

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ELETTRICA

NASCITA E SVILUPPO DELL'INGEGNERIA ELETTRICA

RELATORE: Prof. Massimo Guarnieri

LAUREANDO: Alessandro Pasculli

ANNO ACCADEMICO 2019-20

spazio per eventuale foto, disegno e/o logo laboratorio



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

NASCITA E SVILUPPO DELL'INGEGNERIA ELETTRICA

Relatore: prof. Massimo Guarnieri

Studente: Alessandro Pasculli
matricola 1082272

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	4
---------------------	----------

CAPITOLO I BREVE STORIA DELL'ELETTROMAGNETISMO

1.1	I fenomeni magnetici ed elettrici nell'antichità e le origini del magnetismo	7
1.2	Gli albori delle macchine elettriche, ovvero la macchina elettrostatica di Otto von Geuricke	11
1.3	Stephen Gray e la classificazione elettrica dei materiali in due categorie: i conduttori e gli isolanti	11
1.4	Il chimico francese Charles Francis Du Fay e l' "elettricità positiva e negativa"	12
1.5	Prototipo del condensatore: la bottiglia di Leida	13
1.6	Lo studio dell' "elettricità atmosferica" da parte di Benjamin Franklin	14
1.7	L'induzione elettrostatica	15
1.8	Concezione erronea del fenomeno dell'elettricità: l'elettricità animale	16
1.9	Avvio di uno studio scientifico dell'elettricità: dall'osservazione alla spiegazione razionale dei fenomeni elettrici	16
1.10	Primo generatore statico di corrente continua: la pila di Alessandro Volta	18
1.11	L'esperienza di Oersted	19
1.12	Interazione magnetica tra due conduttori percorsi da corrente elettrica	20
1.13	Effetti del campo magnetico su un conduttore percorso da corrente elettrica	21
1.14	L'elettrocalamita	21
1.15	Gli studi di George Simon Ohm sulla trasmissione dell'elettricità	22
1.16	L'autoinduzione e l'induzione elettromagnetica	22
1.17	Considerazioni sulla distribuzione superficiale dell'elettricità: gli schermi elettrostatici	25
1.18	La concezione Maxwelliana dell'elettromagnetismo	26
1.19	Le onde elettromagnetiche	28

CAPITOLO II STORIA DELL'INGEGNERIA ELETTRICA TRA LA SECONDA META' DELL'OTTOCENTO ED I PRIMI ANNI DEL NOVECENTO CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL'ITALIA

2.1	La telegrafia: prima vera realizzazione elettrotecnica	29
2.2	I primi generatori di energia elettrica	30
2.2.1	L'anelo di Pacinotti	33
2.2.2	La macchina generatrice di Gramme	34
2.2.3	Storica disputa tra il Pacinotti ed il Gramme	34
2.2.4	Difficoltà inerenti alla progettazione delle macchine elettriche	35
2.3	L'Esposizione Universale di Parigi, un'opportunità per l'elettrotecnica italiana	36
2.4	Prime applicazioni industriali dei generatori: le centrali elettriche	37
2.4.1	Il caso Edison	37
2.4.2	La centrale di via Santa Radegonda in Milano	39
2.5	La figura di Galileo Ferraris, primo vero elettrotecnico italiano	40
2.5.1	Contributi del Ferraris alla teoria del trasformatore	41

2.6	La tecnica elettrica italiana nella seconda metà del 1800	42
2.7	L'importanza della corrente alternata nella trasmissione dell'energia elettrica	43
2.7.1	La corrente polifase	46
2.8	La trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica	47
2.8.1	Le fasi iniziali	47
2.8.2	Cenni tecnico-storici sulla trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica	48
2.8.3	L'impianto di Paderno - Milano	51
2.9	La cultura elettrotecnica in Italia alla fine del 1800	52
2.9.1	L'insegnamento dell'elettrotecnica	52
2.9.2	Riviste, manuali e trattati	54
2.9.3	AEI - l'Associazione Elettrotecnica Italiana	55
2.9.4	Alcune questioni inerenti alla concezione teorica e pratica dell'elettrotecnica	57
2.9.5	Gli studi sulle macchine elettriche	58
2.9.5.1	Situazione italiana delle macchine elettriche	58
2.9.5.2	Studiosi italiani di macchine elettriche successivi al Ferraris	59
2.10	La cultura elettrotecnica in Italia nei primi anni del 1900	60
2.10.1	Il Congresso Internazionale di Elettricità di St. Louis	60
2.10.2	Riviste: L'industria elettrica e L'elettrotecnica	60
2.10.3	Sviluppi teorico-pratici sulle linee di trasmissione dell'energia elettrica	61
2.10.3.1	La linea Grosotto - Milano	61
2.10.3.2	Studi teorici sulle linee di trasmissione dell'energia elettrica e relativi problemi	62
2.10.4	Sviluppi degli studi sulle macchine elettriche	62
2.10.4.1	Testi universitari e manuali	63
2.11	Uno sguardo all'Europa: gli ingegneri elettrotecnici inglesi	64
2.12	Epilogo	67

CAPITOLO III

STORIA DELL'ELETTROTECNICA CIRCUITALE

3.1	Origine della teoria delle reti elettriche stazionarie	69
3.2	I regimi elettrici	70
3.3	Dal regime stazionario al regime variabile: il contributo della teoria dei campi	73
3.4	Cenni sulla teoria delle reti magnetiche	75
3.5	Il regime alternato sinusoidale ed il metodo simbolico	77
3.5.1	Il metodo simbolico	80
3.5.2	La corrente polifase	81
3.6	Il regime transitorio ed il metodo operatoriale	82
3.6.1	Il metodo operatoriale	84
3.7	Apporti della teoria dei sistemi alla teoria delle reti elettriche	85
3.8	Dal metodo campistico al metodo circuitale	85
3.9	Epilogo	87

CAPITLO IV

PERSONAGGI CHE HANNO CONTRIBUITO ALLA NASCITA E ALLO SVILUPPO DELL'INGEGNERIA ELETTRICA

4.1	Charles Augustin Coulomb	89
4.2	André Marie Ampère	91
4.3	George Simon Ohm	92
4.4	Michael Faraday	94
4.5	Gustav Robert Georg Kirchhoff	96
4.6	James Clerk Maxwell	98
4.7	Oliver Heaviside	101
4.8	Leon Charles Thevenin	102
4.9	Charles Proteus Steinmetz	103
4.10	Arthur Edwin Kennelly	104
4.11	Edward Lawry Norton	105
4.12	Bernard Tellegen	106

APPENDICE

FONDAMENTI TEORICI DELL'ELETTROTECNICA CIRCUITALE

1	Concetti introduttivi	107
2	Teoria dei grafi	108
3	Principi di Kirchhoff	110
4	Proprietà di conservazione della potenza istantanea e teorema di Tellegen	112
5	Bipoli	113
5.1	Bipoli adinamici	113
5.2	Bipoli dinamici	114
5.3	Teoremi di Thevenin e di Norton	116
6	Doppi bipoli	117
6.1	Doppi bipoli adinamici	117
6.1.1	Potenza dei doppi bipoli	118
6.1.2	Proprietà dei doppi bipoli	119
6.2	Doppi bipoli dinamici	120
7	Metodi per la soluzione dei circuiti elettrici	121
7.1	Teorema di sovrapposizione degli effetti	121
7.2	Metodo del tableau	122
7.3	Metodo nodale	124
7.3.1	Scrittura diretta della matrice nodale del circuito	126
7.4	Metodo delle maglie	126
7.4.1	Scrittura diretta della matrice delle maglie del circuito	128
7.5	Confronto tra il metodo nodale ed il metodo delle maglie	129

CONCLUSIONE	130
--------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	131
---------------------	-----

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi analizza l'evoluzione storico-temporale dell'ingegneria elettrica e prende avvio dalla lettura e dallo studio di una serie di testi e dispense inerenti all'esame "Storia della tecnologia". Si è ritenuto utile inquadrare il lavoro nell'ambito della tecnica elettrica, piuttosto che analizzare l'origine e sviluppo dei vari settori della tecnologia, al fine di trattare degli argomenti, che rientrano a pieno titolo tra gli studi del corso di laurea magistrale in "Ingegneria dell'energia elettrica".

Scopo principale della presente tesi è quello di esporre la storia dell'ingegneria elettrica e, all'interno di tale esposizione, evidenziare come è avvenuta la transizione dall'elettromagnetismo alla tecnica elettrica ed in particolare alla teoria dei circuiti elettrici, ossia delineare l'origine di tale teoria a partire da quella parte dell'elettrologia, che studia i fenomeni elettrici, magnetici e le rispettive relazioni. Per ottemperare al suddetto fine, è stata eseguita, preliminarmente, un'approfondita ricerca bibliografica, selezionando testi scientifici, storici e tecnici e scartandone altri, ricerca che mi ha permesso di suddividere l'argomento in quattro capitoli ed un'appendice. Vari testi, particolarmente attinenti all'argomento, sono stati consultati per intero, altri sono stati esaminati parzialmente al solo fine di chiarire e/o integrare alcuni concetti, altri ancora sono serviti da confronto/conferma dei concetti rilevati dai testi principali. La tecnica impiegata, per redigere la tesi a partire dai riferimenti bibliografici, non si è limitata ad una semplice estrazione di notizie e ad una loro relativa ricomposizione, ma, oltre a selezionare con criterio le informazioni attinenti tramite una serie di domande preventive, è consistita in una rielaborazione personale degli argomenti, ovvero in una loro spiegazione, approfondimento, comparazione, per individuare una serie di relazioni volte a creare un'articolata struttura argomentativa, rispondente al tema trattato.

Il primo capitolo riporta una breve storia dell'elettromagnetismo e descrive a grandi linee l'origine dei fenomeni elettrici e magnetici, l'evoluzione del concetto di elettricità, le varie leggi ed i vari principi che governano i fenomeni elettrici e magnetici, l'interazione tra questi ultimi ed infine le equazioni di Maxwell. Questi concetti, propri della fisica, possono essere considerati come postulati, per cui l'intero apparato deduttivo dell'elettrotecnica è volto a sviluppare una teoria, che è alla base dello studio e del progetto di circuiti composti di elementi, che soddisfano i suddetti postulati.

Il secondo capitolo delinea, con particolare riferimento alla situazione italiana tra il 1800 ed il 1900, l'evoluzione storico-temporale dell'ingegneria elettrica, intesa come il complesso delle discipline aventi per oggetto le applicazioni dell'Elettricità e del Magnetismo, tra le quali compaiono le Macchine elettriche e gli Impianti elettrici. In particolare il capitolo inizialmente mette in evidenza l'origine delle prime macchine elettriche e le relative applicazioni, le centrali elettriche; successivamente descrive gli albori della trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica ed i primi impianti di trasmissione; infine affronta lo sviluppo della cultura elettrotecnica in Italia tra il 1800 e 1900, con alcuni cenni alla situazione europea, ovvero descrive la nascita delle prime riviste e libri del settore, delle prime istituzioni ed associazioni e gli sviluppi degli studi relativi alle discipline elettriche.

Il terzo capitolo si sofferma sull'evoluzione storico-temporale di una delle principali materie dell'ingegneria elettrica, l'elettrotecnica circuitale, intesa sia come disciplina tecnica a sé stante, ossia indipendente dall'elettromagnetismo, basata su un approccio sperimentale, sia come disciplina di origine "campistica", ossia derivante, sotto opportune condizioni, dalla teoria dei campi dell'elettromagnetismo maxwelliano. In particolare il capitolo evidenzia come la transizione dall'elettromagnetismo alla teoria delle reti elettriche possa avvenire in due sensi, ovvero dal campo al circuito (metodo storico) e viceversa (metodo logico). La prima impostazione, risalente ad Abraham, prevede una spiegazione del funzionamento degli oggetti realizzati dalla Tecnica a partire dai principi generali della fisica; la seconda impostazione, risalente a Bottani e Sartori, permette un approccio immediato e diretto allo studio della tecnica elettrica, per il quale è sufficiente una semplice descrizione dei fenomeni fisici, riservando lo studio approfondito della teoria fisica ad un secondo momento.

Nel quarto capitolo si è ritenuto opportuno riportare delle note biografiche relative ad alcuni dei principali personaggi, fisici, ingegneri, matematici, che con le loro scoperte ed invenzioni hanno fornito un apporto fondamentale alla nascita ed allo sviluppo dell'ingegneria elettrica. Il quarto capitolo ha origine dalla constatazione che, per comprendere una teoria nella sua totalità, non basta apprendere un'insieme di date, nomi, teoremi, ipotesi e dimostrazioni, ma è utile conoscere anche il vissuto dei suoi ideatori.

L'appendice, infine, riporta una sintesi dei principali fondamenti teorici della teoria dei circuiti elettrici, la quale rappresenta l'insegnamento di base dell'ingegneria elettrica; in seguito ad una trattazione prevalentemente storica nei capitoli 1, 2, 3 e 4, si è ritenuto utile

riportare in appendice le principali definizioni, teorie, relazioni e principi propri dell'elettrotecnica circuitale, al fine di integrare la narrazione storica con una sintetica trattazione pratico-applicativa.

CAPITOLO I

BREVE STORIA DELL'ELETTROMAGNETISMO

1.1 I fenomeni magnetici ed elettrici nell'antichità e le origini del magnetismo

I FENOMENI MAGNETICI ED ELETTRICI NELL'ANTICHITA'

Le proprietà magnetiche di alcuni corpi erano note ai Greci fin dal VII secolo **a.C.** Si era osservato che i pezzi di una particolare roccia (la magnetite ⁽¹⁾, una speciale combinazione di ossidi di ferro) erano in grado di attirare o respingere altri pezzi dello stesso materiale. Talete di Mileto fu il primo filosofo a descrivere la suddetta roccia attorno al 550 a.C.

L'osservazione di fenomeni elettrici ha pure origine in epoca greca classica; in tale periodo si scoprì che le bacchette di ambra, di ebanite e di altri materiali, se vigorosamente strofinate con un panno di lana, riuscivano ad attirare corpuscoli leggeri quali granelli di polvere, pagliuzze, piume o a respingere, ad esempio, altre bacchette dello stesso materiale appese ad un filo e anch'esse precedentemente strofinate.

LE ORIGINI DEL MAGNETISMO

La prima applicazione relativa ai fenomeni magnetici, forse la più rilevante di tutto il Medioevo, è rappresentata dalla bussola. La scoperta della bussola e la data della sua prima applicazione alla navigazione sono eventi per i quali sono state proposte varie origini e teorie, che sono esposte nel seguito. Si può affermare che i Cinesi, gli Arabi, i Greci, i Finlandesi e gli Italiani reclamano tutti l'invenzione della bussola ⁽²⁾.

L'ipotesi, che i Cinesi possano essere considerati gli inventori della bussola, ha origine da alcune leggende, nelle quali era citato un carro magico, il See-nan (carro indicante il sud), sul quale una figura dalle sembianze umane con un braccio alzato e proteso in avanti indicava sempre questo punto cardinale. Considerando questa ipotesi, la bussola può essere fatta risalire al 2634 a.C., anno in cui l'imperatore Huang-ti sconfisse in battaglia dei ribelli,

¹ Il nome magnetite deriva da Magnesia, città dell'Asia Minore.

² E' stato accertato comunque che i primi ad inventarla furono i Cinesi.

grazie all'uso dei "carri indicatori del sud" ⁽³⁾, utilizzati per condurre le truppe contro il nemico attraverso una folta nebbia; tuttavia non ci sono prove circa il funzionamento



Fig. 1.1 - Primitiva bussola magnetica cinese a forma di cucchiaio risalente al 70-80 d.C.

magnetico di questi carri, mentre è certa la presenza di un ingranaggio meccanico. Tralasciando le leggende, la prima documentazione di una bussola magnetica cinese risale al 70-80 d.C. (fig. 1.1); si trattava di un cucchiaio in magnetite, che puntava verso il Polo Sud magnetico. Un'importante evidenza dell'uso della bussola magnetica da parte dei Cinesi nella navigazione è quella contenuta in un lavoro dal titolo "P'ing-chou-k'o-t'an" datato approssimativamente intorno alla fine

del XI secolo d.C.

L'ipotesi di un'origine araba della bussola ⁽⁴⁾ (avvalorata dalla superiorità degli Arabi in campo scientifico e dalla loro notevole abilità nell'arte della navigazione) è messa in discussione da alcuni studiosi, i quali evidenziano come Arabi, Turchi e Persiani chiamassero lo strumento con il termine "bossola", ovvero con il nome italiano; ciò testimonia la dubbia validità della suddetta ipotesi.

Le prime informazioni inerenti all'impiego della bussola per la navigazione risalgono al 1100 d.C. in Cina, al 1200 d.C. nel mondo arabo, al 1250 d.C. nella Scandinavia ed al 1187 d.C. in Europa, dove l'uso da parte dei marinai di un ago calamitato, per tenere la rotta quando la Stella Polare risultava oscurata, è citato nel trattato intitolato "De utensilibus" scritto da Alexander Neckam. Una descrizione accurata della bussola è riportata nel lavoro "Epistola de magnete" (datato 1269) di uno studioso francese, noto col nome latinizzato di Petrus Peregrinus de Maricourt. Questo studio fu seguito dopo molto tempo dal "The new attractive" (1581) del navigatore e costruttore di bussole Robert Norman, che scoprì l'inclinazione magnetica (su di un piano verticale) del magnetismo terrestre, associata alla latitudine.

Nel 1600 fu pubblicato il primo trattato sul magnetismo con il titolo "De magnete,

³ La battaglia è leggendaria. Il carro che punta a sud è stato documentato per la prima volta nel terzo secolo d.C.

⁴ Le prime documentazioni arabe della bussola risalgono al 1290-1300.

magneticisque corpibus, et de magno magnete tellure" da parte del medico di corte della regina Elisabetta I William Gilbert (1544-1603) (fig. 1.2); antecedentemente alla pubblicazione del suddetto trattato era diffusa una concezione magico-fantastica dei fenomeni magnetici. L'opera di Gilbert riporta tutti gli studi sperimentali da lui effettuati nell'arco di circa quindici anni sui fenomeni elettrici e magnetici.

Gilbert confermò tutte le concezioni dei Greci sui fenomeni elettrici, tramandate inalterate per oltre venti secoli; egli con uno studio minuzioso individuò un insieme di sostanze (diamante, vetro, zolfo, ...), che presentavano lo stesso comportamento dell'ambra e dell'ebanite, e chiamò "elettrizzati" (⁵) i materiali, che acquisivano la proprietà di attirare i corpuscoli leggeri, e "forza elettrica" la relativa forza, che si manifestava durante l'attrazione. Gli esperimenti compiuti da Gilbert misero in evidenza le differenze tra i fenomeni magnetici ed



Fig. 1.2 - William Gilbert (1544-1603).

elettrostatici. Egli osservò, per esempio, che la magnetite non aveva bisogno di alcuno stimolo, per manifestare le sue proprietà magnetiche, mentre il vetro o l'ambra dovevano essere strofinati, per mostrare le loro proprietà elettriche; inoltre osservò che l'attrazione magnetica, a differenza di quella elettrica, non veniva schermata da un foglio di carta. Le suddette osservazioni insieme ad altre sono riportate nella sua succitata opera "De magnete, magneticisque corpibus, et de magno magnete tellure", in cui, oltre ad alcune interpretazioni erronee, sono esposte molte constatazioni esatte e importanti, successivamente verificate e sviluppate da altri, quali, ad

esempio, le seguenti:

1. due magneti si respingono per i loro poli simili e si attraggono per i poli opposti;
2. se si avvicina ad un pezzo di magnetite una bacchetta sottile di ferro, questa acquista la proprietà di attirare la limatura di ferro, principalmente in vicinanza delle estremità. La bacchetta di ferro si è quindi trasformata in un magnete, ovvero si è "magnetizzata". La bacchetta viene chiamata magnete artificiale o calamita (o ago magnetico, se di piccole dimensioni) e presenta anch'essa due poli sempre di segno opposto;

⁵ Dal termine "électron", nome greco dell'ambra

3. il calore influenza il magnetismo; in particolare una sbarra di ferro magnetizzata perde questa proprietà, se riscaldata sopra i 760 °C (in termini moderni, ciò avviene quando si supera la temperatura di Curie propria del materiale);
4. se si sospende a un filo un ago magnetico o lo si fa galleggiare con opportuni sistemi sull'acqua, esso tende a disporsi, una volta libero, approssimativamente parallelo al meridiano terrestre; spostandolo poi da questa posizione di equilibrio, l'ago compie intorno ad essa oscillazioni smorzate dagli attriti.

L'opera di Gilbert fu apprezzata da Galileo Galilei (1564-1642), che gli dedicò diverse pagine nella "Terza giornata" della sua opera "Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo" e spianò la strada alla teoria della gravitazione generale di Isaac Newton (1643-1727).

Gilbert non si occupò solo dei magneti, ma anche dei fenomeni elettrici. Egli scoprì che vari materiali, oltre all'ambra, potevano essere elettrizzati per strofinio; inoltre inventò il primo strumento elettrico, l'ago bilanciato o versorio, e fu il primo ad usare i termini "attrazione elettrica, forza elettrica, e polo magnetico".

1.2 Gli albori delle macchine elettriche, ovvero la macchina elettrostatica di Otto von Geuricke



Fig. 1.3 - Macchina elettrostatica di Otto von Geuricke.

La prima macchina per produrre elettricità si deve ad Otto von Geuricke (1602-1686), fisico e borgomastro di Magdeburgo, noto soprattutto per i suoi esperimenti sulla pressione atmosferica. La sua macchina elettrostatica (fig. 1.3) consisteva in un globo di zolfo, montato su un manico di legno, che veniva fatto ruotare velocemente, mentre una mano strisciava sulla sua superficie, esercitando così un attrito sufficiente ad elettrizzare lo zolfo. Miglioramenti alla

macchina elettrostatica di Otto von Geuricke furono apportati sostituendo allo zolfo il vetro, che permetteva di ottenere risultati più evidenti; a seguito di tali miglioramenti verso il 1770 l'inglese Jesse Ramsden (1735-1800) inventò un modello di macchina, che venne largamente usato per circa un secolo.

1.3 Stephen Gray e la classificazione elettrica dei materiali in due categorie: i conduttori e gli isolanti

La scoperta che i materiali possono essere raggruppati in due grandi categorie, conduttori e isolanti, in relazione alla loro caratteristica di permettere o meno il flusso delle cariche elettriche, rappresentò un importante sviluppo nello studio dell'elettricità; questa scoperta ebbe luogo principalmente ad opera dell'inglese Stephen Gray (1666-1736) ⁽⁶⁾.

Egli scoprì che la "virtù elettrica", ovvero l'elettricità, poteva essere trasmessa da un corpo elettrico elettrizzato ad uno non elettrico per contatto o per conduzione senza un apparente movimento materiale, come un fluido imponderabile. Un pezzo di metallo, toccato da un

⁶ A quel tempo i corpi erano distinti in elettrici e non elettrici. Ai primi appartenevano solo l'ambra, il vetro ed alcune pietre preziose, che potevano essere elettrizzati per strofinio. Si riteneva che questi cosiddetti corpi elettrici fossero abbondantemente provvisti di una particolare sostanza elettrica, che si sprigionava in risposta allo strofinio. Questo fenomeno è chiamato triboelettricità. Gli altri corpi non elettrici, indifferenti allo strofinio, erano invece sprovvisti di tale sostanza.

tubo di vetro elettrizzato, acquisiva la proprietà di attrarre i corpuscoli di prova; inoltre trovò che, in certi casi, si poteva avere un'elettrizzazione per cariche indotte. In particolare egli notò che l'elettricità si poteva generare e conservare in certi materiali che chiamò "electris", mentre essa scorreva nei metalli e nei corpi umidi che chiamò "non electris"; qualche anno più tardi i primi furono chiamati isolanti ed i secondi conduttori. Questi ultimi si elettrizzavano solo se sostenuti da materiali particolari (isolanti), come, ad esempio, i fili di seta. Provò inoltre che, sospendendo una striscia conduttrice con dei fili di seta, era possibile trasmettere l'elettricità per oltre 300 piedi.

Attualmente è noto che i conduttori permettono il movimento di alcune delle cariche, che li costituiscono, sotto l'azione di campi elettrici, a differenza degli isolanti in cui tale moto è impedito. In particolare per i metalli, i conduttori per eccellenza, questa proprietà è dovuta alla particolare natura del legame chimico (legame metallico), che li caratterizza. In conclusione gli isolanti si differenziano dai conduttori, in quanto possono essere elettrizzati per strofinio, cosa che non è possibile per i conduttori. Un'ulteriore differenza consiste nella possibilità per i conduttori, e non per gli isolanti, di condurre la corrente elettrica.

