi, la sezione trasversale della sbarra aveva da 12 a 13 centimetri di lato. Il descritto telaio non forma però, da solo, un circuito chiuso; infatti il lato esterno parallelo a quello passante nell'anello di ferro, è interrotto verso la metà della propria lunghezza. Ma sui due pezzi di esso, i quali servono come guide,

si appoggiano e possono scorrere due robustissime e massicce morse di bronzo alle quali si raccomandano le due sbarre destinate ad essere saldate insieme. Una delle morse è collegata con una madrevite che si può far avanzare o retrocedere girando la vite con un volantino.

Per chiudere il circuito bisogna mettere a posto nelle morse i due pezzi da saldare, e poi girare il volantino finchè questi sieno venuti a contatto. Il circuito allora comprende i pezzi da saldare e la corrente secondaria passa attraverso alla superficie di contatto dei medesimi. Chiuso il circuito ed incominciata la saldatura, il medesimo volantino, che si governa colla mano, serve a provocare tra i due pezzi la necessaria pressione.

Nell'apparecchio che ha funzionato nell'Esposizione di Parigi la forza elettromotrice secondaria era di circa un mezzo volt, e l'intensità della corrente secondaria raggiungeva approssimativamente il valore di 26,000 ampère. Si adoperava adunque una potenza motrice di circa 18 cavalli-vapore. In un esperimento eseguito con questo apparecchio davanti ai membri del Congresso internazionale degli elettricisti si saldarono perfettamente nello spazio di 195 minuti secondi due sbarre d'acciaio del diametro di 6 centimetri.

Prof. GALILEO FERRARIS.