1.4 Il chimico francese Charles Francis Du Fay e l' "elettricità positiva e negativa"

Un magnete cilindrico, sospeso ad un filo in corrispondenza del suo baricentro, è soggetto a rotazione, qualora si avvicini un secondo magnete. Studi metodici stabilirono che la forza di interazione fra i due magneti è attrattiva o repulsiva in base al tipo di poli, positivo o negativo, che interagivano. Un analogo fenomeno di natura elettrica fu notato anche nel 1733 dal chimico francese Charles Francis de Cisternay Du Fay ⁽⁷⁾ (1698-1739). Questi scoprì che, se elettrizzate per strofinio, due bacchette di vetro si respingevano a vicenda, mentre invece una bacchetta di vetro elettrizzata ne attraeva un'altra di ambra precedentemente strofinata. Queste proprietà del vetro e dell'ambra indussero, erroneamente, Du Fay a supporre l'esistenza di due tipi diversi di elettricità, quella "vetrosa" e quella "resinosa". Egli inoltre sottolineò la necessità di collocare i corpi da elettrizzare su supporti isolanti; questa precauzione è chiamata regola di Dufay.

⁷ Sovrintendente dei giardini reali del re di Francia.

Il comportamento dei magneti evidenziò, inoltre, che la forza esercitata dalla magnetite non poteva essere di origine elettrica; infatti la magnetite non era in grado di attirare piccoli corpuscoli, per cui si dedusse che essa era un corpo del tutto scarico dal punto di vista elettrico.

1.5 Prototipo del condensatore: la bottiglia di Leida

Nel XVIII secolo ebbe luogo il cosiddetto esperimento di Leida, che mise in evidenza, casualmente, la possibilità di accumulare la carica elettrica fra due conduttori separati da un isolante. L'esperimento fu eseguito quasi contemporaneamente ed indipendentemente nel 1745 dal tedesco Ewald Georg von Kleist e dal fisico olandese di Leida Pieter Musschengroek (1692-1761). Elemento fondamentale dell'esperimento fu la cosiddetta bottiglia di Leida (fig. 1.4), che consisteva nella sua forma primitiva in una fiala di vetro parzialmente riempita d'acqua, il cui orifizio era chiuso da un tappo di sughero attraversato da un filo metallico o da un chiodo sufficientemente lunghi, da essere in contatto col liquido.

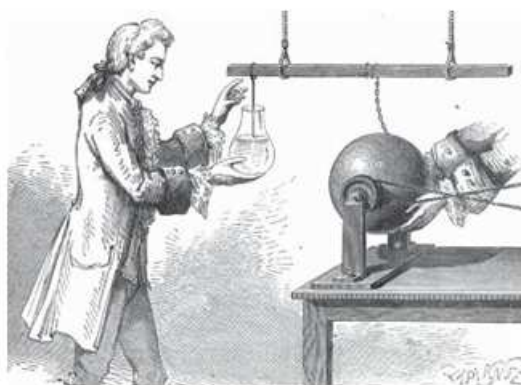


Fig. 1.4 - Bottiglia di Leida.

Lo scopo dell'esperimento consisteva nell'elettrizzare l'acqua contenuta entro il vaso di vetro; a tal fine, tenendo in mano la bottiglia, la parte sporgente del conduttore metallico (filo o chiodo) fissato sul tappo di sughero venne avvicinata all'elemento elettricamente carico di una macchina elettrica. Si osservò che lo sperimentatore, quando, ancora con la bottiglia in mano, toccava

per sbaglio con l'altra mano il filo metallico, era soggetto ad una violenta scossa in tutto il corpo. In una lettera ad un collega francese Musschengroek, che per primo aveva provato la suddetta scossa, scrisse che non avrebbe ripetuto l'esperimento, neppure per l'intero Regno di Francia. La bottiglia di Leida divenne così il primo condensatore della storia.

L'esperimento di Leida dimostrò che era possibile accumulare nella bottiglia parte della carica elettrica fornita dalla macchina elettrostatica; la carica elettrica accumulata aveva

inoltre notevole durata e maggiore intensità di quella generata fino ad allora con le macchine a globo di Guericke.

1.6 Lo studio dell' "elettricità atmosferica" da parte di Benjamin Franklin

All'americano Benjamin Franklin (1706-1790) si deve la scoperta della cosiddetta "elettricità atmosferica"; nel 1752 fece volare durante un temporale un aquilone munito di



Fig. 1.5 – Esperimento di B. Franklin del 1752.

una punta metallica, alla quale aveva attaccato un filo di seta in grado di condurre l'elettricità fino ad una chiave metallica sospesa ad esso e posizionata nelle immediate vicinanze del suo corpo (fig. 1.5). Quando toccò la chiave con la mano, scoccò tra di loro una vigorosa scintilla. Egli attese che la chiave si caricasse nuovamente e poi la usò per caricare una bottiglia di Leida, con risultati analoghi a quelli ottenuti caricandola

con una macchina elettrostatica. Con il suddetto esperimento dimostrò che le nuvole erano portatrici di cariche elettriche, le quali, scaricandosi a terra, generavano un'immensa scintilla, ovvero il fulmine; questo era una manifestazione dell'elettricità presente nell'atmosfera ("l'elettricità atmosferica"), che aveva la stessa natura dell'elettricità prodotta in laboratorio. Nel 1753 il fisico G. W. Richmann ripeté l'esperimento di Franklin e, a differenza di quest'ultimo, perse la vita, a causa dell'intensa scarica elettrica, che attraversò il suo corpo.

Nato a Boston dalla famiglia di un povero venditore di candele, Franklin nella sua intensa vita fu apprendista tipografo a 12 anni, inventore del parafulmine e della sedia a dondolo, filosofo, politico e diplomatico. Egli fu uno dei tre redattori della Declaration of Independence e fu il primo fisico famoso del Nuovo Mondo. Franklin affermava l'esistenza di un fluido immateriale (l'elettricità) in ogni corpo, impercettibile in condizioni normali, che con lo strofinio poteva essere trasportato da un corpo all'altro; quello che riceveva l'elettricità si caricava in senso positivo, l'altro in senso negativo. In base a queste considerazioni Franklin enunciò la legge di conservazione della carica elettrica e sostenne che l'attrazione

elettrica era dovuta alla tendenza verso la condizione di equilibrio, che poteva essere ristabilita da una scintilla (scarica). Tramite vari esperimenti egli spiegò il funzionamento della bottiglia di Leida ed affermò che si formava un eccesso superficiale di sostanza elettrica su di una faccia della parete di vetro ed un equivalente impoverimento sulla faccia opposta. Franklin scoprì che la bottiglia funzionava meglio, se rivestita sulla superficie esterna ed interna con sottili fogli metallici. Anche la forma della bottiglia era indifferente e dunque utilizzò delle semplici lastre di vetro ricoperte da fogli metallici su entrambe le superfici; questo dispositivo prese il nome di “quadro di Franklin” (⁸).

Considerando la concezione dell'elettricità di Franklin, è interessante notare che, sostituendo al termine fluido il termine elettroni e invertendo il senso di moto (l'ambra cede elettroni al vetro), si ottiene la moderna interpretazione del fenomeno.

Attualmente è noto che le scintille tra conduttori, e quindi anche i fulmini, sono causate dalla redistribuzione delle cariche elettriche, che avviene all'interno di un conduttore o tra conduttori diversi, per raggiungere una situazione di equilibrio elettrico; tuttavia va sottolineato che all'epoca le numerose teorie inerenti ai fenomeni elettrici erano confuse e, a volte, contrastanti.

1.7 L'induzione elettrostatica

Nel 1753 John Canton (1718-1772) osservò che un conduttore posto nelle vicinanze di un corpo carico, ma non in contatto con esso, presentava una carica elettrica di segno opposto a quella del corpo carico nella zona più vicina a quest'ultimo e una carica dello stesso segno nella zona più lontana. Questo fenomeno, attualmente sotto il nome di induzione elettrostatica, presentava una notevole differenza rispetto ai fenomeni fino ad allora sperimentati; infatti in questo caso non era necessario alcun contatto diretto, per elettrizzare un corpo.

⁸ Franklin fu anche il primo a parlare di cariche positive e negative, che possono neutralizzarsi a vicenda, al posto di elettricità vetrosa e resinosa.

1.8 Concezione erronea del fenomeno dell'elettricità: l'elettricità animale

Il fenomeno, per cui i muscoli della rana subivano una contrazione sotto l'azione dell'elettricità, fu osservato da Luigi Galvani (1737-1798), professore di anatomia a Bologna. Egli scoprì che, toccando con un bisturi il nervo crurale della zampa di una rana dissezionata, mentre veniva emessa una scintilla da una macchina elettrica vicina, i muscoli della zampa si contraevano violentemente. In seguito scoprì che lo stesso fenomeno avveniva utilizzando solo due conduttori metallici diversi, uno in contatto con un nervo e l'altro con un muscolo. Da ciò Galvani dedusse che un fluido elettrico veniva trasportato dal nervo al muscolo attraverso il metallo.

Nel 1771 Galvani affermò che la sorgente dell'elettricità, che faceva contrarre i muscoli della coscia della rana, risiedeva proprio nel suo organismo⁽⁹⁾. Questa tesi venne accettata da molti dagli scienziati dell'epoca, ma non da Alessandro Volta.

1.9 Avvio di uno studio scientifico dell'elettricità: dall'osservazione alla spiegazione razionale dei fenomeni elettrici

Nel 1770 i fenomeni elettrici statici erano ben noti. Si era a conoscenza che esistevano due

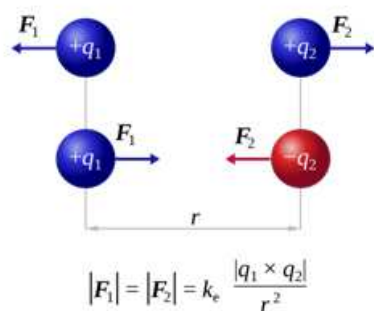


Fig. 1.6 - Legge di Coulomb.

tipi di cariche elettriche, che la carica elettrica si conservava (cioè che la somma delle cariche positive e di quelle negative è costante), che cariche di segno uguale si respingevano e che cariche di segno diverso si attraevano; si conoscevano inoltre le proprietà degli isolanti e dei conduttori. Tuttavia per il fenomeno dell'attrazione e repulsione mancava una legge di tipo quantitativo. Essa fu enunciata da Charles Coulomb (1736-1806) tra il 1784 e il

⁹ Galvani fu tratto in inganno dal fatto che alcuni pesci erano in grado di dare forti scosse ai loro assalitori.

1789 ⁽¹⁰⁾. Questi scoprì che le forze magnetiche e quelle elettriche seguivano la legge di Newton, cioè esse erano inversamente proporzionali al quadrato della distanza tra le cariche e direttamente proporzionali al prodotto delle cariche stesse (fig. 1.6). Coulomb, con i suoi lavori, diede il via ad uno studio scientifico dell'elettricità e del magnetismo, che alla semplice osservazione/constatazione di un fenomeno elettrico e/o magnetico affiancava una spiegazione razionale dello stesso.

La legge dell'inverso del quadrato della distanza permise una descrizione matematica dei fenomeni dell'elettrostatica. I grandi fisici matematici dell'epoca di Napoleone o di quella immediatamente successiva (P. S. Laplace e S. D. Poisson ⁽¹¹⁾ in Francia, G. Green in Inghilterra, C. F. Gauss in Germania e altri) svilupparono delle teorie matematiche dei fenomeni elettrostatici, che sono valide tuttora. Anche per il magnetismo vennero formulate teorie matematiche, ma, a differenza dell'elettricità statica, non furono mai osservate cariche magnetiche libere (monopoli), mentre furono osservati i dipoli con uguali "quantità" di magnetismo positivo e negativo.

¹⁰ Prima era stata individuata da Henry Cavendish intorno al 1770, che non si era dato cura di divulgarla.

¹¹ Dal 1811 Siméon Denis Poisson (1781-1840), ammettendo l'esistenza di un fluido elettrico positivo ed uno negativo, sviluppò la teoria dell'elettrostatica, riportata nel 1812 nella sua opera "Mémoire sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs", nella quale compare la funzione laplaciana del potenziale. L'anno successivo mostrò che tale funzione valeva solo esternamente ai corpi carichi; in seguito fornì un'espressione più generale della funzione laplaciana, nota come equazione di Poisson, valida anche all'interno dei corpi carichi. Egli pose le basi per una formulazione analitica della legge di attrazione di Coulomb e Cavendish. Poisson trattò anche il magnetismo, arricchendolo con il concetto di momento magnetico.

1.10 Primo generatore statico di corrente continua: la pila di Alessandro Volta



Fig. 1.7 - Pila di A. Volta.

Il fenomeno messo in evidenza da Galvani, ovvero la cosiddetta “elettricità animale”, fu analizzato da Alessandro Volta (1745-1827), professore di fisica a Pavia (¹²). Questi affermava che la fonte dell'elettricità non risiedeva nell'organismo vivente, ma era dovuta al contatto tra i due metalli diversi, con cui era costruita la pinza usata per toccare i nervi della coscia della rana.

Tra Volta e Galvani nacque così un lungo dibattito, che ebbe termine nel 1799, quando Volta realizzò un dispositivo per produrre elettricità, ovvero la pila (¹³) (fig. 1.7), con la quale dimostrò definitivamente la non validità della tesi sostenuta

da Galvani. Il suddetto dispositivo contribuì, inoltre, allo sviluppo degli studi dei fenomeni elettrici e magnetici.

Il principale limite delle macchine elettrostatiche dell'epoca era quello di non poter fornire in maniera continuativa energia elettrica; al contrario la pila di Volta permetteva di disporre di una corrente elettrica persistente. Grazie ad essa numerose furono le novità apportate alla chimica e alla fisica. La pila di Volta suscitò nei fisici dell'epoca notevole ammirazione, come testimoniato nel 1831 dal fisico francese Dominique François Arago (1786-1853), il quale affermò: "Questa pila, formata da coppie di metalli diversi separati da un poco di liquido è, per la singolarità degli effetti che produce, il più meraviglioso strumento mai inventato dal genere umano".

¹² Nei primi anni della sua attività Volta studiò la triboelettricità, che era ancora l'unico modo conosciuto per produrre elettricità. In una lettera del 1765 inviata a Beccaria Volta classificò le varie sostanze materiali secondo una scala, in cui il vetro era il più povero di “fuoco elettrico”, lo zolfo era il più ricco, mentre altre sostanze stavano in posizioni intermedie a seconda della loro relativa capacità di cedere o acquisire “fuoco elettrico”. Questo schema fu tuttavia vanificato da alcuni esperimenti di Beccaria, nei quali ad esempio il vetro scabro si comportava in modo opposto a quello lucidato.

¹³ Costituita da una successione ripetuta varie volte di un disco di rame, uno di zinco ed uno di panno bagnato.

1.11 L'esperienza di Oersted

L'ipotesi dell'esistenza di un legame tra il magnetismo e l'elettricità, a seguito della scoperta dei fenomeni di attrazione elettrostatica e magnetica, aveva attirato l'attenzione di vari studiosi; tuttavia, nessun fisico riuscì a stabilire la natura di questo legame. Nel 1820, grazie

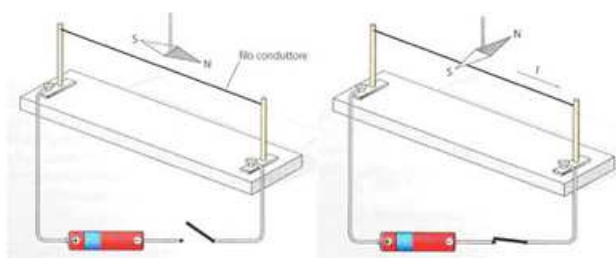


Fig. 1.8 - Esperimento di Oersted del 1820.

all'invenzione della pila di Volta, il fisico danese Hans Christian Oersted (1777-1851) notò un fenomeno molto singolare. Un ago magnetizzato posto nelle vicinanze di un filo, attraversato dalla corrente elettrica fornita da un dispositivo voltaico, veniva deviato dalla sua posizione di equilibrio (¹⁴). Oersted notò che il senso di deviazione cambiava, se si invertiva il verso di percorrenza della corrente, che attraversava il filo (fig. 1.8). Egli affermò che l'azione della corrente elettrica si faceva sentire nello spazio per mezzo di vortici (un'anticipazione del moderno concetto di campo magnetico).

A seguito di tale esperimento si poté affermare che l'elettricità e il magnetismo erano fenomeni correlati, in quanto una corrente elettrica era in grado di influenzare un ago magnetico attraverso la generazione di un campo magnetico.

Il 21 luglio 1820 Oersted inviò i suoi risultati all'Accademia delle Scienze danese e furono pubblicati col titolo "Experimenta circa effectum conflictum electrici in acum magneticum".

¹⁴ Esperienze simili, non divulgate adeguatamente, furono condotte nel 1802 da Gian Domanico Romagnosi.

1.12 Interazione magnetica tra due conduttori percorsi da corrente elettrica

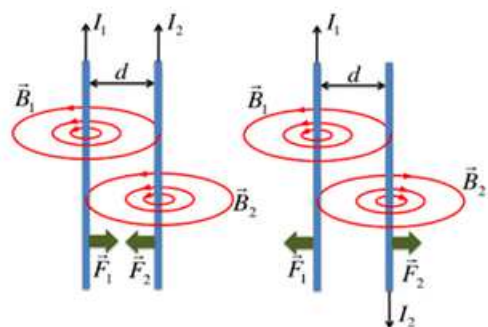


Fig. 1.9 - Interazione magnetica tra due conduttori percorsi da corrente elettrica.

Nel 1820 il fisico francese André Marie Ampère (1775-1836) osservò che due fili conduttori attraversati da una corrente elettrica esercitavano un'azione reciproca l'uno sull'altro. In particolare essi si attraevano, quando le correnti erano equiverse, mentre si respingevano, quando le correnti erano discordi (fig. 1.9). La forza, con cui i conduttori si attraevano o respingevano, era

direttamente proporzionale alle correnti ed inversamente proporzionale alla distanza fra i due fili rettilinei sufficientemente lunghi ⁽¹⁵⁾.

Grazie agli studi di Ampère furono possibili:

1. la magnetizzazione di aghi di acciaio, disponendoli all'interno di un avvolgimento di filo conduttore (solenoidi) percorso da corrente elettrica e soprattutto la spiegazione fisica del fenomeno (le correnti amperiane) ⁽¹⁶⁾;
2. la formulazione della legge matematica con cui interagiscono tra loro i fili conduttori percorsi da corrente elettrica, ovvero la legge che permette di determinare la forza con cui i fili di forma qualsiasi si attraggono o respingono;
3. l'esposizione di una regola semplice, per determinare, in presenza di un conduttore percorso da corrente, il senso di deviazione di un ago rispetto a un osservatore; ovvero un osservatore disteso parallelamente ad un conduttore rettilineo, in modo che la corrente scorra nel verso dai piedi alla testa, vede un ago magnetico disporsi col polo Nord alla sua sinistra e col polo Sud alla sua destra.

¹⁵ Contributi alle leggi, che determinano gli effetti magnetici in funzione delle correnti e delle distanze, vennero anche da Jean Baptiste Biot (1774-1862), Felix Savart (1791-1841) e in particolare da Pierre Simon Laplace, che, utilizzando il calcolo infinitesimale, determinò l'intensità del campo magnetico all'interno di un solenoide ed al centro di una spira circolare percorsi da corrente.

¹⁶ A tale risultato pervenne anche lo scienziato F. J. D. Arago (1786-1853).

In suo onore l'intensità di corrente elettrica si misura in ampere (simbolo A) ed è stata, inoltre, scelta come grandezza fondamentale per i fenomeni elettrici nel Sistema Internazionale (SI).

1.13 Effetti del campo magnetico su un conduttore percorso da corrente elettrica

Nel 1821 venne pubblicata una memoria da parte di Michael Faraday (1791-1867), nella quale egli mostrava come un campo magnetico esercitava una forza su di un conduttore percorso da corrente elettrica. Fece ruotare una sbarretta conduttrice sospesa ad un'estremità e con l'altra estremità immersa in un bagno di mercurio, così da poter condurre corrente elettrica, in presenza di un campo magnetico.

Faraday pose così le basi per la realizzazione del primo motore elettrico della storia; inoltre mostrò che tale rotazione poteva essere ottenuta anche sfruttando il debole campo magnetico terrestre.

A Faraday inoltre si deve il concetto, fondamentale nella teoria dell'elettromagnetismo, di "linea di forza", che è l'equivalente del moderno concetto di linea di campo.

1.14 L'elettrocalamita

La prima elettrocalamita fu costruita nel 1825 da William Sturgeon (1783-1850), il quale usò una corrente elettrica, per produrre una magnetizzazione ⁽¹⁷⁾. Questo dispositivo, che Sturgeon chiamò elettromagnete, era costituito da un pezzo di ferro dolce alto 5 pollici (circa 13 cm) piegato a forma di ferro di cavallo, sul quale era avvolto in diciotto spire, non impaccate, un filo di rame non isolato. Al passaggio della corrente il campo magnetico da essa prodotto, che circondava il filo, si canalizzava nella barra di ferro, la quale era così in grado di sollevare una quantità di ferro pari a circa venti volte il suo peso; nel momento in cui non circolava corrente, la barra cessava di essere un magnete.

L'elettrocalamita presenta alcuni vantaggi rispetto ad un magnete naturale, tra cui la possibilità di controllare il campo magnetico generato. Mentre un elettromagnete è,

¹⁷ Grazie all'elettrocalamita Sturgeon vinse un premio da parte della Royal Society. Nel 1820 anche lo scienziato F. J. D. Arago realizzò nel suo laboratorio il primo elettromagnete; tuttavia spetta a Sturgeon il merito della costruzione della prima elettrocalamita efficiente.

ovviamente, una sorgente di campo magnetico esclusivamente quando circola corrente elettrica nel suo avvolgimento (esso è per così dire una calamita momentanea), il magnete naturale è, invece, una sorgente di campo magnetico permanente e quindi non controllabile, dato che il campo magnetico è di origine naturale.

Un altro indubbio vantaggio dell'elettrocalamita consiste nel poter rinunciare al difficile taglio delle rocce di magnetite; infatti, grazie al confinamento magnetico delle linee di forza all'interno dei materiali ferromagnetici, è la forma del nucleo di ferro tra gli avvolgimenti a determinare la posizione dei poli magnetici e non il taglio della roccia a doversi conformare alla posizione naturale di questi ultimi.

1.15 Gli studi di George Simon Ohm sulla trasmissione dell'elettricità

Nella prima metà del 1800 il tedesco Georg Simon Ohm (1789-1854) sviluppò i suoi studi sulla trasmissione dell'elettricità nei corpi conduttori. Nel 1827 egli perfezionò il concetto di forza elettromotrice di un generatore di tensione, differenziandola dall'intensità di corrente elettrica, ed enunciò inoltre la legge, che mette in relazione le due grandezze tensione e corrente. La nota legge di Ohm afferma che la tensione V ai capi di un conduttore è direttamente proporzionale all'intensità di corrente I e pari al prodotto dell'intensità di corrente nel conduttore, per una grandezza caratteristica del conduttore stesso, indicata con la lettera R , alla quale Ohm diede il nome di resistenza. In formule: $V = RI$.

1.16 L'autoinduzione e l'induzione elettromagnetica

L'AUTOINDUZIONE

L'americano Joseph Henry (1797-1878) apportò alcune notevoli modifiche all'elettrocalamita inventata da Sturgeon; in particolare usò del filo di rame isolato, che permetteva di avvolgere sul nucleo di ferro un elevato numero di spire impaccate, senza il rischio del verificarsi di cortocircuiti grazie alla presenza dell'isolante tra le spire. Questo accorgimento, ovvero la presenza dell'isolante e quindi il maggior numero di spire, consentì di aumentare notevolmente l'intensità del campo magnetico prodotto, proporzionale al numero di spire, e permise ad Henry di realizzare nel 1831 un elettromagnete di non grandi dimensioni in grado

di sollevare una tonnellata di ferro. Durante i suoi lavori sugli elettromagneti lo scienziato americano osservò una scintilla, che si generava tra i poli dell'interruttore del circuito elettrico, che alimentava l'avvolgimento, ogni volta che egli interrompeva (apriva) il circuito. Questa osservazione gli permise nel 1829 di scoprire il fenomeno dell'autoinduzione, in base al quale in un circuito, a seguito della variazione temporale dell'intensità della corrente elettrica, che lo percorre, si genera una forza elettromotrice detta di autoinduzione.

In breve, secondo la legge dell'autoinduzione, quando un circuito viene chiuso, tramite un interruttore, la forza elettromotrice autoindotta è in grado di dare origine ad una corrente elettrica autoindotta, detta extracorrente di chiusura, che si somma algebricamente alla corrente "principale". Viceversa quando il circuito viene aperto, la forza elettromotrice autoindotta si manifesta come una elevata tensione in corrispondenza dei poli dell'interruttore ed essa può dar luogo ad una scintilla (scarica), soprattutto se tra i contatti è presente l'aria atmosferica; la relativa corrente elettrica autoindotta è detta "extracorrente di apertura".

Nel 1832 Henry pubblicò i suoi lavori, ma fu preceduto dalla pubblicazione degli studi che Faraday aveva condotto indipendentemente nel 1831.

L'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

Faraday scoprì l'induzione elettromagnetica nel 1831. Successivamente all'esperienza di H. C. Oersted - in base alla quale una corrente elettrica erogata da una pila di Volta produce un campo magnetico in grado di influenzare un ago magnetico posto nelle immediate vicinanze del filo conduttore percorso dalla corrente - venne avanzata l'ipotesi, di poter generare una corrente elettrica a partire da un campo magnetico e numerose furono le ricerche condotte in tale direzione.

Faraday era fermamente convinto della suddetta possibilità, ovvero di poter generare corrente elettrica con un campo magnetico, come testimoniato dal suo libro personale di appunti che riportava le parole "convert magnetism into electricity", ovvero tradotto alla lettera "convertire il magnetismo in elettricità". Tra i primi tentativi messi in atto, e non andati a buon fine, ci fu quello di ubicare nelle vicinanze di conduttori o di bobine dei

magneti fissi nello spazio. Egli credeva inizialmente che come le correnti elettriche erano in grado di produrre un campo magnetico intorno al conduttore che le trasportava, così i campi magnetici, agendo su un circuito elettrico, dovevano indurre in esso delle correnti elettriche. Altri esperimenti, simili ai primi, vennero condotti con magneti di maggiori dimensioni, ma non si ebbe alcun risultato positivo. Successivamente Faraday notò che la corrente elettrica indotta si manifestava solo in presenza di un movimento reciproco tra il magnete e il circuito elettrico; questa osservazione gli permise di scoprire il fenomeno dell'induzione.

Durante i suoi esperimenti Faraday riuscì anche a dimostrare che il movimento reciproco tra circuito e sorgente magnetica (magnete) non era l'unica causa dell'induzione, ma che anche un campo magnetico variabile nel tempo era capace di dar luogo allo stesso fenomeno. Quest'ultima constatazione liberava il fenomeno dell'induzione dal limite rappresentato dalla necessaria presenza, per la comparsa del suddetto fenomeno, di movimento reciproco tra la sorgente del campo magnetico ed il circuito elettrico.

A conclusione dei suoi esperimenti, Faraday formulò infine la legge dell'induzione: ogni volta che il flusso del campo magnetico concatenato con un circuito varia nel tempo (per moto relativo o per variazione temporale del campo magnetico o ancora per entrambi i fattori), si ha la comparsa nel circuito di una forza elettromotrice indotta e quindi di una corrente elettrica. Il verso di circolazione di tale corrente (legge di Lenz) fu oggetto di studio del fisico russo Emilij Christjanovic Lenz (1804-1865).

Faraday giunse alla scoperta dell'induzione tramite l'osservazione dei fenomeni nel loro complesso e non tramite l'utilizzo dei metodi analitici propri dei fisici francesi, come, ad esempio, Ampère. Egli infatti rifiutava la concezione atomistica, la quale divideva la materia in atomi e spazio vuoto, poiché riteneva insensato separare la materia dalle azioni da essa esercitate, che si estendevano in tutto lo spazio. Si rifece alla teoria atomica di G. R. Boscovich (¹⁸), affermando che la materia era composta da "centri", da cui si irradiavano

¹⁸ Autentico profeta della fisica moderna fu il gesuita Giuseppe Ruggero Boscovich (1711-1787) che, anticipando i tempi, nel 1758 aveva sviluppato una teoria non meccanica della materia, introducendo concetti quali la puntiformità delle particelle elementari e l'unità di tutte le forze fisiche. Egli pubblicò i suoi studi nel trattato "Theoria philosophiae naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium". Insoddisfatto del principio di attrazione di Newton, Boscovich introdusse l'idea che la materia era composta di punti fisici identici ed inestesi.

linee di forza, che riempivano tutto lo spazio; tali linee di forza avrebbero spiegato i vari fenomeni elettrici, magnetici e gravitazionali. In particolare, nel caso di un magnete, queste linee di forza potevano essere evidenziate con della limatura di ferro e Faraday considerava questo fatto come una prova sperimentale della loro esistenza. Egli riteneva che la materia fosse un continuum distribuito ovunque.

Sebbene Henry avesse realizzato prima di Faraday un esperimento con cui fu in grado di osservare il fenomeno dell'autoinduzione, di cui se ne riconosce la scoperta, per quanto riguarda il fenomeno dell'induzione il merito viene tuttavia attribuito a Faraday, in quanto egli comprese fino in fondo la causa dell'insorgere del fenomeno e pubblicò i risultati dei suoi studi anticipatamente ed indipendentemente.

1.17 Considerazioni sulla distribuzione superficiale dell'elettricità: gli schermi elettrostatici

Faraday non si limitò al solo studio dell'induzione, ma spaziò in molteplici campi come testimoniato per esempio dalle sue osservazioni sugli schermi elettrostatici del 1837-1838. Precedentemente Coulomb aveva messo in evidenza che le cariche si distribuivano sulla superficie dei corpi metallici, in accordo con un esperimento di Franklin, condotto su un recipiente metallico cavo, che aveva evidenziato la distribuzione della carica elettrica solo sulla superficie esterna e non su quella interna.

Si iniziò a comprendere che, per evitare il verificarsi di disturbi all'interno di una regione, causati da fenomeni elettrici aventi luogo all'esterno della stessa, era sufficiente avvolgere (racchiudere) la suddetta regione entro un involucro metallico, che fungeva così da schermo elettrostatico.

Lo stesso Faraday, durante i suoi studi sugli schermi elettrostatici, notò che campi elettrici, prodotti all'interno di una gabbia collegata al suolo, denominata successivamente gabbia di Faraday, non avevano alcun effetto sullo stato elettrico all'esterno e che, viceversa, un elettroscopio, posto all'interno della gabbia, non rilevava nessuno dei cambiamenti elettrici apportati alla parete esterna della gabbia; pertanto anche una gabbia era in grado di fungere da schermo elettrostatico. A proposito di quanto suddetto, si può notare che i tondini di ferro all'interno del cemento armato di un edificio, assimilabili nel loro insieme ad una grande

gabbia, sono in grado di assicurare la protezione elettrica degli esseri umani all'interno dell'edificio, quando questo è colpito da un fulmine.

Nel 1860 gli appunti elaborati da Faraday alla fine della sua carriera riportavano più di sedicimila osservazioni, meticolosamente numerate in successione e raccolte in volumi, che egli stesso abilmente rilegava, essendo stato da giovane un apprendista tipografo. Queste osservazioni, insieme ad altre, sono riportate nell'opera "Experimental researches in electricity".

1.18 La concezione Maxwelliana dell'elettromagnetismo

Successivamente alla scoperta sperimentale dei fenomeni legati all'induzione e in generale al campo elettrico e a quello magnetico, ci fu lo sviluppo della teoria matematica, alla quale contribuirono i tedeschi Karl Friedrich Gauss (1777-1855), Wilhelm Weber (1804-1891) e lo scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879).

In particolare a quest'ultimo scienziato si deve la completa e rigorosa formulazione matematica delle leggi alla base dei fenomeni elettromagnetici (specialmente di quelli inerenti all'induzione) attraverso equazioni semplici e sintetiche (note come equazioni di Maxwell), contenute nell'opera, pubblicata nel 1873, "Treatise on Electricity and Magnetism" (¹⁹). Le equazioni di Maxwell (²⁰) si possono considerare l'equivalente nell'elettromagnetismo delle equazioni di Newton nella meccanica classica. L'opera di Maxwell riassume in forma chiara e coordinata la teoria matematica che è alla base di tutti i fenomeni magnetici ed elettrici osservati fin dai tempi più antichi; inoltre a Maxwell si deve anche l'intuizione della corrente di spostamento e della conseguente propagazione delle onde elettromagnetiche. I risultati fondamentali dell'elettromagnetismo antecedenti alla teoria di

¹⁹ Maxwell fu particolarmente influenzato dal concetto di linee di forza e sviluppò la teoria del campo elettromagnetico traducendo in equazioni precise e quantitative le intuizioni di Faraday, con cui era stato in costante contatto personale durante la sua permanenza al King's College di Londra dal 1860 al 1865. Maxwell espresse in tutte le sue memorie il suo debito verso Faraday, ma andò oltre, riuscendo a compiere la prima grande unificazione delle leggi della natura, tra i fenomeni elettrici, magnetici e luminosi.

²⁰ Le equazioni di Maxwell richiedevano strumenti matematici nuovi per essere scritte, così Maxwell ricorse ai vettori per rappresentare geometricamente le grandezze fisiche ed introdusse gli operatori differenziali rotore e convergenza (oggi detta divergenza). A Heaviside, ed anche ad Hertz, che comunque riconobbe la priorità di Heaviside, dobbiamo la formulazione moderna delle equazioni di Maxwell e l'uso della notazione concisa tipica del calcolo vettoriale, che negli scritti di Maxwell era scomposta nelle singole componenti.

Maxwell possono così riassumersi:

1. ogni corrente elettrica genera un campo magnetico (come provato da Oersted), le cui linee di forza sono chiuse e si concatenano con la corrente stessa;
2. in un conduttore, che si muove tagliando le linee di un campo magnetico, si genera una forza elettromotrice;
3. un campo magnetico variabile nel tempo genera una forza elettromotrice, ovvero un campo elettrico indotto, le cui linee di forza avvolgono quelle del campo magnetico.

Nelle leggi sopra riportate compare evidentemente un'asimmetria tra campo elettrico e campo magnetico, ovvero è il solo campo magnetico, che, variando nel tempo, è in grado di produrre un campo elettrico indotto. Maxwell predisse il risultato simmetrico a quello descritto da Faraday e cioè che campi elettrici variabili nel tempo danno origine a campi magnetici anch'essi variabili mediante la corrente di spostamento. La nuova previsione di Maxwell introduceva una simmetria tra i campi elettrico e magnetico, ma la conseguenza più rilevante della suddetta ipotesi, per il gran numero di applicazioni che ne derivarono, fu la propagazione tramite onde elettromagnetiche.

In conclusione è possibile riassumere sinteticamente i concetti su esposti come segue. Si consideri un filo conduttore rettilineo percorso da una corrente alternata a partire da un dato istante. Quest'ultima genera nello spazio circostante un campo magnetico variabile nel tempo in modo alternato, le cui linee di forza avvolgono il filo conduttore rettilineo. Questo campo magnetico alternato non si instaurerà istantaneamente ovunque, ma coinvolgerà dapprima la regione di spazio vicina al filo e successivamente lo spazio più lontano, come si comportano le onde sulla superficie dell'acqua di uno stagno in seguito al lancio di un sasso. Il campo magnetico variabile, che avvolge il filo, genera a sua volta un campo elettrico variabile di tipo alternato, il quale è seguito da un campo magnetico e così via. Si genera infine intorno al filo un'onda elettromagnetica costituita da un campo elettrico e uno magnetico strettamente correlati.

La teoria elettromagnetica di Maxwell non si affermò facilmente tra i fisici dell'epoca, non solo per la sua complessità da un punto di vista matematico e per la difficile verifica sperimentale, ma anche per la presenza di altre teorie fondate sulle concezioni Newtoniane. Un riscontro sperimentale della teoria di Maxwell si ebbe circa vent'anni dopo la sua previsione, nel 1887, ad opera di H. R. Hertz.

1.19 Le onde elettromagnetiche

Nel 1887 il fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) fu in grado di generare onde elettromagnetiche di intensità tale da poter essere rilevate. Il lavoro scientifico di questo scienziato, deceduto prematuramente per una forma di cancro alle ossa, è frutto dell'accostamento di una notevole capacità analitica alle sue singolari doti di sperimentatore.

Al fine di generare onde elettromagnetiche, era necessario sia disporre di un circuito in corrente alternata di frequenza molto elevata, condizione necessaria per produrre campi elettromagnetici di intensità apprezzabile, sia fare in modo che tale circuito fosse effettivamente in grado di irradiare; inoltre era necessario un rivelatore. Quest'ultimo poteva essere costituito da un pezzo di filo metallico circolare con una piccola apertura, in cui appariva una scintilla, quando veniva eccitato da un'onda elettromagnetica. Grazie alla suddetta strumentazione Hertz misurò la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica e dimostrò la sua natura ondulatoria e la sua propagazione alla stessa velocità della luce, in completo accordo con la teoria di Maxwell. Hertz, quindi, sostenne che questi suoi esperimenti costituivano una valida conferma della teoria del fisico scozzese, ormai morto da otto anni.

CAPITOLO II

STORIA DELL'INGEGNERIA ELETTRICA TRA LA SECONDA META' DELL'OTTOCENTO ED I PRIMI ANNI DEL NOVECENTO CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL'ITALIA

2.1 La telegrafia: prima vera realizzazione elettrotecnica

I primi apparecchi di telegrafia elettromagnetica, i cosiddetti telegrafi, apparvero tra il 1820 e il 1830, ma non poterono essere messi in funzione per l'assenza di generatori in grado di produrre energia elettrica in modo continuativo. Nel 1836 J. F. Daniell risolse tale problema con l'invenzione della pila a due liquidi con depolarizzante a solfato di rame, grazie alla quale l'americano Samuele Morse l'anno seguente mise in funzione il suo telegrafo elettromagnetico; prima di Morse altri telegrafi elettromagnetici del tipo ad aghi e quadranti furono ideati dall'inglese W. F. Cooke e dal tedesco K. A. Steinheil, il quale aveva ipotizzato la possibilità di utilizzare la "terra" come conduttore di ritorno.

La prima vera realizzazione elettrotecnica avvenne nel 1838, si trattava della prima versione del telegrafo elettrico di Charles Wheatstone, costituito da sei fili su due chilometri di linea della Great Western Railway presso Londra; successivamente tale versione venne migliorata in un sistema ad un solo filo. Tuttavia ebbe maggiore successo la prima applicazione del telegrafo scrivente di Morse, realizzata nel 1844 sulla linea Baltimora - Washington.

Nel 1845 nacque la prima società, The Electric Telegraph Co, per la costruzione dei telegrafi. Le applicazioni seguirono e si moltiplicarono in tutto il mondo. L'Italia partecipò attivamente a tale sviluppo, tant'è che nel 1846, per iniziativa del fisico C. Matteucci di Pisa, fu inaugurata la linea Pisa - Livorno, presto seguita da altre. La telegrafia divenne in tal modo la prima industria elettrotecnica.

Ulteriori sviluppi portarono alla comparsa e all'utilizzo dei cavi sottomarini, di cui il primo fu posato nel 1851 fra Dover e Calais e fu seguito presto da altri nel Mar Nero e nel Mediterraneo. Nel 1866 venne posato il primo cavo telegrafico transatlantico, di lunghezza pari a circa 4000 km, fra Valentia (Irlanda) e Terranova (America Settentrionale) ad opera di un gruppo di investitori americani ed inglesi con la consulenza di sir W. Thomson. Da

principio si ebbero difficoltà di funzionamento; tuttavia superati questi ostacoli, il primo cavo transatlantico fu seguito presto da altri, tutti di compagnie inglesi. L'industria elettrotecnica della telegrafia acquisì notevole importanza, data anche dal notevole costo dei cavi transatlantici.

2.2 I primi generatori di energia elettrica

I primi modelli di macchine elettriche ⁽²¹⁾ si devono a M. Faraday ed a P. Barlow (fig. 2.1).

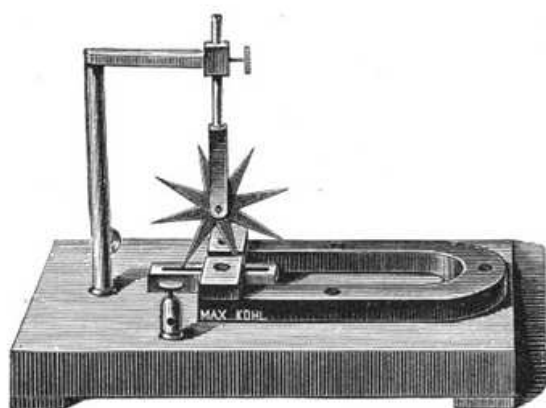


Fig. 2.1 - Ruota di P. Barlow del 1822, archetipo dimostrativo di un motore omopolare.

H. Pixii ⁽²²⁾ nel 1832 realizzò una macchina magnetoelettrica con un fascio di magneti, che ruotavano, e un indotto in forma di elettromagnete fisso. Vi furono vari tentativi per incrementare la potenza della macchina di Pixii tra cui quello di Saxton, il quale introdusse una variante, ovvero tenne fisso il fascio di magneti, facendo ruotare l'elettromagnete indotto e aggiungendo un collettore per

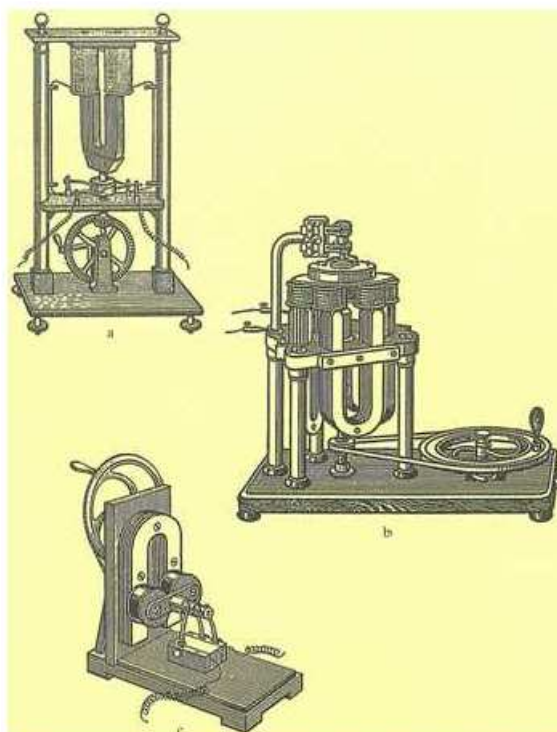


Fig. 2.2 - Macchine di Pixii (a), di Saxton (b) e di Clarke (c).

²¹ In epoca vittoriana si attribuivano virtù terapeutiche all'elettricità, per cui le macchine elettriche venivano impiegate per immettere elettricità nel paziente, che allo scopo si collegava con le mani ai morsetti. Quanto alla regolazione essa avveniva normalmente agendo sulla velocità, oppure, in configurazioni più evolute, shuntando con un nucleo ferromagnetico supplementare una quota parte del flusso di eccitazione.

²² H. Pixii era un costruttore di strumenti strettamente legato all'Accademia delle Scienze di Parigi. Questi si propose di dimostrare la decomposizione dell'acqua mediante l'elettricità. Tale decisione fu cruciale, perché, imponendo necessariamente un immediato perfezionamento costruttivo, condusse ad approfondimenti ed a conclusioni decisive. Fu infatti necessario, al fine di rendere adeguatamente più elevata la tensione ai morsetti, adottare magneti permanenti più forti e di forma via via perfezionata. Nel contempo si dovette aumentare il numero di spire delle bobine, evolvendo in tal modo verso l'idea stessa di avvolgimento distribuito.

raccogliere correnti raddrizzate. In miglior modo lo stesso principio fu utilizzato nella macchina di E. M. Clarke, che dal 1835 in poi è stata costruita per usi medici e non è ancora uscita dall'uso. Qualche tempo dopo la macchina di E. Stöhrer, costruttore di Lipsia, la quale era come una Clarke moltiplicata, segnava il passaggio alle macchine industriali.

Tra le prime suddette macchine industriali è da menzionare la grande macchina magneto-elettrica del belga abate Nollet (1850) con 48 fasci di magneti, disposti in 16 corone, e due corone con 16 bobine indotte ciascuna; questa macchina, con varie modifiche, fu costruita dal 1855 in poi per opera della società belga l'Alliance e fu utilizzata industrialmente per l'illuminazione dei fari; essa rese servizi importanti a Parigi durante l'assedio del 1870 ⁽²³⁾.

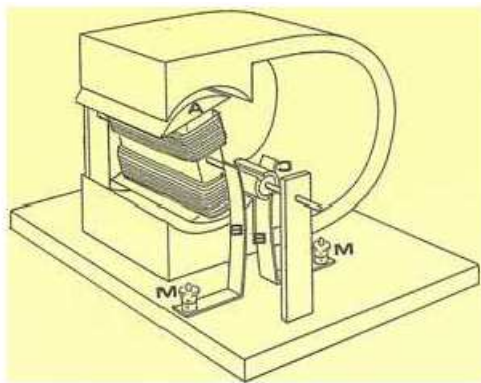


Fig. 2.3 - Indotto a doppio T di von Siemens.

La casa Siemens & Halske di Berlino, nata nel 1847 ad opera di Werner von Siemens e di J. G. Halske, per ovviare alle grandi dimensioni delle prime macchine e alla relativa bassa potenza, introdusse l'indotto a doppio T (fig. 2.3), ideato da Werner von Siemens fin dal 1857; in tal modo si ottenevano potenze significative con macchine di piccolo peso

e volume. Le macchine con indotto Siemens furono impiegate estesamente negli apparecchi di segnalazione ferroviaria e applicazioni simili; quasi senza modifiche, esse sono ancora in uso per le stazioni telefoniche e per l'accensione dei motori a scoppio.

Nel 1866 l'inglese H. Wilde ideò una macchina “duplice” composta di una magneto-elettrica Siemens, funzionante da eccitatrice e avente per induttore un elettromagnete invece che un magnete permanente, sovrapposta a una macchina analoga, ma molto più grande. Il Wilde sperimentò potenze mai raggiunte fino allora e perciò decise di costruire una macchina “triplice”, poi usata per l'illuminazione di stabilimenti industriali ⁽²⁴⁾.

²³ Attraverso numerose difficoltà la Alliance approdò successivamente a più versioni dell'idea originale di Nollet. Si trattava di macchine a basso rendimento, la cui potenza non era superiore ai 2 kW, nonostante il peso raggiungesse anche le 2 tonnellate.

²⁴ Wilde lesse nel 1866 davanti alla Royal Society una memoria, nella quale veniva precisato che una macchina, dotata di elettromagneti, poteva sviluppare una potenza sensibilmente maggiore di quella prodotta, a parità di ogni altra condizione, da una con magneti permanenti. In un suo esperimento egli provò la sua affermazione, giungendo a realizzare una versione, in cui la potenza risultava ben otto volte maggiore. Vi è da osservare che

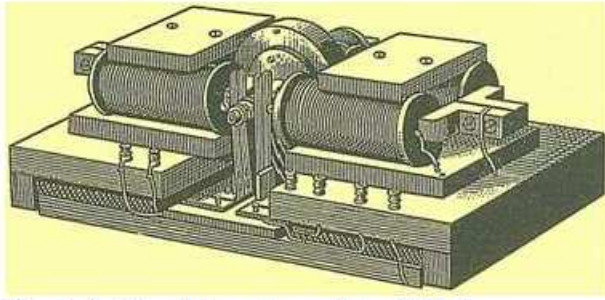


Fig. 2.4 - Macchina autoeccitata di Varley.

Nel 1867 i fratelli F. S. e S. A. Varley, sir Charles Wheatstone a Londra e Werner von Siemens a Berlino diedero il via al cosiddetto principio dell'autoeccitazione. Essi mostrarono, che una macchina, avente un elettromagnete invece che un magnete come induttore, può adoperare una frazione dell'energia elettrica ricavata nell'indotto

per mantenere eccitato l'elettromagnete. È questo il principio, che ha permesso da allora in poi di ottenere macchine generatrici di grande potenza; per le potenze molto piccole invece (come è il caso delle macchinette d'accensione dei motori a scoppio) era da preferirsi l'induttore a magnete permanente. Le macchine dinamo-autoeccitrici (fig. 2.4) con indotto a doppio T furono costruite da allora in avanti per opera della Siemens & Halske. La diffusione, che esse incontrarono per trasmissioni di segnali, esploditori di mine e piccole illuminazioni, fu così grande da formare una delle prime fonti di guadagno di quella casa (²⁵). Un problema all'aumento di potenza era quel particolare tipo di indotto, che, imponendo il raddrizzamento della corrente mediante interruzione, non permetteva di arrivare a correnti intense; questo ostacolo non fu superato nemmeno con la macchina americana di C. F. Brush, né coi motori elettrici di Page, T. Davenport, M. H. Jacobi.

tali idee erano già state espresse da Wheatstone e da Cooke, i quali, pur senza far eseguire poi esiti applicativi, nel 1845 avevano brevettato un magnete voltaico da utilizzarsi nei telegrafi.

²⁵ In Prussia le macchine Siemens furono usate anche per azionare le perforatrici delle miniere. I fratelli Siemens erano d'altra parte direttamente interessati al problema, perché nel 1863 avevano acquistato una miniera di rame nel Caucaso. Tale impiego alternativo fu tuttavia significativo, perché dal 1877 al 1882 attivò un'intensa e fruttuosa ricerca in tale direzione. La stessa prima ferrovia sperimentale del 1879 fu impiegata dai Siemens proprio nelle gallerie delle loro miniere. Impieghi paralleli si ebbero poi, sempre in Prussia, negli impianti di galvanostegia.

2.2.1 L'anello di Pacinotti



Fig. 2.5 - Antonio Pacinotti (1841-1912).

di un apparecchio capace di fornire corrente continua senza bisogno di ricorrere a un organo separato di commutazione. Tale organo rappresentava, per i suoi svariati difetti, il maggior ostacolo all'applicazione pratica delle macchine generatrici di corrente. Si deve all'invenzione, da parte del Pacinotti, dell'indotto cilindrico dentato ad anello (1864), a tamburo (da lui detto gomitollo) e del commutatore - che permette di ottenere correnti

continue quasi costanti senza effettuare interruzioni nel circuito - lo sviluppo della grande

Antonio Pacinotti ⁽²⁶⁾ (1841-1912) (fig. 2.5) era figlio di Luigi Pacinotti (1807-1891), uno dei fisici che avevano fondato nell'Università di Pisa la prima scuola italiana di fisica. Il Pacinotti, durante la costruzione di un galvanometro, concepì e realizzò attorno al 1860 un anello di materiale magnetico avvolto da un circuito chiuso ⁽²⁷⁾ (fig. 2.6, b). Questo dispositivo rappresentava la soluzione, scientifica e tecnica, che permetteva la costruzione

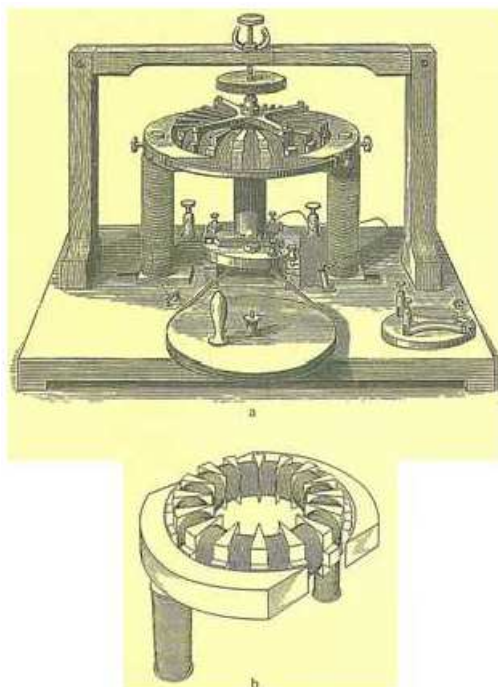


Fig. 2.6 - Macchinetta di Pacinotti (a), anello di Pacinotti (b).

²⁶ Laureato in matematica, il Pacinotti si era formato a Pisa sui testi di elettromagnetismo del A. De La Rive, il fisico matematico a cui l'Ecole aveva affidato il compito di un primo chiarimento sugli esperimenti di H. C. Oersted.

²⁷ Nel dettaglio la macchina era dotata di un anello costituito da filo di rame isolato, avvolto a spirale su un anello di ferro e messo a nudo lungo il fianco esterno delle varie spire in tal modo ottenute. Le 2 estremità del filo erano poi cortocircuitate fra loro e l'anello, posto in presenza dei poli di una calamita, era montato su una ruota ad asse verticale. Due spazzole infine erano poi collocate in posizione diametralmente opposta, proprio in corrispondenza della parte preventivamente non isolata delle bobine. Queste, facendo girare la ruota, divenivano sede di f.e.m indotte. La presenza di un numero elevato di spire consentiva la generazione di tensioni molto più ampie di quelle che, pur sullo stesso principio, erano state fin qui ottenute. Inoltre, come d'altra parte già in alcune macchine precedenti, la presenza di un collettore a lame multiple consentiva alla tensione unidirezionale di avvicinarsi realmente all'andamento stazionario proprio dell'invenzione voltiana.

elettrotecnica. Pacinotti era consapevole dell'importanza della sua invenzione, tuttavia, come è noto, non brevettò, né costruì industrialmente la sua macchina.

2.2.2 La macchina generatrice di Gramme

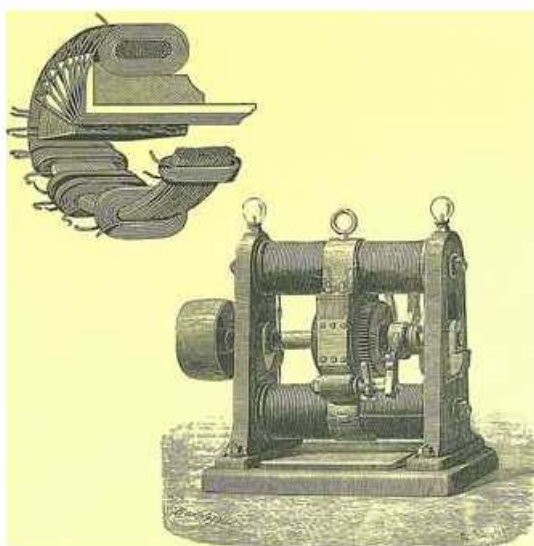


Fig. 2.7 - Collettore e macchina dinamoelettrica di Z. T. Gramme.

Nel 1869 Zénobe Théophile Gramme (1826-1901), tecnico belga, brevettò una macchina generatrice (fig. 2.7), in cui l'anello di Pacinotti era il componente fondamentale. Gramme divenne rapidamente uno dei principali costruttori di macchine elettriche del mondo. Seguì una lunga disputa circa i meriti di Gramme e di Pacinotti; quest'ultimo alla fine ricevette il riconoscimento dovutogli da parte della comunità scientifica internazionale, ma i vantaggi economici furono tutti del tecnico belga.

Altri costruttori seguirono l'esempio di Gramme tra cui la casa Siemens & Halske, che avviò la costruzione di dinamo con indotto Hefner-Alteneck a tamburo, derivato dall'avvolgimento a gomitolino di Pacinotti. Prese inizio in tal modo la produzione di svariati tipo di dinamo (anelli piatti, macchine con indotto superiore, macchine a poli conseguenti) e l'industria dei generatori di elettricità e delle loro applicazioni per l'illuminazione ad arco e per la galvanoplastica si andò sviluppando molto rapidamente.

2.2.3 Storica disputa tra il Pacinotti e il Gramme

Inviato a Parigi dal Matteucci, allora ministro della Marina, il Pacinotti colse l'occasione per tentare di divulgare la sua idea nella speranza di poterla realizzare. Ivi egli incontrò il belga Z. T. Gramme, che ricopriva la qualifica di capo alle officine Froment. Questi pensò di combinare l'idea del fisico italiano, del quale nel seguito avrà cura di non farne mai il nome, con quella dell'autoeccitazione da poco introdotta da von Siemens. Con l'intento di allontanarsi dal modello originario del Pacinotti, egli presentò la sua invenzione attraverso schemi interpretativi distinti da quelli di partenza. Essi però risultarono subito, e l'evidenza

sperimentale lo confermò, in palese contrasto con l'induzione di M. Faraday. In tal modo egli non solo si rivelò disonesto, ma mostrò anche di non aver saputo comprendere né la legge dell'induzione né, di conseguenza, il principio stesso della macchina a collettore. Il tecnico belga peggiorò inoltre la struttura originaria, sostituendo l'indotto dentato del fisico pisano con un cilindro liscio; soluzione questa assai meno felice, soprattutto dal punto di vista meccanico.

In definitiva, come G. Giorgi ha osservato, il Gramme finì per essere apprezzato per un principio, che non era il suo, che tuttavia propose come tale e che comunque non seppe comprendere. Ebbe tuttavia il merito di produrre industrialmente la macchina ed il merito di riunire l'anello del Pacinotti con lo schema ad autoeccitazione del Siemens, pervenendo in tal modo ad un'idea effettivamente concreta e feconda sul piano applicativo. Infine perfezionò ulteriormente questa configurazione, passando quasi subito alle strutture multipolari.

Il Siemens riconobbe al Pacinotti la paternità ufficiale dell'idea ed all'Expo di Vienna del '75 gli fece attribuire la medaglia d'oro dell'esposizione. Nel 1881, a Parigi, il Pisano esibì i suoi modelli originali ed ottenne il meritato trionfo. Edison, in particolare, volle una copia esatta della macchina. Tra gli onori tributatigli sono da menzionare quelli di H. von Helmholtz, G. R. Kirchhoff, E. W. Siemens, L. Kelvin, J. W. S. Rayleigh. La giuria non solo gli riconobbe merito e priorità, ma gli conferì il diploma d'onore ed una decorazione da parte del presidente della Repubblica. Il Siemens si accertò inoltre che tale priorità gli fosse riconosciuta, oltre che in Germania, anche in Inghilterra.

2.2.4 Difficoltà inerenti alla progettazione delle macchine elettriche

Nell'ambito della progettazione delle macchine elettriche mancava una teoria consolidata, la quale andò affermandosi, quando fu resa disponibile da parte di H. A. Rowland la prima teoria sui circuiti magnetici e fu introdotta la nozione di resistenza magnetica, denominata successivamente da O. Heaviside riluttanza. Tra coloro, che perfezionarono la suddetta teoria, si debbono in particolare ricordare il prof. J. Hopkinson, docente di ingegneria elettrica al King's College, ed il prof. G. Kapp, docente ad Edimburgo. Nel 1879 l'Hopkinson introdusse la nozione di curva caratteristica della dinamo e proseguì il suo approfondimento. Gli esiti complessivi, cui egli approdò, furono resi noti nel 1886 presso la Royal Society con una pubblicazione dal titolo "Dinamo Electric Machines". Tale pubblicazione risolveva

scientificamente e nel dettaglio esecutivo il progetto delle dinamo. Hopkinson, molto legato a Maxwell, fu influenzato dal suo “Trattato”, che egli costantemente usò come base per la sua progettazione della dinamo.

Tra l’85 e l’87 G. Kapp pubblicò alcuni articoli, in cui, analizzato preventivamente il campo magnetico di una grande varietà di dinamo, forniva esplicitamente ed in forma applicativa le varie equazioni di dimensionamento.

I suddetti risultati, insieme con quelli di Hopkinson, risolvevano in modo scientifico e nel dettaglio il problema del progetto delle dinamo. In essi, ormai superato l’approccio empirico, veniva mostrato come la caratteristica di una macchina potesse essere già completamente predeterminata in fase progettuale. Successivamente gli studi di Kapp ed Hopkinson vennero presi in considerazione per la teorizzazione ed il dimensionamento di tutte le macchine.

2.3 L’Esposizione Universale di Parigi, un’opportunità per l’elettrotecnica italiana

L’Esposizione internazionale di elettricità di Parigi del 1881 (fig. 2.8) rappresentò



Fig. 2.8 - Esposizione universale di Parigi del 1881.

un’opportunità per l’elettrotecnica italiana, durante la quale Giuseppe Colombo ⁽²⁸⁾ (1836-1921), tecnico-imprenditore lombardo, mostrò vivo interesse per il sistema di illuminazione di Thomas A. Edison (1847-1931). Alla suddetta esposizione di Parigi le lampade ad incandescenza costruite da T. Edison, da Maxim, da Swan, da Lane-Fox e da altri, ebbero grande successo e permisero l’avvio dell’illuminazione

elettrica domestica.

²⁸ Al Colombo si deve la nascita della Edison di Milano, cioè la nascita di una vera e propria industria elettrica in Italia.

2.4 Prime applicazioni industriali dei generatori: le centrali elettriche

2.4.1 Il caso Edison

T. A. Edison, successivamente all'esposizione di Parigi, diede inizio alla distribuzione di energia elettrica da centrali elettriche per mezzo di reti di distribuzione a tensione costante, sulle quali gli utenti erano connessi in derivazione. Tale metodo di connessione in derivazione è divenuto poi di uso comune, sostituendo quello di connessione in serie (²⁹).

Le prime due centrali elettriche Edison per l'illuminazione pubblica furono quella di Appleton nel Wisconsin, che alimentava 250 lampadine, e quella di Pearl Street a New York con 4 motrici a vapore da 125 HP e 4 dinamo. Edison aveva costruito tali centrali in modo innovativo per raggiungere la potenza, fino ad allora insuperata, di 80 kW per macchina. Ambedue queste centrali furono inaugurate nel 1882. Le particolari innovazioni di Edison furono l'armatura - del tipo a tamburo, non più avvolta con fili ma con sbarre conduttrici assicurate meccanicamente e solidamente attraverso le perforazioni del nucleo - e gli induttori, che erano formati con fasci di elettromagneti paralleli, sottili e lunghi.

Successivamente l'americano H. A. Rowland, resosi conto che le macchine di Edison non raggiungevano la potenza desiderata, introdusse la nuova teoria dei circuiti magnetici ed il tedesco G. Kapp e i due fratelli inglesi J. e E. Hopkinson (come già riportato precedentemente) fornirono indicazioni per la progettazione delle macchine dinamo. Secondo tali dettami il sistema induttore doveva avere bassa riluttanza magnetica e quindi essere grosso e corto, anziché sottile e lungo. A seguito di queste nuove teorie Edison realizzò le sue nuove dinamo, massicce e robuste, ottenendo le stesse potenze iniziali, ma con un peso, un volume e un costo di gran lunga minori. Successivamente al consolidamento razionale della teoria le fabbriche aumentarono e realizzarono su vasta scala macchine di elevata potenza.

²⁹ La figura di Edison non era ben vista. Lo stesso Galileo Ferraris (1847-1897), destinato di lì a poco a meritarsi la fama di grande elettrotecnico, fu inizialmente molto cauto a proposito del sistema Edison. Quanto vide all'Esposizione Universale di Parigi gli fece però mutare in parte opinione. Espresse, infatti, grande ammirazione per la macchina generatrice di Edison, mentre non lo convinse il sistema di distribuzione dell'energia elettrica dell'americano, affidato al controllo umano e perciò soggetto a errori e disattenzioni.

Nel 1890 l'industria di fabbricazione del macchinario elettrico e quella di produzione e di distribuzione dell'elettricità erano ben consolidate, per quanto non "standardizzate". Macchine dinamo, ad anello piatto, a tamburo allungato, a poli interni, a poli conseguenti, bipolari e più raramente multipolari, si contendevano il mercato con diverso successo. Per quanto atteneva invece alla situazione degli impianti di distribuzione dell'elettricità sull' "Electrical World" erano citati 50 diversi tipi d'impianti con lampade ad arco in serie e misti; tuttavia il sistema con distribuzione in derivazione a tensione costante prese rapidamente il sopravvento in tutto il mondo.

Nel 1890 la compagnia Edison a New York gestiva 5 stazioni produttrici con una potenza complessiva di 3600 kW, quasi tutta impiegata nell'illuminazione elettrica a incandescenza. In Europa si affermarono molte case produttrici di materiale elettrico, di crescente importanza, fra cui in Germania la Siemens - Halske, la Schuckert, la Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft, la Helios, in Inghilterra la Siemens Bros, la Brush, la Crompton, in Ungheria la Ganz, in Svizzera la Oerlikon, la Thury. In particolare in Italia si ebbero tre costruttori di dinamo: la Compagnia Edison, il Tecnomasio e l'Officina Rivolta.

Dal 1883 al 1890, sotto iniziativa delle suddette case produttrici, vennero realizzati gli impianti elettrici nelle principali città europee. Il sistema a corrente continua a 110 V, adottato da Edison in America, era stato realizzato nella maggior parte delle città europee quali Milano, Berlino, Colonia, Amburgo, Hannover, Elberfeld, in alcune centrali di Londra, Parigi, Napoli, ecc. In molti di questi impianti si ebbero i primi dispositivi regolarizzatori ed egualizzatori del carico, ovvero le batterie di accumulatori (³⁰).

³⁰ Gli accumulatori furono inventati da G. Planté, che li preparò con lastre di piombo immerse nell'acqua acidulata e sottoposte a formazione attraverso numerose serie di cariche e scariche, e perfezionati da C. A. Fauré, che immaginò di abbreviare il processo di formazione applicando preventivamente uno strato di ossido di piombo. Gli accumulatori dopo questa fase non subirono più perfezionamenti importanti e conservano ancora oggi le primitive caratteristiche.

2.4.2 La centrale di via Santa Radegonda in Milano

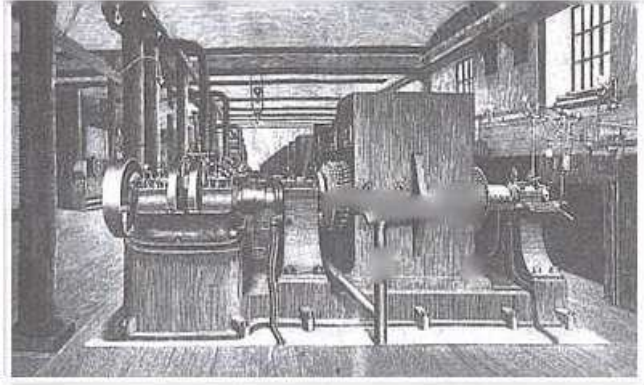


Fig. 2.9 - Centrale di via Santa Radegonda (Milano).

L'entrata in funzione della storica centrale Edison di via Santa Radegonda a Milano nel 1883 (fig. 2.9) segnò l'avvio di un periodo caratterizzato da un proliferare diffuso di iniziative nel campo della produzione dell'energia elettrica, che riflettevano lo stato di una tecnologia in vorticoso mutamento. La centrale era situata in un edificio a tre piani di

dimensioni 49,3 m x 14,2 m ed era munita di sistema Edison in corrente continua a tre fili con dinamo mosse da motori a vapore. La suddetta centrale alimentava all'interno della cerchia dei Navigli, su distanze non superiori ai 1000 m, gli impianti di illuminazione pubblica, in particolare i portici di piazza Duomo. L'impianto fu ampliato nel 1886 con 2 alternatori monofase da 100 kW e 200 V per alimentare il teatro Dal Verme. In seguito, per esigenze di incremento dell'illuminazione, fu installato un altro impianto simile in via Gian Battista Vico.

2.5 La figura di Galileo Ferraris, primo vero elettrotecnico italiano



Fig. 2.10 - Galileo Ferraris (1847-1897).

Notevoli contributi italiani furono apportati da parte di G. Ferraris ⁽³¹⁾ (fig. 2.10) al processo di sviluppo tecnico. Il suo primo importante contributo riguarda il trasformatore. Tale macchina fu presentata da Lucien Gaulard e John Gibbs all'Esposizione internazionale di elettricità di Torino del 1884 ed attirò l'interesse del Ferraris, soprattutto per quanto atteneva al suo funzionamento, per il quale non esisteva ancora alcuna teoria. Messosi a studiare il trasformatore, alla fine del 1884 Ferraris presentò una spiegazione teorica, quasi definitiva, dei principi di funzionamento. Ai fini del

calcolo del rendimento della macchina, egli elaborò l'importantissima espressione moderna della potenza elettrica in corrente alternata.

L'anno successivo effettuò la scoperta di maggior rilievo, ovvero il motore a campo rotante ⁽³²⁾. Lo studioso italiano realizzò un prototipo, ma non prese alcun brevetto, e solo nel 1888 si decise a pubblicare una memoria in merito. Il motore di Ferraris rappresentava un enorme passo avanti nel campo dell'elettrotecnica, perché forniva una soluzione per molti versi ottimale al problema della trasformazione dell'energia elettrica alternata in energia meccanica. In poco tempo si rivelò decisivo, non solo per le sorti della disputa tra l'uso della

³¹ Il 29 settembre 1869 G. Ferraris ottenne la laurea in ingegneria civile al Politecnico di Torino con una tesi dal titolo: "Sulle trasmissioni telodinamiche di Hirn". Nel 1887 G. Ferraris aveva avviato un corso speciale di elettrotecnica, poi formalizzato nel 1888 con Regio Decreto. Esso si sarebbe rivolto ai quei discepoli, che costituiranno la prima generazione di elettrotecnici italiani. Egli non diventerà mai titolare di tale insegnamento e lo terrà solo per incarico; la prima cattedra sarà infatti istituita in Italia un anno dopo la sua morte, avvenuta nel 1897.

³² Come è noto, in alcune pubblicazioni straniere si attribuisce erroneamente la priorità della scoperta del campo magnetico rotante a Nicola Testa, fisico di origine croata allievo di Thomas Alva Edison, dopo la sua immigrazione negli Stati Uniti d'America nel 1884. Il campo magnetico rotante fu proposto da Galileo Ferraris nel 1885, ma scritto in una sua memoria del marzo 1888; Tesla aveva invece del tutto indipendentemente richiesto il suo brevetto nel 1887, che ottenne e pubblicò nel marzo 1888. Certo è che anche a Tesla va il merito della scoperta del campo magnetico rotante e, soprattutto, quello di avere realizzato industrialmente il motore asincrono e di avere con altri introdotto il sistema trifase; il suo nome, come è noto, è stato adottato come nome della unità di misura della grandezza densità di flusso magnetico o induzione magnetica B nel sistema SI in sostituzione dell'unità di misura impiegata in precedenza Wb/m².

corrente alternata o continua, ma anche per l'estensione dell'impiego dell'elettricità come forza motrice.

Ferraris non sfruttò in alcun modo l'importanza economica della propria invenzione e si ripeté, anche in questo caso, quanto era già successo al Pacinotti. Quest'ultimo, però, era ben conscio del valore pratico della sua scoperta e si impegnò per sfruttarla, senza riuscirci. Ferraris invece si astenne da qualsiasi iniziativa di tipo industriale, non solo per una visione della scienza quale attività indipendente dalla ricchezza, ma anche per la convinzione che il suo motore avesse un interesse limitato alla sola strumentazione di laboratorio.

2.5.1 Contributi del Ferraris alla teoria del trasformatore

Galileo Ferraris nello studio del trasformatore si avvalse dei contributi di J. C. Maxwell.

L'utilizzo in ambito ingegneristico dei risultati messi a disposizione dalla fisica maxwelliana condusse Ferraris all'elaborazione, nel modello matematico e nelle deduzioni, della teoria classica di tale macchina. Questa gli consentì, da un lato di esaminare il comportamento di regime nelle varie condizioni di carico prevedibili al secondario, dall'altro, disponendo delle corrispondenti soluzioni, di stabilire un bilancio energetico. Fu in questa occasione, che Ferraris introdusse il prodotto $V\cos\phi$ nel calcolo del valor medio della potenza istantanea. Basandosi sui risultati ottenuti, criticò la precedente impostazione del bilancio energetico, evidenziando in particolare come questa non fosse in accordo con il principio di conservazione dell'energia. In tale impostazione la potenza veniva erroneamente calcolata come semiprodotto dei valori massimi di tensione e di corrente, ovvero veniva impiegata, con linguaggio attuale, la potenza apparente.

Successivamente Ferraris calcolò il rendimento, tenendo valide le condizioni operative già adottate da Hopkinson e da Uzel, sottolineandone nel contempo la dipendenza dalle condizioni di carico. Con l'introduzione del fattore di potenza $\cos\phi$ Ferraris pervenne ad un rendimento massimo del 96%, ottenendo un risultato di gran lunga superiore ai risultati (86% ed 90%) ricavati dai due succitati autori. Il suddetto rendimento consentiva, senza più alcun dubbio, oltre alla trasformazione delle tensioni, anche la distribuzione economica dell'energia. La corrente alternata poteva dunque definitivamente riconoscersi come l'elemento risolutore della trasmissione.

Intendendo approfondire ulteriormente i fenomeni studiati, il Ferraris perfezionò in un secondo tempo il modello matematico impiegato, al fine di rappresentare le perdite nel ferro fin qui trascurate; mettendo in conto le suddette perdite perveniva alla determinazione definitiva del rendimento. La messa in equazione delle perdite nel ferro completava dunque la sua indagine sul trasformatore. Essa costituì un indubbio merito scientifico del Ferraris, oltre a quello maggiormente noto dell'asincrono. Tali lavori vennero resi noti in una memoria dal titolo "Sulle differenze di fase delle correnti, sul ritardo dell'induzione e sulla dissipazione di energia nei trasformatori", pubblicata nel 1887 presso l'Accademia delle Scienze di Torino. La moderna teoria classica del trasformatore poteva dunque dirsi inquadrata.

2.6 La tecnica elettrica italiana nella seconda metà del 1800

La tecnica elettrica italiana della seconda metà del 1800 era simile a quella di Paesi come la Spagna, piuttosto che a quella di Francia e Inghilterra. In questo periodo gli studi di elettricità e di magnetismo in Italia godevano di una certa notorietà e vi fu una cospicua produzione scientifica, come nel caso di Carlo Matteucci (1811-1868). In tutto il Paese inoltre erano presenti vari amatori e dilettanti della materia, che diedero origine a diverse applicazioni elettriche e magnetiche.

Al suddetto interesse per le scienze elettriche non corrispondevano però attività produttive. Vi furono comunque alcune modeste iniziative legate alla diffusione del servizio telegrafico di Stato e all'illuminazione; inoltre nel 1876 lo stabilimento milanese Tecnomasio, diretto da Bartolomeo Cabella (1847-1907), realizzò i primi impianti di illuminazione elettrica pubblica in piazza del Duomo.

In tale periodo da un punto di vista culturale vi furono alcune iniziative, per diffondere la cultura elettrica. La prima rivista italiana dedicata alle applicazioni dell'elettricità, «L'elettricista», è stata pubblicata a Firenze e diretta da Lamberto Cappanera. Su tale rivista scrissero fisici importanti come Giovanni Cantoni, Angelo Secchi, Augusto Righi. La rivista di Cappanera era comunque un'impresa prematura per quel tempo, così nel giro di due anni la pubblicazione dovette modificare orientamento e denominazione. Nel 1879 cambiò infatti il nome in «La natura» e si occupò di tutte le scienze fisiche e naturali.

2.7 L'importanza della corrente alternata nella trasmissione dell'energia elettrica

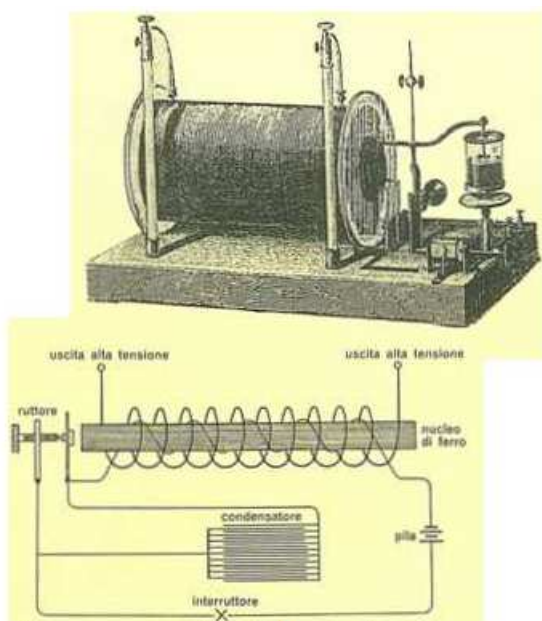


Fig. 2.11 - Rocchetto di Ruhmkorff.

applicarlo a scopo industriale, si trovano nei

brevetti di vari inventori da Varley (1856) a Jablokov (1877), a Fuller (1878), a Gordon (1878) e a Marcel Deprez e Carpentier (1881). Questi suggerimenti rimasero tuttavia inutilizzati. Successivamente il francese L. Gaulard e l'inglese W. Gibbs, credendo erroneamente che dal secondario di un trasformatore si potesse prelevare energia senza sottrarla al primario, ovvero si potesse generare energia, brevettarono nel 1882 un apparecchio denominato “generatore secondario” (fig. 2.12) e lo utilizzarono per applicazioni industriali. Essi pensarono di disporre un numero illimitato di trasformatori con i loro avvolgimenti primari in serie su un circuito a corrente alternata e di prelevare correnti elettriche dagli avvolgimenti secondari. Sfruttando questa tecnica, vennero realizzati impianti dimostrativi a

Inizialmente grazie al perfezionamento del rocchetto d'induzione o rocchetto di H. D. Ruhmkorff (fig. 2.11), che da decenni era già conosciuto ed estesamente usato per scopo sperimentale ed elettromedico, la tecnica della corrente alternata si diffondeva notevolmente e prendeva il sopravvento su quella della corrente continua.

Le prime indicazioni per realizzare il rocchetto d'induzione a nucleo chiuso, e di conseguenza renderlo capace di potenze ragguardevoli e

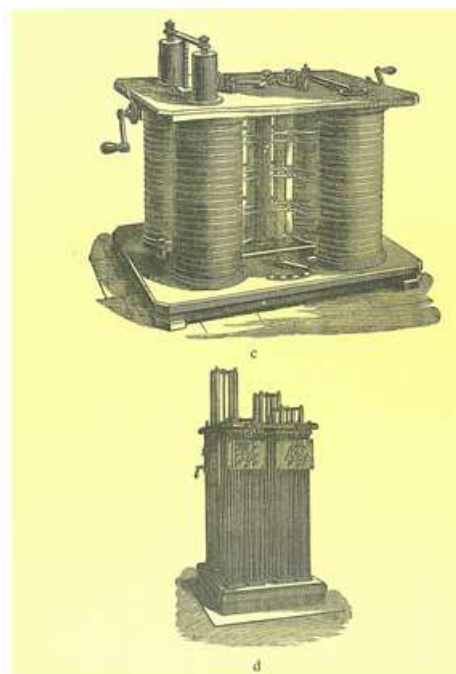


Fig. 2.12 – Generatore secondario di Gaulard e Gibbs. Prima versione (c), seconda versione perfezionata (d).

Londra, a Torino ed un vero impianto industriale per l'illuminazione a Tivoli. Fu merito di Galileo Ferraris l'aver messo in evidenza gli errori della suddetta tecnica; egli inoltre affermò che, per avere la potenza trasmessa da una corrente alternata, non è sufficiente moltiplicare la corrente per la tensione, ma bisogna ancora moltiplicare per un coefficiente. Questo coefficiente è sempre minore di uno, si chiama fattore di potenza e nel caso delle correnti sinusoidali si dimostra essere uguale al coseno dell'angolo di fase ($\cos \phi$). Alla luce delle osservazioni del Ferraris era chiaro, che la potenza resa al circuito secondario dei trasformatori di Gaulard e Gibbs veniva prelevata dal circuito primario con una certa perdita intermedia e rendimento pari circa al 90%.

Nonostante la tecnica di Gaulard e Gibbs si basasse su presupposti errati, l'impianto di Tivoli funzionò con pieno successo ed i tecnici apprezzarono l'utilizzo del trasformatore, che permetteva di poter passare senza difficoltà da un valore di tensione ad un altro. Si comprese quindi che con il trasformatore era possibile realizzare la trasmissione e/o la distribuzione economica dell'elettricità a distanza.

La corrente alternata permette di realizzare le linee di trasmissione a tensione elevata e, mediante i trasformatori, di ridurre questa tensione localmente nel posto di utilizzazione; inoltre, poiché il trasformatore è un apparecchio di costo moderato e di rendimento elevato, che non ha parti in movimento e non richiede sorveglianza, è possibile installare più trasformatori per alimentare le diverse zone di una città.

Quanto suddetto fu intuito ed applicato dagli ingegneri K. Zipernowski, M. Déry e O. Bláthy della casa Ganz di Budapest. Essi, oltre a perfezionare i trasformatori nella loro costruzione, ritennero opportuno connetterli in parallelo su una rete primaria a tensione costante e derivare dai loro secondari le linee di distribuzione a tensione costante con gli apparecchi utilizzatori inseriti in parallelo (fig. 2.14). Il funzionamento di questo sistema fu esibito a Vienna nel 1885.

Successivamente la casa Ganz divenne la prima in Europa per quanto atteneva alla tecnica degli impianti a corrente alternata compresa la costruzione degli alternatori di grande potenza. Ugualmente accadde in America con la casa Westinghouse. Col sistema Ganz furono realizzati, intorno al 1886, gli impianti di Vienna, di Roma, di Venezia, di Livorno, di Innsbruck; i valori di tensione primaria in queste distribuzioni erano di 2 kV e i secondari di 110 V. Il limite di 2 kV fu oltrepassato a Tivoli (5 kV), a Stoccarda (5 kV, impianto realizzato dalla casa Fein) ed anche in qualche altro impianto anteriore al 1890. In Inghilterra

si diffusero gli impianti di Sardinia Street; in questi fu osservato per la prima volta il "fenomeno Ferranti", consistente nel rialzamento eventuale dei valori della tensione o della corrente in arrivo, in confronto a quelli in partenza. La teoria stabilita da Galileo Ferraris permise di spiegare tale fenomeno correttamente. In America il macchinario a corrente alternata della casa Westinghouse si contrapponeva a quello a corrente continua della Edison e della Sprague. Altri macchinari a corrente alternata erano quelli costruiti dalla Thomson - Houston, dalla Brush e da altre case minori; tuttavia negli Stati Uniti la corrente alternata non veniva distribuita nelle città agli utenti, bensì quasi sempre veniva prima convertita (poco vantaggiosamente) in corrente continua per mezzo di sottostazioni con macchinario rotante.

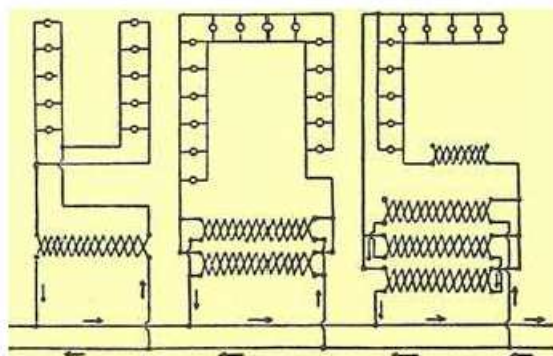


Fig. 2.14 - Distribuzione Ganz con i primari in parallelo.



Fig. 2.13 - Trasformatore Ganz.

2.7.1 La corrente polifase

Mentre la corrente continua costituiva il sistema principale della trazione ferroviaria e tranviaria, un'altra tecnica di generazione, trasmissione e utilizzazione si affermava: quella delle correnti polifase e dei motori a campo rotante; prime applicazioni furono gli apparecchi ideati da A. Pacinotti, da W. Baily, da M. Deprez. Nel 1885 Galileo Ferraris inventò il motore a induzione polifase a campo rotante (fig. 2.15, a). Il motore di Ferraris aveva due induttori ad

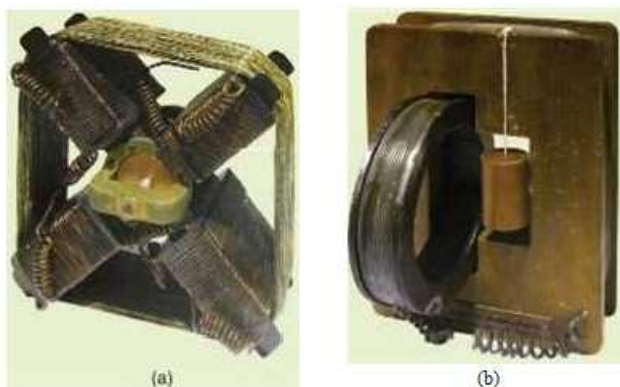


Fig. 2.15 - Motore ad induzione di G. Ferraris. Primo modello del 1885 (a), quarto modello del 1886 (b).

angolo retto percorsi da correnti alternante sfasate fra loro, in modo da trovarsi in quadratura e produrre quindi un campo magnetico rotante; un disco o cilindro centrato in questo campo veniva trascinato in moto per effetto delle correnti indotte, senza richiedere né anelli, né collettore, né spazzole, né altro collegamento con l'esterno. Questi

risultati ebbero notevole risonanza.

In America Nicola Tesla nel 1889 trasformò il sistema bifase a quattro conduttori in uno a tre conduttori, avendo riunito due di essi in un ritorno comune. Successivamente è stato sviluppato il sistema trifase, che è quello usato da tutti attualmente. A M. Dolivo-Dobrowolski della casa A. E. G. di Berlino si deve il rotore più perfezionato a gabbia di scoiattolo (composto di dischi di lamierino magnetico sovrapposti, come nell'armatura di una dinamo a corrente continua) e l'avvolgimento fatto di sbarre di rame longitudinali, chiuse in corto circuito alle due estremità. La tecnica del macchinario polifase si affermò subito con le realizzazioni delle maggiori case costruttrici.

Nell'esposizione di Francoforte del 1891 la A. E. G. di Berlino e la Oerlikon svizzera collaborarono, per mostrare in funzionamento una trasmissione trifase dalle cascate d'acqua di Lauffen, distanti ben 170 chilometri. In tale trasmissione 3 turbine da 150 HP attivavano tre generatori ad avvolgimento unico e a poli imbricati (tipo poi abbandonato) e la corrente veniva trasformata da 55 V a 8500 V in partenza e subiva trasformazione inversa a 65 V in

arrivo, per essere poi condotta ai motori. Intanto la stessa dimostrazione, ma con corrente monofase a 6 kV, veniva condotta all'inaugurazione della nuova linea Tivoli - Roma.

2.8 La trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

2.8.1 Le fasi iniziali

Verso la fine del 1800 si diffuse l'idea di realizzare il trasporto di energia elettrica a distanza a partire dalle centrali di produzione. I primi impianti produttori con macchine idrauliche erano stati messi in funzione sin dal 1884, così in Europa come in America. A seguito della realizzazione del primo vero generatore a corrente continua da parte di Pacinotti nel 1860,



Fig. 2.16 - Esposizione universale di Vienna del 1873.

diffuso poi industrialmente da Gramme, fu possibile realizzare le prime linee di trasmissione in corrente continua, destinate ad utilizzazione per galvanoplastica e per gli impianti di illuminazione con lampade ad arco. Una prima dimostrazione pratica sul principio tecnico della trasmissione dell'energia elettrica si ebbe con il francese H. Fontaine nel 1873 all'Esposizione di Vienna (fig. 2.16).

La prima trasmissione in corrente continua in linea aerea, su di una distanza di 57 km, fu realizzata nel 1882 tra Kiesbach e Monaco di Baviera per trasmettere alla tensione di 2 kV una potenza di circa 1,5 kW. Nel 1886 M. Deprez realizzò una trasmissione di 60 HP fra Parigi e Creil su una linea lunga 50 km in corrente continua. Tali trasmissioni attirarono grande attenzione e furono molto discusse e criticate.

Nel 1884 Gaulard e Gibbs con una linea sperimentale in corrente alternata a Lanzo in Piemonte alimentarono un impianto di lampade a 34 km di distanza dal generatore elettrico; si evidenziava così la possibilità di realizzare la trasmissione con la tecnica della corrente alternata. Negli anni successivi si decise di utilizzare a distanza l'energia delle cadute d'acqua, per alimentare gli impianti utilizzatori, grazie alla tecnica della trasmissione dell'energia elettrica, la quale divenne un settore ben definito dell'elettrotecnica. Una delle prime, se non la prima trasmissione industriale, fu quella di Isoverde - Genova col sistema Thury a corrente

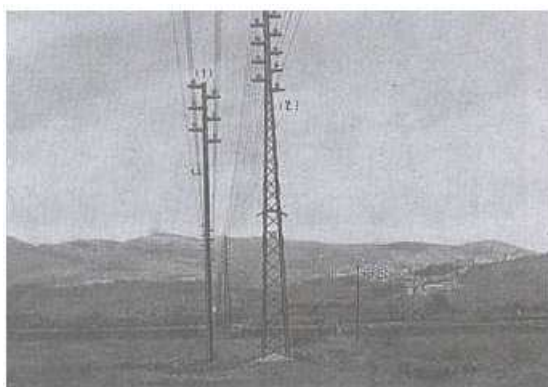


Fig. 2.17 - Prima linea di trasmissione Tivoli - Roma del 1892.

continua in serie nel 1889. Ma presto seguirono i progetti a corrente alternata per l'utilizzazione del Niagara, per la trasmissione elettrica Tivoli - Roma ⁽³³⁾ (fig. 2.17) e altri quasi contemporanei, che vennero a compimento dal 1891 al 1895 ⁽³⁴⁾.

2.8.2 Cenni tecnico-storici sulla trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

L'industria elettrica italiana nell'ultimo decennio del 1800 conobbe un nuovo sviluppo grazie alle possibilità aperte dal trasporto a distanza dell'energia elettrica. I tecnici italiani negli anni Ottanta avevano una concezione sfavorevole sulle potenzialità del trasporto dell'energia elettrica; tuttavia in seguito allo sviluppo della tecnica si prospettò la validità del nascente sistema di trasmissione, confermata all'Esposizione di Francoforte del 1891, che fu anche un personale trionfo di Ferraris riconosciuto tra i maggiori elettrotecnici del mondo. Ebbero origine in tal modo il trasporto a distanza, lo sfruttamento dell'energia idraulica, la realizzazione di linee elettriche, che attraversavano pianure e montagne, l'utilizzo dell'energia elettrica come forza motrice, oltre che come fonte di luce. Tutto ciò permise all'industria elettrica italiana un notevole sviluppo nel giro di non molti anni, che la portò a divenire uno dei settori dominanti dell'economia nazionale. Gli impianti costruiti negli anni novanta del 1800 rappresentarono un salto di qualità per la tecnica italiana. Nonostante la precedente dipendenza dall'ingegneria straniera, i nostri tecnici acquisirono una grande autonomia nello studio e nella realizzazione degli impianti. Continuò a risultare molto forte la dipendenza

³³ La prima linea in corrente alternata con caratteristiche industriali è quella che collegò alla tensione di 5 kV nel 1892 la centrale di Tivoli alla città di Roma. La centrale sfruttava l'acqua di una delle cascate esistenti a Tivoli, nella quale era stato installato fin dal 1886 un alternatore monofase Siemens, già presentato all'Esposizione di Torino del 1884. La linea della lunghezza di 25 km era costituita da 4 conduttori di rame di sezione 104 mm², costituiti da 19 fili elementari del diametro di 2,6 mm; gli isolatori erano in olio. Sulla stessa palificazione erano installate 2 linee per la trasmissione telegrafica e per la trasmissione telefonica.

³⁴ Alla fine del 19° secolo negli Stati Uniti avvenne una disputa fra Edison, sostenitore della corrente continua, e Tesla e Westinghouse, sostenitori della corrente alternata, più agevole da trasportare a distanza. Quest'ultima fu vincente, in quanto poteva essere trasmessa per lunghe distanze ad alta tensione, con bassi valori di intensità di corrente e di perdite di potenza.

dall'estero nel campo delle macchine elettriche, ma si consolidò un'originale scuola italiana nel settore delle linee di trasmissione. Lo sviluppo dell'elettrotecnica italiana, testimoniata dalla storia dei primi grandi impianti idroelettrici, avvenne sotto la guida della tecnica straniera, ma avvenne anche grazie alla pratica, all'intuizione ed al buon senso dei tecnici italiani; tale sviluppo favorì la crescita delle competenze, il diffondersi e l'approfondirsi delle conoscenze.

La tecnica della trasmissione a distanza si sviluppò dal 1891 in poi. A quella data le linee di trasmissione monofase negli impianti industriali raggiungevano i 30 e 40 km con tensione di 5 e 6 kV e potenza di trasmissione da 1000 a 10.000 kW. Il rendimento delle linee di trasmissione raggiungeva valori elevati dal 90% al 95% e i trasformatori elevatori in partenza e abbassatori in arrivo riducevano questo rendimento non oltre il 4 - 7%. Giungere a coprire distanze di trasmissione maggiori era un problema economico, dipendente a sua volta da uno tecnico, ovvero l'uso di tensioni sempre più elevate. Lord Kelvin insegnò ad impostare un problema di massima economia, ovvero calcolò la sezione dei conduttori in modo che la somma annua degli interessi del capitale di rame e del valore dell'energia persa nella linea risultasse minimo; tuttavia, anche mettendo in atto la soluzione proposta da Kelvin, si ottenevano distanze massime, oltre le quali non vi era convenienza né economica, né tecnica.

Inoltre, sin dai primi anni del periodo preso in considerazione, era noto che la corrente trifase risolveva il problema economico meglio della monofase. In un impianto monofase il flusso di energia è pulsante e passa per zero a ogni pulsazione, quindi vi è una frazione del tempo, in cui il rame resta inattivo o poco attivo; questo fatto, unito alla differenza di fase fra tensione e corrente, grava sull'economia della trasmissione. Invece in una linea trifase, con tre fili, uno per fase, il flusso d'energia è continuo con lieve fluttuazione e il rame lavora con un'utilizzazione migliore. Il vantaggio sarebbe massimo nel caso delle linee a corrente continua, in quanto i conduttori lavorano in pieno e non esiste la differenza di fase (³⁵); tuttavia è da evidenziare che le tensioni elevate in corrente continua diventano molto pericolose e malagevoli. Alla luce di quanto esposto la tecnica della corrente alternata trifase si impose nella trasmissione quale tecnica universale.

³⁵ Per questo motivo la casa Thury di Ginevra difendeva il suo sistema di trasmissione a corrente continua.

La prima grande linea di trasmissione trifase italiana fu quella di Paderno - Milano, inaugurata nel 1898, con tensione pari a 14 kV tra fase e fase. La tecnica si perfezionò, tanto da rendere comuni dopo pochi anni le trasmissioni a tensione pari a 20.000 e 25.000 V. Verso il 1900 si arrivò a tensioni di 30.000 e 40.000 V abbastanza frequentemente, finché fra il 1910 e il 1914 la tecnica delle trasmissioni a tensione di 80.000 V ed anche 100.000 V era divenuta costante. Le distanze coperte dalle linee di trasmissione raggiunsero i 50 km e nel 1910 una trasmissione di 40 km si considerava già come modesta. Un esempio assai notevole in Italia fu la trasmissione dalla centrale di Pescara a Napoli, non solamente interprovinciale, ma interregionale, la quale superava le catene degli Appennini.

Queste trasmissioni a grande distanza, realizzando collegamenti fra centrali produttrici di diverse provincie, hanno modificato molto la funzione e struttura degli impianti produttori. Questi, alimentando tutte le linee fra loro collegate, si ristrutturarono in modo da completarsi a vicenda e non si indirizzarono a un determinato gruppo locale di utenze, bensì ai consumi generali di zone vaste.

In merito alla scelta della tensione più adeguata è da tener conto che l'aumento delle tensioni permette di risparmiare sul rame, ma comporta un maggiore impiego di materiale d'isolamento e di protezione. Si usarono perciò i valori di 10 e 15 kV per le linee di piccola lunghezza e piccola potenza, i valori di 30 e 40 kV per le distanze intorno ai 30 e 50 km e i valori di 60 e 80 kV per distanze da 70 a 100 km e per potenze di molte decine di migliaia di kW. Questi valori di tensione, per gli impianti trifase, sono da intendersi come valori efficaci tra fase e fase.

Gli impianti di distribuzione anticamente erano costituiti da singole linee, successivamente l'estensione di questi impianti ha portato alle grandi reti di distribuzione, che alimentavano le utenze di intere città. Generalmente le reti erano costituite da cavi sotterranei nelle grandi città, mentre nelle città minori, che non avevano molte pretese estetiche, le reti erano costituite da conduttori aerei. Per quanto attiene alla scelta della corrente tra alternata monofase, alternata trifase e continua, vale quanto segue. Molte città conservarono il più possibile la distribuzione a corrente continua, altre città adottarono la distribuzione a corrente alternata fin da principio solo nei centri abitati minori, poi gradualmente nei più importanti. Molte altre installarono la doppia rete alternata e continua; altre ancora adottarono la corrente alternata nei sobborghi e continua nel centro. Roma, sin dal 1886, aveva la distribuzione

monofase non con rete secondaria distributrice ma con trasformatori locali, che alimentavano gruppi di utenti. Sempre a Roma venne installata nel 1911 una rete secondaria trifase per tutta la città, volta ad alimentare promiscuamente tutte le utenze. Questa rete trifase era costituita da quattro conduttori, 3 per le fasi ed 1 per il neutro, con tensione 210 V tra fase e fase e 120 V tra fase e neutro, in modo da poter alimentare sia le lampade a 120 V, sia i motori a 210 V tra fase e fase. Questa rete distributrice generale, a cui si aggiungeva un'altra rete per l'illuminazione pubblica, era alimentata da cabine, cioè sottostazioni statiche di soli trasformatori trifase. Le cabine erano alimentate da una linea trifase (a tre soli conduttori, senza neutro) con tensione di circa 8,5 kV tra fase e fase. Il sistema di Roma è stato gradualmente seguito, con poche varianti, da molte altre città.

Nel 1914 la distribuzione primaria trifase si era imposta molto generalmente per le stesse ragioni economiche che avevano influito sulle linee di trasmissione e le distribuzioni secondarie a corrente monofase e a corrente continua andavano perdendo terreno, anche in America e in Inghilterra.

In quanto ai particolari di esecuzione, possiamo aggiungere quanto segue. I cavi sotterranei sono stati quasi sempre realizzati con isolanti di carta imbevuta di oli minerali, mentre tutto, isolante e conduttori, era racchiuso ermeticamente in tubo di piombo, armato esternamente o protetto. Le linee di distribuzione aerea si sono realizzate sin da principio con conduttori nudi, salvo in Inghilterra ove si è perpetuato l'uso dei conduttori aerei ricoperti. È appena necessario ricordare che l'inserzione degli utenti sulla rete secondaria e quella delle cabine sulla primaria sono state eseguite in derivazione (in parallelo); in qualche rarissimo caso nelle periferie e per utenze con esigenze speciali si sono avute anche linee di diramazione mantenute a corrente costante con gli utenti inseriti in serie.

2.8.3 L'impianto di Paderno - Milano

Tra i primi impianti idroelettrici italiani occupa un posto preminente quello di Paderno – Milano. Questo impianto conferma l'abilità dei tecnici italiani, i quali sono stati capaci di una realizzazione alquanto avanzata. L'impianto di Paderno - Milano era caratterizzato da una tensione della linea, in partenza, di 13.000 V (³⁶) elevatissima per l'epoca, visto che impianti

³⁶ La linea era in corrente alternata trifase, copriva una distanza di 32 km, trasmettendo una potenza di circa 10000 kW, ottenuta dalla centrale idroelettrica Bertini, nella quale sono tutt'ora installati tre dei sei originari

d'avanguardia come quello di Heidelberg non raggiungevano i 6000 V. Simile valore di tensione poneva una serie di problemi costruttivi e impiantistici completamente nuovi e dunque la sua scelta doveva essere frutto di un attento studio. Secondo alcune tesi storiche il progetto iniziale fu elaborato da Charles Brown, il grande costruttore svizzero, che poi realizzò i generatori di Paderno. Ferraris esaminò il progetto, diede alcuni suggerimenti e poi lo approvò nel dicembre del 1894. Nel 1895 venne assunto dalla Edison Guido Semenza (1868 - 1929), un giovane elettrotecnico laureatosi l'anno prima all'Istituto Montefiore, cui fu affidato il compito di studiare i dettagli del progetto.

La lunghezza della linea e l'elevata tensione fecero sorgere problemi innovativi quali la stabilità meccanica, l'isolamento e la protezione dalle scariche atmosferiche. La stabilità meccanica impose di usare, per la prima volta in Europa, solo pali di ferro.

Nella costruzione dell'impianto di Paderno (ma le stesse considerazioni potrebbero farsi per altri grandi impianti, quale quello di Tivoli - Roma) l'elettrotecnica italiana dimostrò la propria valenza, senza però raggiungere elevati livelli. Essa cominciava ad acquisire prime capacità autonome; tuttavia non poteva ancora rinunciare all'ausilio della tecnica straniera.

2.9 La cultura elettrotecnica in Italia alla fine del 1800

2.9.1 L'insegnamento dell'elettrotecnica

Le lauree in ingegneria elettrotecnica negli anni ottanta del 1800 andavano diffondendosi in vari paesi; in Italia l'elettrotecnica, priva inizialmente di un proprio corso di laurea, era inserita da docenti isolati, quale disciplina nei propri corsi di studio. Nel 1887 l'industriale farmaceutico Carlo Erba (1811-1888) fece una donazione di 400.000 lire al Politecnico di Milano per la fondazione in Milano di una «scuola speciale». L'Istituzione Elettrotecnica Carlo Erba (IECE) cominciò la sua attività nell'anno scolastico 1887-1888, ammettendo dodici allievi ingegneri dell'ultimo anno a seguire due corsi, uno sulla dinamo, tenuto da Rinaldo Ferrini di due ore settimanali, e l'altro di misure elettriche di quattro ore, affidato a Luigi Zunini, già assistente presso il prestigioso Istituto Montefiore di Liegi. L'IECE non svolgeva alcuna attività di ricerca accanto a quella didattica e per le proprie esigenze finanziarie poteva far affidamento soltanto sulla donazione del proprio mecenate.

Nel 1888 presso il Museo Industriale di Torino venne avviato il corso di elettrotecnica, tenuto da Ferraris, così che Torino venne ad affiancare Milano quale centro di formazione per gli elettrotecnici. Gli allievi torinesi crebbero notevolmente, mentre quelli ammessi all'IECE rimasero pochissimi.

In questi anni nacque un laboratorio elettrico della Marina Militare a La Spezia, diretto da Luigi Pasqualini, il quale era un fisico che, laureatosi a Padova, nel 1884 divenne consulente della Marina. Nel 1892 Pasqualini ideò un dispositivo per le prove sulle macchine elettriche, il 'freno Pasqualini', destinato ad avere grandissima diffusione. Nel suo laboratorio si formarono molti elettrotecnici di valore.

Da Milano, Torino e La Spezia uscirono quasi tutti gli elettrotecnici, che costituirono il personale tecnico-amministrativo dell'industria elettrotecnica italiana. In genere la loro formazione era completata tramite studi presso altre scuole in particolar modo presso l'Istituto Montefiore.

Nel settore culturale vi furono opere di larghissima divulgazione, pubblicate anche a dispense,



Fig. 2.18 - Uno dei vari libri di Rinaldo Ferrini.

che volevano fornire al grande pubblico i concetti basilari dell'elettricità. Vi furono anche i primi manuali che avevano intenti di formazione scientifico-tecnica, redatti comunque da autori non specializzati in elettrotecnica, in quanto coloro i quali studiavano problemi elettrotecnici erano per lo più fisici. Caratteristici sono i libri di Rinaldo Ferrini (1831-1908) (fig. 2.18), il più prolifico tra gli autori sull'argomento. Nel campo delle riviste mancava un periodico specializzato, anche se nel 1882 era stato fondato a Milano il settimanale illustrato «L'elettricista», bollettino destinato a una larghissima divulgazione. Molto attivi su questo periodico erano docenti di fisica nelle scuole secondarie milanesi, in particolare Alessandro Volta, nipote del grande omonimo, e Francesco Grassi.

Questo gruppo nel 1888 diede vita a un'associazione, la Società Italiana di Eletticità, destinata a favorire gli studi e le applicazioni elettriche. Dopo cinque anni di attività grama, tra l'indifferenza generale, l'associazione si sciolse.

2.9.2 Riviste, manuali e trattati

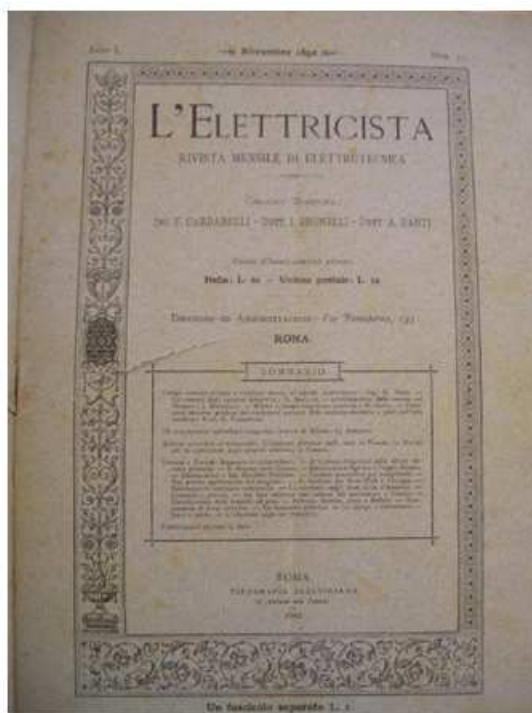


Fig. 2.19 - Mensile "L'Elettricista" fondato nel 1892.

Politecnico di Zurigo, Riccardo Arnò, Emanuele Jona, direttore del laboratorio della Pirelli, Giuseppe Sartori, giovane ingegnere milanese, che era stato mandato a Trieste a servire il governo austriaco, ma anche a studiare da vicino la grande elettrotecnica ungherese.

Nel 1891 iniziò una discreta produzione di libri con la comparsa di due trattati, dedicati a operai e tecnici, che avranno un notevole successo editoriale: "Il montatore elettricista" di Edoardo Barni e "Impianti di illuminazione elettrica" di Emilio Piazzoli (fig. 2.20). Il Manuale dell'elettricista di Ferrini e Colombo non ebbe invece lo stesso successo. Questi manuali erano finalizzati alla formazione professionale di tecnici impegnati nel montaggio e nella manutenzione di impianti di distribuzione della luce.

Nel 1892 venne fondato il mensile «L'elettricista» (fig. 2.19), pubblicato a Roma sotto la direzione di un comitato formato da Fedele Cardarelli, Italo Brunelli e Angelo Banti. Sulle pagine di questo periodico vennero pubblicati i primi studi di quegli elettrotecnici, che avrebbero rappresentato la ricerca scientifica italiana dopo Ferraris, la cui morte avvenne nel 1897. Tra questi si possono ricordare Guido Grassi, che insegnava a Napoli, Moisè Ascoli, professore di fisica tecnologica alla Scuola di Applicazione di Roma, con i suoi allievi destinati a un importante avvenire, Ferdinando Lori e Giovanni Giorgi, Luigi Lombardi, che veniva dal



Fig. 2.20 - Terza edizione del testo "Impianti di illuminazione elettrica" di Emilio Piazzoli.

Attorno alla metà degli anni Novanta cominciarono però a comparire anche i primi trattati destinati agli studi di livello universitario o comunque rivolti a tecnici con un non elementare livello di preparazione scientifica, in particolare i due manuali di Giulio Tolomei, di Gaetano Vassalli e quello (più teorico) di Ascoli. Nel 1894 venne pubblicata l'opera "Trasmissione elettrica del lavoro meccanico" di Sartori. Questo testo, dedicato al tema della trasmissione dell'energia, era comunque un trattato quasi completo di elettrotecnica, che, sia pure in forma sintetica e pur mantenendo sempre un livello di trattazione teorica elevato, affrontava anche il tema delle macchine generatrici, quello delle macchine utilizzatrici e dei sistemi di distribuzione, facendo ampio e sistematico uso della matematica.

2.9.3 AEI - L'Associazione elettrotecnica italiana

Dal punto di vista dell'organizzazione della ricerca l'evento senza dubbio più significativo degli anni Novanta fu la fondazione dell'Associazione Elettrotecnica Italiana (AEI). Grazie a quest'associazione ebbe inizio uno scambio costante di informazioni e opinioni, un dibattito teorico relativo ad interessi industriali, la pubblicazione di studi di ampiezza e profondità tali da non trovare spazio su «L'elettricista» (o su altre riviste di minor importanza, che erano sorte o andavano sorgendo tra i due secoli, come «L'energia elettrica» o «L'elettricità») e un legame tra università e mondo del lavoro.

Al Congresso Internazionale di Elettricità di Ginevra il 7 agosto 1896 si decise di fondare un'associazione denominata Associazione Elettrotecnica Italiana (AEI) tra tutti coloro che, in varie forme, si occupavano di elettrotecnica in Italia. Da questa riunione nacque una commissione, formata da esponenti dell'università, dell'industria e degli studi professionali, incaricata di studiare uno statuto. Nella commissione prevalsero due tendenze. Una, capeggiata da Raffaele Pinna, era a favore di un tipo di associazione unica con sede stabile; l'altra, sostenuta da Alessandro Panzarasa, era per un'associazione formata da più sezioni autonome. Fu scelta la proposta di Panzarasa, che prevedeva un consiglio generale eletto dalle sezioni e guidato da un presidente generale rinnovabile ogni tre anni, con una sede itinerante di triennio in triennio al seguito del presidente. Lo statuto fu votato a Milano il 27 dicembre 1896 in un'assemblea generale, in cui intervennero oltre centoventi persone. Il numero elevato dei partecipanti dimostra quanto fossero aumentate le figure tecniche, culturali e

industriali connesse con il campo delle applicazioni elettriche e quanto fosse sentita l'esigenza di un organismo, che potesse armonizzarle e coordinarle.

Ferraris era il presidente generale, ma alla sua morte, avvenuta il 7 febbraio 1897, divenne



Fig. 2.21 - Sede storica dell'AEI a Milano in via San Paolo.

presidente l'ing. Colombo. La sede dell'AEI venne stabilita a Milano (fig. 2.21). Le prime sezioni costituite furono quelle di Torino, Milano, Genova, Roma, Napoli e Palermo. La loro struttura rifletteva abbastanza fedelmente lo stato dell'industria elettrica. La sezione milanese era di gran lunga la più numerosa con 153 soci individuali e 25 soci collettivi, cifre che rappresentavano più di un terzo del totale

dei soci, che era di 466. La dirigenza delle sezioni era in prevalenza composta da esponenti dell'industria dove questa era sviluppata, come a Milano (qui era presidente Giovanni Battista Pirelli), mentre prevalevano i docenti universitari dove l'industria era meno sviluppata, come a Napoli o a Roma, che ebbero come primo presidente Grassi e Ascoli, o i professori delle scuole secondarie dove mancavano sia le industrie, sia la ricerca.

Una delle principali attività dell'AEI fu la pubblicazione degli "Atti della Associazione elettrotecnica italiana", ma sin dall'inizio notevole importanza fu data alle problematiche, tecniche, legislative ed economiche. L'AEI assunse così rapidamente il ruolo di organo di incentivazione degli studi elettrotecnici.

In seguito all'azione intrapresa nel 1906 da Jona, divenuto in quell'anno presidente, che prevedeva di cambiare parte dello statuto e far diventare Milano la sede centrale dell'associazione ⁽³⁷⁾, l'AEI attraversò un momento di difficoltà con riduzione degli iscritti in molte sezioni e rallentamento dell'attività complessiva. Jona realizzò comunque il suo obiettivo. A Torino nel 1911 si tenne un importante Congresso Internazionale delle Applicazioni Elettriche, che decretò l'Italia membro del gruppo di Paesi più avanzati.

³⁷ Invece di mantenere, com'era stato sino ad allora, una sede itinerante di triennio in triennio.

2.9.4 Alcune questioni inerenti alla concezione teorica e pratica dell'elettrotecnica

Nelle università italiane si poteva fare solo ricerca teorica o ricerca sperimentale, legata alla teoria, che richiedeva la disponibilità unicamente di strumenti di laboratorio tradizionali, di libri e di riviste, ma la ricerca pratica con risvolti tecnologici doveva essere compiuta nelle industrie o nei cantieri. A Milano e a Torino nelle sezioni dell'AEI si discuteva di problemi strettamente legati alla pratica, mentre a Roma, Napoli e Palermo venivano affrontate questioni teoriche anche assai impegnative. In poco tempo con lo sviluppo delle iniziative industriali, questa differenza tenderà ad affievolirsi; tuttavia nel 1900 era ancora abbastanza presente.

Tra le questioni teoriche è interessante segnalare lo studio riportato nell'opera di Giovanni Giorgi (1871-1950) (appartenente alla sezione romana) sulle unità di misura. Il problema della scelta di opportune unità di misura elettriche fu molto dibattuto negli anni Novanta, in particolare al congresso tenutosi a Chicago nel 1893. La scelta delle nuove unità di misura elettriche doveva tener conto del rapporto tra queste unità e quelle accettate come fondamentali dalla scienza nel suo complesso; questione che sollevava non poche difficoltà. Nel 1901 Giorgi presentò alla sezione romana dell'AEI il suo celebre lavoro sulle unità di misura, nel quale esponeva un sistema di misura pratico e assoluto al contempo, che eliminava molte difficoltà presenti nel sistema CGS (Centimetro, Grammo, Secondo) elettromagnetico. Giorgi ripresentò il suo lavoro l'anno successivo alla riunione della Società Italiana di Fisica, la quale nominò, congiuntamente con l'AEI, una commissione, che propagandò all'estero la proposta di Giorgi. Questa fu accettata internazionalmente al grande Congresso di elettricità di St. Louis nel 1904.

Altro grande lavoro teorico presentato alla sezione romana fu la teoria del colpo d'ariete di Lorenzo Allievi (1856-1941), milanese laureatosi a Roma. Uno dei maggiori problemi dal punto di vista idraulico, che ponevano le centrali idroelettriche, era rappresentato dagli effetti, che avevano le variazioni del flusso dell'acqua nelle condotte forzate, variazioni dovute agli interventi di regolazione delle turbine. Le teorie idrauliche di inizio Novecento trattavano solo il caso del regime stazionario e per il regime variabile esistevano solo metodi di calcolo approssimati e limitati a casi speciali. Allievi propose nel 1903 un metodo di soluzione

generale e rigoroso del problema. La teoria sarà raffinata nei dettagli dieci anni dopo, ma rimarrà nella sostanza definitiva.

Se nel centro-sud d'Italia venivano affrontate molte questioni teoriche, a Milano e a Torino, e in maniera minore a Genova, si trattavano questioni scaturite dalla pratica industriale. Gli elettrotecnici del nord studiavano tematiche inerenti alla produzione industriale, delle quali cominciavano ad occuparsi con rigore scientifico, senza raggiungere per ora risultati di grande rilievo. Calcolo delle linee, loro protezione e isolamento, marcia in parallelo di due alternatori, isolamento dei cavi, elettrificazione delle ferrovie furono i temi più studiati.

La suddivisione sud-nord degli studiosi con il crescere delle iniziative in campo elettrico, che nel periodo giolittiano arrivarono a investire anche il Meridione, si andò progressivamente attenuando; tuttavia non scomparve e allo scoppio della guerra era ancora evidente. Anche i dati sui brevetti industriali in campo elettrotecnico confermarono questa distinzione. I brevetti registrati in Italia tra il 1895 e il 1914 si concentrarono principalmente nelle aree metropolitane del Nord (Milano ebbe la quota massima del 33,4%, Torino ebbe il 10,3% e Genova il 7,9%).

2.9.5 Gli studi sulle macchine elettriche

2.9.5.1 Situazione italiana delle macchine elettriche

Il settore delle macchine elettriche in Italia era poco sviluppato tanto al Nord, quanto al Sud. L'industria straniera, quella tedesca in particolare, dominava il mercato nazionale. Nel 1898 esistevano in Italia 1864 generatori di fabbricazione italiana contro i 176 generatori provenienti dall'estero, ma questi ultimi erogavano una potenza complessiva di 66.420 kW, contro i 20.150 kW spettanti ai generatori nazionali. Questo stava ad indicare che le macchine di fabbricazione straniera avevano maggiore potenza rispetto alle nostre.

Con l'inizio del nuovo secolo vi fu qualche progresso nel settore delle grandi macchine, per esempio con l'inizio dell'attività in questo campo dell'Ansaldo, grazie all'opera direttiva di Pescetto, e furono realizzati i primi grandi impianti interamente italiani come quelli del Brembo e del Ticino; tuttavia la condizione andò peggiorando; infatti nel decennio 1898-1908 i generatori elettrici italiani attivati furono 2624, per una potenza complessiva di 130.805 kW

contro una potenza complessiva di 305.128 kW prodotta da 3329 macchine di provenienza estera.

Le norme sull'ordinazione e il collaudo delle macchine elettriche elaborate dall'ente normatore tedesco Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) conferirono grande prestigio all'industria tedesca, favorendo i produttori tedeschi rispetto agli altri concorrenti. La conformità ai criteri previsti da queste norme era assai più efficace della detenzione di un brevetto. L'importanza sul piano economico di queste norme diverrà chiara solo durante la guerra e si avrà allora una decisa campagna per sostituire le norme del VDE con quelle elaborate dall'AEI.

2.9.5.2 Studiosi italiani di macchine elettriche successivi al Ferraris

Il campo degli studi e della ricerca fu influenzato dalla situazione poco promettente nel settore delle macchine elettriche. Il maggiore studioso di macchine elettriche successivo al Ferraris divenne Grassi, che aveva preso il suo posto a Torino e che nel 1900 divenne presidente dell'AEI.

All'iniziativa di Grassi si deve l'istituzione, avvenuta nel 1900, della prima cattedra italiana di "Costruzioni elettromeccaniche" presso il Politecnico di Torino, affidata a Ettore Morelli, che aveva fatto una vasta esperienza negli Stati Uniti. Sempre a Grassi si deve il primo manuale italiano di livello universitario relativo alle macchine elettriche dal titolo "Corso di elettrotecnica", il cui primo volume comparve nel 1904, seguito da un secondo volume nel 1906. Questo testo fu adottato praticamente in tutte le scuole di ingegneria italiane. Esso possedeva un'indubbia chiarezza, principalmente dovuta ad una trattazione piuttosto elementare. Tra i testi stranieri uno dei migliori era quello di Gisbert Kapp, il quale fu tradotto in italiano a opera di due ingegneri della Casa Ganz di Budapest, Riccardo Luzzati e Ugo Russi; non ebbe tuttavia successo.

Nei primissimi anni del Novecento comparvero vari manuali, che si occupavano, completamente o solo in parte, di macchine elettriche. Va menzionato in particolare il manuale di G. Sartori "La tecnica delle correnti alternate" (1903), il cui secondo volume (il primo era destinato ai capi-operai) spiccava per il rigore della trattazione e per la profondità analitica.

2.10 La cultura elettrotecnica in Italia nei primi anni del 1900

Nei primissimi anni del Novecento gli studi italiani di elettrotecnica erano entrati in una nuova fase grazie alla spinta dei problemi posti dal fiorente sviluppo industriale e alle opportunità offerte dall'organizzazione dell'AEI. In questa fase una pluralità di ricercatori era ormai in grado di produrre studi scientifici degni di nota.

2.10.1 Il Congresso Internazionale di Elettricità di St. Louis

Nel 1904 si tenne a St. Louis il Congresso Internazionale di Elettricità. I Paesi più importanti in campo elettrotecnico (Gran Bretagna, Stati Uniti, Germania, Francia, Austria, Ungheria) parteciparono al congresso con cinque delegati ciascuno; l'Italia partecipò con tre delegati, al pari di Belgio, Russia e Svizzera, altri Paesi parteciparono con due o un solo invitato. Nel complesso i partecipanti italiani al convegno furono ben 66, ciò stava ad indicare un sensibilissimo interesse da parte dei nostri tecnici e studiosi a tenersi scientificamente aggiornati.

Di particolare rilievo e ben apprezzato nel corso della discussione fu l'intervento di E. Jona, che presentò i risultati di una ricerca svolta all'interno della Pirelli sui cavi con isolamento formato da strati di materiali diversi. Jona si era avvalso della collaborazione del grande fisico matematico Tullio Levi Civita (1873-1941) per il calcolo della distribuzione del potenziale. Da questa ricerca nascerà il cavo graduato.

A seguito del suddetto Congresso l'elettrotecnica italiana si era conquistata una considerazione internazionale, se non di primissimo piano certo non di retroguardia, e mirava a migliorare i propri contenuti tecnico-scientifici anche attraverso un contatto con la ricerca degli stati più avanzati.

2.10.2 Riviste: L'industria elettrica e L'elettrotecnica

«L'industria elettrica», nuova rivista specializzata e bollettino ufficiale dell'Associazione fra esercenti imprese elettriche in Italia, nacque nel 1911; questa rivista era dedita prevalentemente ai risvolti giuridici ed economici dell'industria elettrica, ma mostrava attenzione anche verso gli aspetti tecnico-scientifici.



Fig. 2.22 - Rivista "L'elettrotecnica", fondata nel 1914.

Nello stesso periodo aumentò il numero degli "atti" dell'Associazione Elettrotecnica Italiana (AEI), fino a che, nel 1914, essi vennero trasformati in una vera e propria rivista, ovvero «L'elettrotecnica» (fig. 2.22). Ferdinando Lori (1869-1947) può essere considerato il principale fautore della fondazione del nuovo periodico, destinato a diventare, nel giro di pochi anni, una delle più rinomate riviste scientifiche italiane.

Egli nel triennio 1912-14 fu presidente dell'AEI. Scopo di Lori fu quello di rendere più frequente la pubblicazione delle ricerche degli elettrotecnici italiani e di introdurre, accanto agli atti ed ai verbali dell'AEI, una rivista al contempo scientifica e di

aggiornamento. Tale obiettivo si può dire che venne subito raggiunto.

2.10.3 Sviluppi teorico-pratici sulle linee di trasmissione dell'energia elettrica

2.10.3.1 La linea Grosotto - Milano

Il settore maggiormente oggetto di studio fu costituito dalle linee di trasmissione, come confermato da un'intensa attività di progettazione e di cantiere, che portò a realizzazioni di altissimo livello, quali, per esempio, la linea Grosotto - Milano degli impianti AEM in Valtellina. Questa linea, oltre alla considerevole lunghezza, prevedeva tratti in alta montagna, i quali posero problemi del tutto nuovi, soprattutto per quanto attiene al carico di neve e ghiaccio. Tra questi problemi possiamo citare quello della stabilità meccanica, della perdita di potenza e della caduta di tensione, i quali furono studiati da Gino Rebora, Guido Semenza, Giacinto Motta, Ulisse Del Buono, Renzo Norsa. Sull'argomento fu pubblicata, da Italo Brunelli, una monografia assai ampia e approfondita, sia pure di interesse prevalentemente pratico-applicativo e con forti attenzioni per la telegrafia (Brunelli era ispettore generale del Ministero delle Poste e Telegrafi).

2.10.3.2 Studi teorici sulle linee di trasmissione dell'energia elettrica e relativi problemi

L'elevata competenza italiana attinente nel campo della trasmissione dell'energia elettrica è attestata, oltre che dal valido libro di Brunelli, anche dalle dispense, non pubblicate, ricavate dalle lezioni tenute da Giacinto Motta (1870-1943) presso il Politecnico di Milano (³⁸). L'accuratezza dell'analisi, la vastità dei temi affrontati, il rigore metodologico, l'elevata matematizzazione, talune soluzioni originali di problemi inerenti all'ottimizzazione economica ed alla stabilità meccanica, fanno di questo documento una testimonianza della vasta cultura e preparazione dei nostri progettisti.

L'attenzione dedicata alle linee di trasmissione è perfettamente comprensibile visto il loro elevato costo, che, con l'aumentare delle distanze, era ormai divenuto una voce consistente dell'investimento necessario alla realizzazione di una rete elettrica; la suddetta attenzione è giustificata anche da seri problemi quali quello della protezione delle linee dalle sovratensioni di origine esterna e interna e quello delle scariche verso terra. Il problema della protezione delle linee ricevette attenzione pari, se non superiore, a quello del loro calcolo meccanico ed elettrico.

Semenza, Vallauri, Pizzuti, Ferrari, Campos, Carpat, Gola, Barassi scrissero varie memorie in proposito e Piazzoli pubblicò una monografia, che rappresentava - proprio in quanto monografia di notevole importanza e di elevato livello scientifico dedicata a un tema specifico - una vera rarità nella pubblicistica elettrotecnica italiana di quel periodo. Tra i risultati conseguiti in campo teorico si possono citare quello di Semenza inerente al sistema di protezione dalle scariche atmosferiche di sottostazioni e cabine fondato sulla gabbia di Faraday e quello di Campos inerente al sistema di smorzamento delle sovratensioni, basato sulle caratteristiche elettriche della linea.

2.10.4 Sviluppi degli studi sulle macchine elettriche

Gli studi sulle macchine elettriche si arricchirono di nuovi contributi, come attestò la grande Esposizione di Torino del 1911 e come confermò un sensibile incremento delle ricerche.

³⁸ Motta è stato progettista e direttore lavori della linea Grosotto - Milano e successivamente ha anche ricoperto la carica di presidente della Edison.

Successivamente al Grassi, uno dei più illustri studiosi di macchine d'inizio secolo, il settore delle macchine elettriche venne studiato da Giancarlo Vallauri. Questi divenne uno dei più grandi nomi dell'elettrotecnica italiana insieme al suo maestro e suocero L. Lombardi. Altri nomi non meno importanti furono L. Donati, E. Morelli, G. Semenza, Piola e G. Sartori, il quale nel 1913 iniziò le proprie ricerche sui motori asincroni, che si conclusero nel dopoguerra con l'ideazione di un nuovo importante tipo di motore asincrono autocompensato.

2.10.4.1 Testi universitari e manuali

Numerosi furono i testi di elettrotecnica, che contenevano capitoli dedicati alle macchine elettriche. Si può menzionare a tal proposito il testo di Lombardi "Lezioni di elettrotecnica" del 1907 (pubblicato in seconda edizione ampliata nel 1913 con il titolo "Corso teorico-pratico di elettrotecnica"), che rappresentò inoltre un'alternativa, come manuale universitario, al "Corso di elettrotecnica" di Grassi. Altro esempio di testo / manuale di minor successo fu quello di A. De Maria.

Testi universitari dedicati del tutto alle macchine elettriche furono quello di Giulio Pardini "La pratica di costruzioni elettromeccaniche" ed i due volumi di E. Morelli del 1913 "Costruzioni elettromeccaniche". Il testo di Pardini si rivolgeva ai tecnici professionisti, che avevano solo poco tempo da dedicare allo studio, quello di Morelli era di livello teorico, anche se non paragonabile ai maggiori manuali tedeschi o francesi; quest'opera rappresentò comunque il primo trattato italiano di macchine elettriche.

Quanto suddetto non deve far pensare ad un notevole sviluppo degli studi italiani nel campo delle costruzioni elettromeccaniche, in quanto questo era un argomento, che continuava ad essere sottovalutato nelle scuole di ingegneria rispetto ad altri, quali ad esempio le linee di trasmissione o le misure di potenza. Nel 1922 A. Barbagelata, presentando al lettore la prima edizione del suo trattato sulle macchine elettriche, affermava che il corso di macchine da lui tenuto presso il Politecnico di Milano non aveva proprie esercitazioni, perciò le prove di laboratorio si dovevano effettuare durante le esercitazioni del corso di misure. Egli sosteneva che in questo modo non era evidentemente possibile un vero corso di costruzioni elettromeccaniche

2.11 Uno sguardo all'Europa: gli ingegneri elettrotecnici inglesi

Negli anni Ottanta del 1800 in Gran Bretagna gli ingegneri elettrotecnici (³⁹) erano suddivisi in tre gruppi: coloro che si occupavano di telegrafia, quelli che lavoravano in ambito elettromeccanico, provenienti in gran parte dall'ingegneria meccanica, e quelli che avevano un orientamento più scientifico.

Gli ex ingegneri telegrafici avevano competenze inerenti alle misure sul campo, ai cavi e alle macchine elettriche elementari come dinamo e bobine a induzione; tra questi ingegneri si possono menzionare Charles W. Webber, il maggiore Cardew, Willoughby Smith e William H. Preece.

I progettisti di elettromeccanica, provenienti dall'ingegneria meccanica, non avevano particolari competenze in ingegneria elettrica; tuttavia avevano migliori conoscenze per trattare i gravosi problemi legati alla meccanica dei macchinari per la produzione di potenza, come dinamo, motori o caldaie. Alcuni di essi erano autodidatti, altri venivano reclutati da settori affini all'ingegneria meccanica o navale ed avevano una certa familiarità con i laboratori e con gli impianti. Alcuni di questi ingegneri meccanici furono W. Crompton, G. Kapp, J. Swinburne e S. Z. Ferranti, figure rappresentative dell'ingegneria di potenza di quel periodo.

Il terzo gruppo era formato da ingegneri che avevano un'impostazione scientifica, che avevano studiato la fisica e che ricoprivano la carica di professori universitari di ingegneria elettrotecnica. A differenza degli ingegneri telegrafici di impostazione pratica e di quelli meccanici, questi ingegneri-scienziati sottolineavano l'importanza della pratica di laboratorio e dell'uso di principi scientifici, come quelli contenuti nel "Treatise on electricity and magnetism" (1873) di J. C. Maxwell. In questo gruppo rientravano John A. Fleming presso l'University College di Londra, William E. Ayrton presso il Finsbury Technical College e la Central Institution, John Perry presso il Finsbury College, John Hopkinson presso il King's

³⁹ Il termine "ingegneri elettrotecnici", o meglio "ingegneri elettrici", si deve ad Edison, il quale alla Invention Factory di Menlo Park attorno al 1870 insieme ai suoi usò il termine "electrical engineers". Quegli anni, nel corso dei quali con il telefono, il fonografo, la lampada ed il motore si realizzavano per l'umanità invenzioni decisive per la qualità della vita, furono davvero memorabili; è stato ipotizzato che nel periodo di massima attività all'Invention Factory si compisse un'invenzione ogni 5 giorni.

College a Londra, Silvanus Thompson presso il Finsbury College e James A. Ewing presso la Cambridge University.

La comunità degli ingegneri dediti all'ingegneria di potenza in Gran Bretagna si sviluppò a partire da questi tre gruppi distinti caratterizzati da concezioni differenti, da metodi di indagine diversi, nonché da approcci e linguaggi per la soluzione di problemi specifici molto distanti tra loro.

Esperti di telegrafia come W. H. Preece avevano avuto un ruolo fondamentale nei primi sviluppi dell'ingegneria di potenza, essendo gli unici ad avere competenze elettriche pratiche. Appena i livelli di potenza cominciarono ad aumentare, l'esperienza pratica maturata in telegrafia risultò presto inapplicabile. Nel 1883 la Society of Telegraph Engineers, che era controllata dagli esperti di telegrafia, divenne la Society of Telegraph Engineers and Electricians e nel 1888 fu denominata Institution of Electrical Engineers (IEE). Questo avvenimento testimonia il passaggio delle competenze dagli esperti di telegrafia agli ingegneri elettrotecnici di formazione meccanica.

Dopo il 1888 sorsero contrasti tra gli ingegneri di formazione meccanica e quelli di estrazione scientifica, ovvero gli ingegneri professori universitari di elettrotecnica. Questi ultimi contribuirono sia a definire una prassi nelle misure, sia alla formazione delle nuove leve; l'amperometro di Ayrton e il potenziometro di Fleming furono considerati dispositivi importanti anche dagli ingegneri di formazione meccanica.

Dalla seconda metà degli anni Ottanta, a causa della domanda crescente di elettrotecnici esperti, le società elettriche iniziarono ad assumere persone di formazione scientifica provenienti dai college.

L'ingegneria elettrotecnica non aveva ancora una solida base scientifica. Crompton sottolineava sempre l'importanza dell'immaginazione nella progettazione di macchine pesanti; perfino James E. H. Gordon - un ingegnere elettrotecnico, che si era formato scientificamente presso il laboratorio Cavendish con Maxwell - riteneva che l'abilità nella progettazione delle macchine fosse di gran lunga più importante del formalismo matematico o della teoria di Maxwell ("nella progettazione di una dinamo la scelta della corretta proporzione tra le dimensioni dei magneti e quelle delle bobine delle armature ... costituisce più un'arte che una

scienza, dipende cioè più dall'abilità individuale del progettista, che da regole che si possano mettere nero su bianco").

Nella seconda metà degli anni Ottanta del 1800 iniziarono a prendere forma le basi scientifiche dell'elettrotecnica. Ci si rese conto che, aumentando le dimensioni dei macchinari elettrici, era sempre più importante ridurre il numero di tentativi per ogni realizzazione, per ovvii motivi economici. Molti ingegneri cercarono perciò di migliorare la progettazione attraverso metodi ricavati matematicamente e sperimentalmente. Il celebre articolo di Hopkinson del 1886 "Dinamo electric machinery", sulla dinamo e sui suoi circuiti magnetici, divenne un punto di riferimento per la progettazione razionale delle macchine elettriche (come già affermato precedentemente in altro paragrafo). Di pari passo si diffondeva l'uso della tecnica della corrente alternata - la cui teoria matematica era stata formulata negli anni Ottanta da ingegneri di estrazione scientifica (Thomas H. Blakesley, J. Hopkinson, Hertha Ayrton e Alexander Fleming) e da fisici (Oliver J. Lodge e John William Strutt Rayleigh) - che richiedeva l'applicazione dei principi scientifici e del formalismo matematico rispetto a quella della corrente continua ⁽⁴⁰⁾.

Relativamente alla corrente alternata gli ingegneri di formazione meccanica avevano i loro metodi specifici di progettazione e le loro teorie. Partendo da un'analogia con la legge di Ohm, G. Kapp sviluppò una teoria dei circuiti magnetici per la progettazione delle dinamo. Ad integrazione di questa J. Swinburne formulò una teoria della reazione d'indotto, inventando inoltre un proprio metodo, in cui la tensione o la corrente alternata venivano divise in due parti: una componente attiva (I_{watt}) ed una componente reattiva (I_r). La potenza attiva P , dissipata in un circuito, assumeva, secondo Swinburne, la seguente espressione $V \cdot I_{watt}$. Swinburne, che aveva iniziato la sua carriera di ingegnere come apprendista in una fabbrica di locomotive a Manchester, si spostò nel 1880 presso la fabbrica di lampadine Swan. Nel 1885 presso l'officina di Crompton, lavorando alla costruzione delle dinamo, sviluppò la sua teoria. Egli è pertanto un buon esempio di quella che si potrebbe definire una 'teoria da officina'.

⁴⁰ Fin dal 1884 J. W. S. Rayleigh aveva previsto che la corrente alternata avrebbe avuto un "effetto salutare" nella istruzione dei cosiddetti elettrotecnici pratici. Essa infatti proponeva questioni concettuali impegnative. Una di queste era l'effetto di interferenza' determinato dal ritardo della corrente rispetto alla tensione applicata, cioè la differenza di fase tra corrente e tensione.

2.12 Epilogo

A conclusione di questo capitolo, relativamente allo stato della ricerca e della cultura elettrica italiana, si può affermare che all'inizio della prima guerra mondiale il numero dei corsi universitari non era aumentato in modo significativo, non erano stati fondati nuovi istituti di ricerca e in quelli esistenti i finanziamenti non erano aumentati, anche perché l'industria non aveva contribuito in tal senso. Quest'ultimo era un aspetto particolarmente rilevante. La Edison, fino all'inizio della guerra, non diede aiuti finanziari all'IECE, anche se molti dei maggiori nomi della Edison erano anche docenti del Politecnico di Milano. Quanto detto testimonia come la ricerca necessaria all'industria avveniva al di fuori dell'università, nei cantieri, nelle officine, negli studi professionali, in qualche raro caso, come alla Pirelli, in laboratori industriali.

L'elettrotecnica italiana, nonostante fosse sviluppata e capace di raggiungere alcuni rilevanti risultati, non poteva essere considerata simile a quella dei maggiori Paesi industrializzati, anche se non era comunque agli ultimi posti. La condizione della suddetta elettrotecnica italiana emergeva dall'autorevole bollettino internazionale "Science abstracts", dal quale risultava che la percentuale dei lavori italiani sul totale dei lavori segnalati si aggirava, negli anni precedenti il conflitto mondiale, attorno all'1%: precisamente 1,5% nel 1911, 1,4% nel 1912, 1,5% nel 1913 e 0,92% nel 1914. Questi dati sarebbero stati in realtà minori, se non si fossero considerati quei lavori che, pur compresi nella sezione dell'elettrotecnica, erano in realtà di elettrofisica o di radiotecnica.

L'attività di ricerca scientifica in campo elettrico aveva avuto uno sviluppo meno rapido di quello dell'industria elettrica (come testimoniato dal fatto che l'Italia era, per potenza elettrica installata, il sesto o il settimo Paese del mondo e per la sola potenza idroelettrica addirittura il terzo); tuttavia l'industria elettrica italiana si sviluppò maggiormente con l'imitazione di quanto veniva fatto all'estero, piuttosto che con un proprio singolare impegno. Tale industria fu quella che diede maggiore impulso alla ricerca scientifica e maggiori aiuti ebbe da essa, in quanto gli altri settori industriali, da quello meccanico a quello chimico, a quello siderurgico, a quello tessile, fino alla prima guerra mondiale, ebbero con la scienza e la ricerca rapporti pressoché nulli.

In conclusione l'industria elettrica italiana dipendeva dall'estero in taluni settori strategici, come quello delle macchine elettriche, che più di ogni altro richiedeva un forte supporto da parte della ricerca scientifica.

CAPITOLO III

STORIA DELL'ELETTROTECNICA CIRCUITALE

L'elettrotecnica circuitale, ovvero la teoria delle reti elettriche, ha origine in seguito all'invenzione della pila di A. Volta e alla scoperta della legge di Ohm.

La teoria delle reti, sotto l'impulso di un elettromagnetismo sempre più perfezionato, condizionata dalle richieste di una tecnologia in rapida evoluzione, dovette conciliare l'aspetto circuitale-applicativo, inerente a concetti quali la corrente alternata, la dinamica delle reti di potenza e l'interazione magnetoelettrica delle macchine, con l'aspetto prettamente teorico proprio della teoria dei campi dell'elettromagnetismo.

La storia della teoria delle reti elettriche può essere identificata con la storia della moderna ingegneria elettrica.

3.1 Origine della teoria delle reti elettriche stazionarie



Fig. 3.1 - G. S. Ohm (1789-1854).

Il 1826 fu un anno decisivo per la teoria delle reti elettriche stazionarie, in quanto proprio in quell'anno G. S. Ohm (fig. 3.1), sotto l'influenza degli studi compiuti da J. B. Fourier sulla diffusione del calore, enunciò la sua famosa legge, in seguito alla quale ebbe origine la suddetta teoria.

Successivamente nel 1841 J. P. Joule enunciò la legge sulla dissipazione legata ai fenomeni conduttivi e nel



Fig. 3.2 - G. R. Kirchhoff | (1824-1887).

1847 G. Kirchhoff (fig. 3.2) formulò i due noti principi inerenti ai circuiti elettrici; in base a questi principi, quando si connettono tra loro più componenti in modo da costituire una rete di generatori e di resistori, si vengono a determinare, in base alla particolare

configurazione realizzata, relazioni algebriche immediate, di nodo e di maglia, fra le tensioni

e le correnti. Tali relazioni, insieme al legame costitutivo tensione-corrente proprio di ciascun componente, rappresentano, secondo il linguaggio attuale, il modello matematico della rete. Della configurazione delle connessioni tra componenti si sarebbe occupata la cosiddetta topologia delle reti, dei legami costitutivi dei componenti si sarebbe interessato il complesso di discipline, quali l'elettromeccanica, l'elettronica, l'automatica, l'energetica, che, nel corso di questo secolo, sono andate rapidamente sviluppandosi a partire dal tronco primario dell'elettromagnetismo. Così impostata, la teoria delle reti elettriche stazionarie progredì rapidamente. Nel 1853 H. L. F. von Helmholtz enunciò il principio di sovrapposizione degli effetti e quello, ad esso legato, del generatore equivalente. Quest'ultimo, passato pressoché inosservato, sarà ripreso e sviluppato nella sua forma attuale nel 1883 da L. C. Thévenin. La sua versione duale, meno immediata, sarebbe stata infine formulata presso i laboratori Bell, nel 1926, da E. L. Norton.

3.2 I regimi elettrici

Si ritiene opportuno riportare di seguito alcune precisazioni sui regimi delle reti elettriche, al fine di meglio comprendere l'evoluzione della teoria delle reti elettriche.

Se le tensioni e le correnti ai morsetti dei multipoli, che costituiscono una rete, sono costanti nel tempo, si dice che questa funziona in regime stazionario; in caso contrario si dice che la rete funziona in regime variabile.

Un caso particolare, ma di enorme importanza concettuale e pratica, del regime variabile è quello in cui le tensioni e le correnti sono funzioni sinusoidali del tempo tutte della stessa frequenza, si parla in questo caso di regime sinusoidale.

È particolarmente importante osservare che i concetti di tensione, di corrente, di multipolo e di multiporta, caratteristici della teoria dei circuiti, sono propriamente utilizzabili in regime stazionario; essi possono essere mantenuti, approssimativamente e con l'uso di particolari cautele, in regime variabile abbastanza lentamente, mentre svaniscono del tutto, salvo convenzioni e disposizioni costruttive particolari, in regime rapidamente variabile.

La non validità dei concetti di tensione conservativa, corrente conservativa, multipolo (propri della teoria dei circuiti) in regime rapidamente variabile è dovuta al fatto che, in tale regime,

la tensione elettrica non dipende più soltanto da una coppia di punti, ma dall'intera linea che li congiunge, e la corrente non è più associata all'intero circuito, ma alla sezione in cui viene misurata; inoltre l'interazione fra i diversi multipoli non si svolge più esclusivamente, come in regime stazionario, attraverso i morsetti, ma anche per via elettromagnetica attraverso lo spazio circostante, in misura tanto maggiore quanto più rapida è la variazione delle tensioni e delle correnti.

Un regime sinusoidale si dice lentamente variabile o quasi stazionario, se le dimensioni della rete sono trascurabili, in relazione all'approssimazione richiesta, rispetto alla lunghezza d'onda delle grandezze elettriche, che in essa hanno sede. Detta λ la lunghezza d'onda e d una dimensione caratteristica della rete, la condizione di regime lentamente variabile può scriversi:

$$\frac{d}{\lambda} \ll 1$$

Ricordando che la lunghezza d'onda λ si esprime in termini della velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto c e della frequenza f mediante l'equazione:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

la condizione precedente può essere altresì messa nella forma:

$$f \ll \frac{c}{d}$$

Si consideri, per esempio, un impianto elettrico industriale, il quale funzioni alla frequenza di 50 Hz, corrispondente ad una lunghezza d'onda di 6000 km. Ipotizzando una dimensione caratteristica d pari a 6 km, corrispondente all'estensione di una media città, si trova $d/\lambda = 0,001$. Pertanto, con ottima approssimazione, la condizione di regime lentamente variabile è verificata ed i concetti validi per il regime stazionario possono essere senz'altro applicati. Si consideri una linea elettrica di trasporto lunga 750 km alla frequenza di 50 Hz. Assumendo la lunghezza della linea come dimensione caratteristica, si ha $d/\lambda = 0,125$. In questo caso una parte della potenza entrante viene persa per radiazione; la rappresentazione della linea come

doppio bipolo è ancora approssimativamente valida, dato che la perdita è in generale piccola rispetto alla potenza trasmessa. Si consideri da ultimo un'antenna a stilo della lunghezza di 0,5 m alimentata da una corrente sinusoidale alla frequenza di 1 GHz. Si ha $d/\lambda = 1,67$. L'antenna irradia tutta la potenza, che riceve, e non può quindi essere trattata, senza particolari accorgimenti, con i metodi validi per il regime quasi stazionario.

I circuiti in regime quasi stazionario, in quanto possono descriversi mediante l'interconnessione di unità discrete, sono detti circuiti a parametri concentrati. I circuiti in regime rapidamente variabile, descrivibili soltanto mediante grandezze di campo distribuite nello spazio, sono detti circuiti con parametri distribuiti.

I concetti precedenti possono essere precisati, osservando che tensione e corrente sono grandezze globali ottenute per integrazione di linea delle grandezze locali, forze elettriche e magnetiche. In regime stazionario le grandezze locali variano nello spazio, ma sono costanti nel tempo; in regime comunque variabile esse variano nello spazio e nel tempo e tale variabilità assume il carattere di propagazione ondosa; si dice perciò che il campo si propaga per onde elettromagnetiche. Nel caso intermedio del regime quasi stazionario le grandezze locali approssimativamente variano in ogni punto nel tempo, senza che la perturbazione si propaghi da un punto all'altro, la variabilità si riduce a una sovrapposizione temporale di stati stazionari.

Il campo elettromagnetico si attenua allontanandosi dalle sorgenti con legge inversamente proporzionale al quadrato della distanza nel caso stazionario, alla distanza nel caso comunque variabile. E' pertanto evidente che nel caso stazionario, e approssimativamente in quello quasi stazionario, esso rimane naturalmente confinato all'interno o nella stretta prossimità degli oggetti elettrici, mentre nel caso comunque variabile può estendersi a distanze maggiori. Per tale motivo in regime stazionario e in regime quasi stazionario l'interazione fra i diversi oggetti elettrici avviene esclusivamente attraverso i morsetti, mentre in regime comunque variabile l'interazione può avere luogo anche attraverso la propagazione elettromagnetica. È comunque possibile, con l'uso di convenienti schermature, confinare i campi entro regioni ben delimitate; in questo caso il concetto di oggetto elettrico e di rete elettrica mantengono la loro piena validità anche in regime rapidamente variabile.

Si osservi, da ultimo, che il confinamento del campo elettromagnetico all'interno degli oggetti elettrici rende il comportamento delle reti dipendente soltanto dal modo in cui gli oggetti sono stati interconnessi fra loro e del tutto indipendente dalla posizione degli oggetti nello spazio.

3.3 Dal regime stazionario al regime variabile: il contributo della teoria dei campi

In seguito alla scoperta dell'induzione elettromagnetica da parte di Faraday ed altri ricercatori a fianco del regime stazionario comparve il più generale regime variabile. Inizialmente avvenne un'estensione spontanea delle leggi inerenti alle reti elettriche stazionarie, già enunciate in precedenza, al suddetto regime variabile; tuttavia tale approccio risultava ampiamente inadeguato nei suoi fondamenti teorici e nei corrispondenti limiti di impiego. Era necessario perciò, da parte dei fisici matematici, rivedere il suddetto approccio in modo più rigoroso; ciò avvenne a partire dal 1864 con la "Dynamical Theory" maxwelliana. Da questa, in particolare, sarebbe apparso in modo evidente, come le equazioni del campo elettromagnetico non fossero di interesse dei soli teorici, ma fossero invece in grado di fornire risposte rigorose anche alle domande che, in modo crescente, venivano poste dai tecnici elettrici.

In realtà, in quegli anni, l'elettrotecnica guardò alla teoria maxwelliana come ad una teoria non necessaria per le concrete esigenze tecnico-pratiche di un'attività industriale in fase di sviluppo. Tale prospettiva privò la nascente ingegneria elettrica dei contributi, che la scienza elettromagnetica era in grado di fornire al settore applicativo; tuttavia la teoria delle reti progredì per anni con eccellenti risultati concreti, documentati dalla formulazione delle prime equazioni integro-differenziali, ohmico-induttivo-capacitive, nella propria autonoma ricerca (⁴¹). Prendeva avvio in tal modo la teoria delle reti elettriche in regime variabile.

L'autonomia della teoria delle reti dall'elettromagnetismo classico proseguì fino al 1888, quando, scontratosi con i risultati di un esperimento di Hertz, l'approccio empirico, proprio della suddetta teoria di quegli anni, subì un'improvvisa, quanto inaspettata, battuta d'arresto;

⁴¹ Applicando il 2° principio di Kirchhoff ad un circuito ohmico-induttivo in regime variabile, si ottiene un esempio elementare di equazione integro-differenziale, ovvero si ottiene la seguente equazione: $v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot di(t)/dt$.

in breve la teoria delle reti, fino ad allora sviluppata, forniva in alcuni casi risultati non attendibili per quanto attiene al regime variabile. Sarà merito di O. Heaviside, in una lettera inviata ad Hetz nell'agosto del 1889, l'aver fornito, rifacendosi alla teoria dell'elettromagnetismo, determinate condizioni/indicazioni per l'applicazione delle equazioni della teoria delle reti al cosiddetto regime variabile; condizioni che successivamente furono rielaborate da Abraham⁽⁴²⁾. Grazie al ricorso preliminare alla più generale teoria dei campi, la teoria delle reti, fino a quel momento ritenuta del tutto autonoma da questa, trovava dunque la sua prima rigorosa condizione di validità, grazie alla quale si rese possibile l'estensione al regime variabile delle relazioni di Ampère, Neumann, Kirchhoff; estensione fino allora indiscriminatamente compiuta dai tecnici senza alcun fondamento teorico.

Stante quanto sopra, una rete elettrica non sarebbe più stata considerata come un insieme fisico di elementi bipolari che, delimitati da frontiere geometriche, materialmente la costituiscono. D'ora in poi, accertate preliminarmente le condizioni di Abraham, il campo elettromagnetico oggetto di analisi sarebbe stato invece partizionato nella riunione di più componenti distinti, i bipoli in senso elettrico, ciascuno dei quali delimitato da una propria frontiera elettromagnetica di estensione e configurazione variabile con le frequenze in gioco. All'esterno di ciascuna di queste superfici /frontiere ogni componente risulta accessibile elettromagneticamente solo attraverso coppie ordinate di terminali, ovvero i morsetti, costituenti le cosiddette porte elettriche. In corrispondenza ad essi sono infatti definibili, nella necessaria forma univoca, le grandezze concrete tensione e corrente. Queste, definibili solo all'esterno della frontiera elettromagnetica, assumono il ruolo di variabili descrittive del componente.

Nel 1927, a cento anni dunque dalla legge di Ohm, J. R. Carson pubblicò l'opera "Electromagnetic theory and foundations of electric circuits theory", prosecuzione di tipo circuitale della "Dynamical Theory". Quest'opera dimostrò come, fatta eccezione per il regime stazionario, l'approccio circuitale, in teoria del tutto estraneo alle equazioni di Maxwell, una volta verificate le condizioni di Abraham, permetteva di sostituire le equazioni differenziali alle derivate parziali con equazioni ordinarie, facilitando di molto la risoluzione

⁴² Le condizioni di Abraham, attualmente usate in Elettrotecnica, sono necessarie per accertare, con l'instaurarsi di un regime quasi-stazionario, la legittimità di una rappresentazione circuitale dei fenomeni elettromagnetici. Secondo tali condizioni l'approccio circuitale dà risultati corretti solo nel caso in cui la lunghezza d'onda, associata alla frequenza più veloce in gioco, sia molto maggiore del diametro della sfera minima contenente l'intero circuito.

dei circuiti delle reti elettriche.

3.4 Cenni sulla teoria delle reti magnetiche

Il calcolo dell'energia, di natura prevalentemente magnetica, accumulata all'interno delle frontiere elettromagnetiche, portò con sé, una volta verificate le condizioni di regime quasi-stazionario, la necessità di una rappresentazione circuitale elettrica e magnetica tramite le nozioni di riluttanza, induttanza e capacità.

In effetti le prime esperienze e le prime riflessioni sulla nozione di circuito magnetico, legate ad un approccio molto intuitivo, furono di molto antecedenti a quelle riconducibili alla condizione di Abraham. Esse possono infatti farsi risalire all'aprile del 1821, quando Cumming espose alcune idee sul concetto di conducibilità magnetica. Successivamente, con A. De La Rive, si pervenne alla esplicita nozione di circuito magnetico chiuso. Tra il '39 ed il '41 J. P. Joule giunse a correlare la potenza di un elettromagnete alla sezione del suo corrispondente circuito e parlò per primo di una "resistenza all'induzione" come di una grandezza proporzionale alla lunghezza del circuito magnetico stesso. Nelle sue "Experimental Researches in Electricity" M. Faraday, evidenziata la chiusura delle linee di forza, intuì la presenza di una causa analoga alla f.e.m agente nei circuiti elettrici. Le stesse idee si confermarono nell'opera contemporanea di Lord Kelvin e comparvero infine, sotto forma del concetto di conducibilità magnetica, nel "Trattato" di Maxwell.

Nel 1873 sulla rivista "Philosophical Magazine" H. A. Rowland, introdotte le nozioni di resistenza R alle linee di forza, forza magnetizzante M e numero Q di linee di forza corrispondenti, presentò per un circuito magnetico toroidale la legge seguente:

$$Q = M/R \tag{3.4.1}$$

esplicitandone l'analogia formale con la legge di Ohm.

Nel 1882 M. Bosanquet introdusse, vista nella sua lettura attuale, la nozione di forza magnetomotrice M e ne confermò l'analogia formale con la forza elettromotrice E . Nel contempo egli portò avanti in modo sistematico le indagini sulla "resistenza magnetica", elaborando le relazioni per il calcolo della resistenza equivalente a partire da un circuito comunque configurato. Nel 1884 Rowland introdusse la relazione

$$M = NI$$

(3.4.2)

ed esplicitò il legame tra la riluttanza e la geometria del circuito magnetico. Comparvero in tale occasione, per la prima volta, i concetti di flussi dispersi.



Fig. 3.3 - J. Hopkinson (1849-1898).

L'evoluzione della teoria trasformatorica, basata sull'identificazione della rete magnetica associata al campo e della corrispondente rete elettrica, impose un'evoluzione ancora più radicale alle suddette ricerche. I risultati conseguiti furono poi estesi al macchinario rotante grazie a J. Hopkinson (fig. 3.3) e G. Kapp (fig. 3.4).



Fig. 3.4 - G. Kapp (1852-1922).

Tra il 1885 e il 1886 su "Electrician" G. Kapp, schematizzando il circuito magnetico di una estesa serie di dinamo e formalizzando le corrispondenti equazioni circuitali magnetiche, apportò contributi applicativi cruciali al progetto delle macchine dinamo elettriche. Nel 1886 J. Hopkinson presentò alla Royal Society uno studio evoluto della teoria dei circuiti magnetici, che consentiva di dedurre analiticamente il legame tra la f.e.m della dinamo e la sua corrente. In questo studio per la prima volta le caratteristiche venivano costruite separatamente per i vari tratti e successivamente composte, a seconda delle connessioni, a parità di flusso o di differenza di potenziale magnetico. Nel 1890, al fine di tener conto quantitativamente dei flussi dispersi, venne infine introdotto dall'Hopkinson il coefficiente di dispersione (⁴³).

⁴³ Nei primi anni '80 gli elettrotecnici avevano compreso come il modello maxwelliano, legato alle auto e mutue induttanze, pur corretto agli effetti esterni, cioè nel senso del calcolo di tensione e corrente ai morsetti, fosse del tutto inadeguato per le applicazioni tecniche. Quest'ultima consapevolezza derivava dal fatto che esso non solo non si prestava facilmente a mettere in conto le non linearità del legame $b(h)$, ma soprattutto non conduceva al calcolo di quei flussi comune (presente nel circuito ferromagnetico) e disperso (concatenato con uno solo dei due solenoidi), la cui conoscenza, in termini di equivalenza agli effetti interni, era indispensabile per il costruttore. Il perfezionamento della teoria del mutuo induttore, introdotto da Hopkinson e da Kapp sul finire degli anni '80, era consistito nell'adottare un metodo, cosiddetto ibrido, nel quale alla terna degli elementi $L1$, $L2$, M , propri del circuito elettrico, veniva associata quella corrispondente delle permeanze $\lambda d1$, $\lambda d2$, $\lambda \mu$ deducibili dal circuito

Nel contempo, impiegando opportuni solenoidi sonda da lui stesso realizzati, Hopkinson poté, compiendo tutta una serie di misure, confrontare la sua indagine teorica con l'evidenza sperimentale. Con tale approccio teorico fu realizzata la dinamo Hopkinson – Edison ed i risultati furono assolutamente probanti.

Il contributo risolutivo si ebbe però solo nel 1949 con E. Colin Cherry, il quale dimostrò come la rete elettrica corrispondente ad una rete magnetica fosse da questa deducibile in modo diretto per dualità. Mappato il campo magnetico e dedotto da questo la rete magnetica, la deduzione di quella elettrica diveniva a questo punto un'operazione immediata.

3.5 Il regime alternato sinusoidale ed il metodo simbolico

Con l'aumento, dovuto all'espansione industriale, della richiesta di potenza la tecnica della corrente continua, con i suoi modesti valori di tensione in gioco, si trovò del tutto inadeguata, sia nelle potenze unitarie generabili, sia sulle distanze valicabili con gli elettrodotti. Occorreva a questo punto il passaggio alla tecnica della corrente alternata e quindi all'uso del trasformatore, grazie al quale, per le successive sezioni di generazione, trasmissione e distribuzione, potevano essere adottati i livelli più idonei di tensione.

Tale passaggio, comportando l'uso di algoritmi più onerosi di quelli richiesti dalla corrente continua, colse di sorpresa i tecnici, mettendone in luce il modesto livello di preparazione. In quei tempi soltanto E. Mascart, J. Joubert (⁴⁴), A. Potier, O. Heaviside e G. Ferraris avevano alcune concrete conoscenze sull'argomento. Esse, mutate da approfondimenti in altri settori, non apparivano tuttavia ancora consapevolmente indirizzate all'elettrotecnica. In realtà la teoria dell'alternata, una volta confermata da parte dei fisici la validità della legge locale di Ohm per i regimi lentamente variabili, era già totalmente implicita nelle equazioni di Maxwell; bastava integrare queste equazioni in corrispondenza ad ingressi sinusoidali lentamente variabili. Ciò non accadde. Nella maggior parte dei casi si preferirono infatti metodi “alternativi” assai più complessi.

magnetico concatenato e rispettivamente rappresentative dei tubi di flusso disperso e comune.

⁴⁴ A Mascart e Joubert, con il famoso trattato in 2 volumi pubblicato tra il 1882 e il 1886, si deve la prima concreta diffusione, presso la scuola continentale ispirata all'Ecole, delle idee campistiche di scuola inglese. Si tratta di un testo che, rivisitato oggi, non cela il non ancora completo superamento dei residui di meccanicismo presenti nella “Dynamical Theory”; tale superamento avverrà infatti circa un decennio dopo grazie alla “Electromagnetic Theory” di Heaviside. Ai 2 studiosi francesi va comunque il merito, di aver dato un primo esempio postmaxwelliano di trattazione completa ed organica per elettrici della teoria elettromagnetica.

Uno dei contributi al regime alternato sinusoidale si deve a Galileo Ferraris, il quale, nel dimostrare la fattibilità tecnica del trasformatore, ne dedusse il rendimento, formalizzando allo scopo la formula della potenza attiva

$$P = VI \cos \phi. \quad (3.5.1)$$

Restava, tuttavia, aperto il problema più oneroso e cioè la messa a punto di algoritmi integro-differenziali, con cui trattare il regime sinusoidale. La questione era molto complessa. Un'indagine condotta nel 1890 mostrò che negli Stati Uniti solo quattro università (MIT, Armour Institute ed altre due) prevedevano tra le materie di studio il calcolo differenziale.

Una prima soluzione giunse nel 1885 con la pubblicazione, su "The Electrician", da parte del matematico Thomas Blakesley di un ampio e cruciale articolo dal titolo "Alternating currents". In esso, sfruttando la corrispondenza tra sinusoidi e vettori rotanti, la ricerca della soluzione di regime veniva ricondotta ad una serie di costruzioni grafiche da compiersi su vettori rotanti sincroni con il semplice ausilio di righello, compasso ed alcuni concetti di trigonometria. Quasi contemporaneamente G. Kapp, studiando i trasformatori, adottò questo stesso approccio. Risultò in tal modo possibile mettere a disposizione dell'elettrotecnica tutto quel patrimonio di potenti e consolidate costruzioni grafiche che, da tempo, erano proprie della Scienza delle Costruzioni.

La risposta degli elettricisti fu immediata. Confermata preliminarmente l'isofrequenzialità e la sinusoidalità della risposta di regime, le equazioni dei circuiti divenivano in tal modo molto più semplici. Soprattutto esse risultavano più maneggevoli rispetto alle equazioni differenziali, così tanto lontane dalla formazione di base dei tecnici dell'epoca. Nel contempo, provenendo essi in gran parte da ingegneria meccanica o civile, la dimestichezza con la statica grafica risultava per loro un percorso concettuale obbligato ed efficace. Lo stesso C. P. Steinmetz accolse con entusiasmo il contributo di T. Blakesley e di G. Kapp e nel 1893 introdusse la trasformata, che portava il suo nome. In essa il metodo degli esponenziali complessi, già adottato da L. Euler, A. J. Fresnel e successivamente nel 1847 da H. von Helmholtz, si fondeva con il metodo dei vettori rotanti di Blakesley, Kapp e Kennelly. L'approccio, convertendo in forma algebrica complessa la soluzione di regime di equazioni integro-differenziali, si rivelò essenziale per la corrente alternata. Aveva origine in tal modo il cosiddetto metodo simbolico.

Nel campo delle potenze, correlandola all'accumulo energetico nei campi elettrico e magnetico, fu introdotta la potenza reattiva:

$$Q = VI \sin \phi \quad (3.5.2)$$

e successivamente fu introdotta la potenza apparente:

$$A = VI. \quad (3.5.3)$$

Tali legami furono poi unificati nel dominio fasoriale da Steinmetz mediante una relazione del tipo seguente:

$$\mathbf{A} = \mathbf{V} \times \mathbf{I}^* \text{ (}^{45}\text{)}, \quad (3.5.4)$$

la quale ricondusse la potenza complessa al formalismo proprio della corrente continua.

Di tale potenza P. Boucherot, con un principio nel seguito rigorosamente dimostrato da P. Langevin, avrebbe enunciato la conservazione in una qualunque rete lineare e in regime sinusoidale.

L'estensione al regime periodico non sinusoidale, resa possibile dalla serie di Fourier, avrebbe condotto alla teoria di C. Budeanu e con essa alla nozione di potenza deformante (1927).

Sarà infine B. Tellegen nel 1952, con il suo teorema della conservazione delle potenze virtuali, a darne, in una forma elegante e stringata consentita dal moderno approccio topologico alla teoria delle reti, la dimostrazione attuale valida in qualsiasi regime di funzionamento.

⁴⁵ I simboli in grassetto rappresentano grandezze complesse, l'asterisco indica il complesso coniugato di un numero complesso.

3.5.1 Il metodo simbolico (⁴⁶)

Con il metodo simbolico (⁴⁷) è possibile associare ad una grandezza sinusoidale funzione del tempo del tipo

$$a(t) = A \sin(\omega t) \quad (3.5.1.1)$$

un vettore rotante nel piano complesso del tipo

$$\mathbf{a} = A e^{j\omega t}. \quad (3.5.1.2)$$

Con tale approccio è possibile trasformare un'equazione integro-differenziale in regime variabile alternato sinusoidale in un'equazione algebrica complessa; per esempio considerando la seguente equazione

$$v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot di(t)/dt, \quad (3.5.1.3)$$

inerente ad un circuito ohmico-induttivo in regime variabile sinusoidale, nella quale risulti

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad \text{ed} \quad i(t) = I \sin(\omega t - \phi) \quad (3.5.1.4)$$

con ϕ angolo di sfasamento della corrente rispetto alla tensione, ed andando a sostituire nella 3.5.1.3 a $v(t)$ il vettore rotante

$$\mathbf{v} = V e^{j\omega t} \quad (3.5.1.5)$$

ed a $i(t)$ il vettore rotante

$$\mathbf{i} = I e^{j(\omega t - \phi)}, \quad (3.5.1.6)$$

si ottiene la seguente equazione:

$$V e^{j\omega t} = R \cdot I e^{j(\omega t - \phi)} + L \cdot d(I e^{j(\omega t - \phi)})/dt. \quad (3.5.1.7)$$

Svolgendo l'operazione di derivazione e semplificando il termine $e^{j\omega t}$ a primo e secondo membro, ipotizzando verificate determinate condizioni, si ottiene:

⁴⁶ Il metodo simbolico viene presentato nel testo in modo semplificato e sintetico, al solo fine di fornire un'integrazione ed un chiarimento della trattazione storica dell'argomento.

⁴⁷ Valido in regime variabile alternato sinusoidale.

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}e^{-j\phi} + \mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{I}e^{-j\phi}. \quad (3.5.1.8)$$

Posto $\mathbf{I} = \mathbf{I}e^{-j\phi}$ e $\mathbf{V} = \mathbf{V}$, dove \mathbf{I} e \mathbf{V} sono rispettivamente il fasore della corrente e della tensione, ovvero dei numeri complessi costanti (vettori fissi nel piano complesso), l'equazione 3.5.1.8 diventa:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{I}, \quad (3.5.1.9)$$

che rappresenta una relazione di tipo algebrico nel campo complesso, come volevasi dimostrare. Più in generale con il metodo simbolico alle grandezze elettriche come tensione o corrente con la stessa pulsazione viene associato, secondo Steinmetz, il rispettivo fasore ed ogni elemento circuitale viene sostituito con l'impedenza complessa corrispondente. Si risolve quindi il circuito, come se fosse un circuito resistivo, applicando la legge di Ohm e le leggi di Kirchhoff simboliche, ed infine si ritorna alle grandezze sinusoidali antitrasformando.

Il metodo simbolico, dovuto a C. P. Steinmetz, apparve solo nel 1893 con la memoria dal titolo "Complex quantities and their use in Electrical Engineering". Le grandezze reattanza ed impedenza erano comunque già state introdotte da Joubert nel 1880 in occasione delle prove compiute su un grande alternatore Alliance. Ulteriori contributi vennero poi da Heaviside con le grandezze ammettenza e suscettanza. L'accettazione di questo approccio non fu tuttavia immediata; per molto tempo numerosi studiosi incredibilmente preferirono operare con il laborioso approccio scalare-trigonometrico. Ancora nel 1896 "Electricity in the service of man", un manuale di 900 pagine, non riservava alcuno spazio alla "matematica dell'alternata", perché la riteneva estranea agli scopi del libro stesso.

3.5.2 La corrente polifase

Legata al geniale artificio di combinare campi magnetici oscillanti prodotti da altrettante correnti alternate, la tecnologia polifase prese ben presto a diffondersi. Partendo da avvolgimenti fissi, un sistema di tale tipo, concepito originariamente da Ferraris in forma bifase, conduceva ad un campo magnetico rotante, grazie al quale un cilindro, che vi fosse immerso, poteva essere forzato alla rotazione. Nel seguito, con M. Dolivo-Dobrowolski (1891), si diffuse il sistema trifase. Egli lo preferì al precedente bifase, osservando come l'aumento del numero delle fasi, oltre ad accrescere l'uniformità in senso spaziale del campo

magnetico al traferro, consentisse, in ipotesi di simmetria fisica del sistema, la presenza di una potenza istantanea costante.

Il primo approccio circuitale al sistema trifase fu di tipo classico; ogni configurazione trifase veniva vista come la “riunione” di due monofase distinte, aventi in comune il terzo filo come ritorno. Corrispondentemente i vari componenti venivano riguardati come tripoli in senso elettrico. Quanto allo studio delle variabili descrittive necessarie in questo caso, esso conduceva alle nozioni di grandezza di fase e di linea.

Nel seguito, con Stokvis (1914) e C. Fortescue (1918), si passò al metodo razionale; ogni sistema trifase, pensato a simmetria fisica, veniva considerato come il risultato della sovrapposizione di tre distinte reti trifase simmetriche, denominate di sequenza diretta, inversa ed omopolare. Ciascuna di queste, proprio in virtù della sua simmetria, poteva a sua volta essere ricondotta ad un circuito monofase equivalente. In tal modo, complice il principio di sovrapposizione, l’analisi delle reti trifase riportava senza eccezione a quella di reti monofase equivalenti, una per ciascuna sequenza.

3.6 Il regime transitorio ed il metodo operatoriale

Alla fine del secolo scorso lo studio dei transitori, strettamente vincolato al dominio del tempo, poteva contare solo sull’analisi classica. Seguendo questa via, esso aveva dato comunque risultati importanti. Helmholtz aveva studiato i circuiti induttivi (1851), Kelvin quelli ohmico-induttivo-capacitivi (1853), Siemens, infine, quelli capacitivi (1857). Lo studio dei transitori, pur supportato da una notevole mole di risultati, risultava ancora ben lontano da un’impostazione organica ed unificata; nel 1911 Steinmetz affermava che l’analisi dei transitori non aveva ancora acquisito la completezza ed il rigore che erano invece propri da tempo della matematica superiore.

Nel frattempo dal 1886 Heaviside, spinto dalla complessità delle equazioni delle linee a costanti distribuite, di cui stava occupandosi, aveva sviluppato dei nuovi metodi di calcolo. L’originalità, su cui si basava il suo approccio, era quella di leggere in un’equazione differenziale l’espressione della derivata df/dt di una funzione come il prodotto algebrico della funzione stessa $f(t)$ per un operatore d/dt indicato con la lettera p (sinonimo di pulsazione) e di poter così fare uso delle regole ordinarie dell’algebra. Con tale artificio le equazioni

integro-differenziali di una rete lineare, tempo-invariante, a costanti concentrate divenivano di tipo algebrico, per cui la corrente incognita risultava esprimibile in una forma polinomiale del tipo seguente: $i(t) = e(t)/z(p)$. Il procedimento era dunque, nella sua semplicità apparente e nella sua immediatezza, quanto mai allettante, perché sembrava garantire, con il superamento di tutte le complessità proprie del metodo classico, un metodo diretto ed unificato. Tale approccio, come aveva mostrato lo stesso Heaviside, potendo estendersi alle equazioni a derivate parziali, pareva inoltre prospettare un'analogia semplificazione concettuale anche per la teoria delle reti a costanti distribuite. Immediata era poi l'estensione ad altri ambiti applicativi dal calore all'idraulica. Andava delineandosi così il metodo operatoriale.

Non era facile però interpretare in modo coerente espressioni di tale tipo, nelle quali funzioni del tempo, rappresentative di ingressi noti, erano associate a un puro e semplice simbolo grafico. Per tale motivo le critiche a carico del fisico inglese furono numerose.

Osservò al riguardo lo stesso G. Giorgi, che di Heaviside fu grande ammiratore: «Mal compresa da principio, la sua opera desta ammirazione sempre di più ogni anno che passa. Quando i suoi contemporanei obbiettavano, che le regole dettate da lui conducevano a risultati erronei, Heaviside rispondeva: “quando le applicate voi, questo accade; quando le applico io, no”». Questa constatazione mette in evidenza l'intuito superiore del grande autore inglese.

Nel seguito, accanto a quelli di Giorgi, si sarebbero avuti i contributi di approfondimento derivati dai lavori di T. J. Bromwich e J. R. Carson. Solo con G. Doetsch (1927) e B. van der Pohl (1929) si sarebbe però giunti alla lettura attuale, basata in modo definitivo sulle nozioni di funzione di trasferimento e di trasformata di uscita. A fronte di tali risultati, e sulla scia di alcune idee originarie di S. D. Poisson, la moltiplicazione nel campo complesso sarebbe successivamente risultata interpretabile nel dominio del tempo con quella particolare operazione di integrazione, la convoluzione, che riporta a Duhammel (1833).

3.6.1 Il metodo operatoriale ⁽⁴⁸⁾

Con il metodo operatoriale ⁽⁴⁹⁾, detto anche metodo della trasformata di Laplace, è possibile associare ad una grandezza funzione del tempo $a(t)$ una grandezza $\mathbf{A}(s)$ funzione della variabile complessa $s = \sigma + j\omega$ ⁽⁵⁰⁾. Con tale approccio è possibile trasformare un'equazione integro-differenziale in regime variabile in un'equazione algebrica complessa; per esempio considerando la seguente equazione

$$v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot di(t)/dt, \quad (3.6.1.1)$$

inerente ad un circuito ohmico-induttivo in regime variabile, nella quale $v(t)$ ed $i(t)$ sono funzioni reali di variabile reale, ed andando a sostituire a $v(t)$ la grandezza complessa $\mathbf{V}(s)$, a $i(t)$ la grandezza complessa $\mathbf{I}(s)$ e ad $di(t)/dt$ la grandezza complessa $s \cdot \mathbf{I}(s)$ ⁽⁵¹⁾, si ottiene la seguente equazione:

$$\mathbf{V}(s) = R \cdot \mathbf{I}(s) + L \cdot s \cdot \mathbf{I}(s), \quad (3.6.1.2)$$

che rappresenta una relazione di tipo algebrico nel campo complesso, come volevasi dimostrare. Più in generale con il metodo operatoriale alle grandezze elettriche come tensione o corrente funzioni della variabile reale tempo vengono associate le rispettive grandezze complesse, funzioni di variabile complessa, ed ogni elemento circuitale viene sostituito con l'impedenza complessa corrispondente. Si risolve quindi il circuito, come se fosse un circuito resistivo, applicando la legge di Ohm e le leggi di Kirchhoff, ed infine si ritorna alle grandezze nel dominio del tempo antitrasformando secondo Laplace.

⁴⁸ Il metodo operatoriale viene presentato nel testo in modo semplificato e sintetico, al solo fine di fornire un'integrazione ed un chiarimento della trattazione storica dell'argomento.

⁴⁹ Valido in regime variabile.

⁵⁰ L'operazione, che permette di eseguire l'associazione di cui al testo, è detta trasformazione di Laplace e si esegue calcolando il seguente integrale: $\int_0^{\infty} a(t) \cdot e^{-st} dt$; più semplicemente, indicando l'operazione di trasformazione secondo Laplace con la lettera L, si ha la seguente associazione: $\mathbf{A}(s) = L[a(t)]$, dove $\mathbf{A}(s)$ è una funzione (grandezza) complessa di variabile complessa ed $a(t)$ la grandezza da trasformare.

⁵¹ Per una nota regola di trasformazione la trasformata di Laplace della derivata di una funzione è uguale al prodotto della trasformata di Laplace della funzione per la variabile complessa s .

3.7 Apporti della teoria dei sistemi alla teoria delle reti elettriche

Negli anni 60, grazie al calcolo operatoriale e alla teoria dei grafi, la teoria delle reti entrò a far parte della più generale teoria dei sistemi, dalla quale, avvalendosi dei concetti di variabile di stato, di ingresso-uscita e di variabile di rete, ne acquisì la logica, sintetizzata dall'impiego di modelli matematici espressi nella seguente forma ricorsiva:

$$\begin{aligned}d[X]/dt &= [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \\ [Y] &= [C] \cdot [X] \quad (^{52})\end{aligned}\tag{3.7.1}$$

E' stato possibile applicare successivamente i concetti della teoria dei sistemi alla teoria delle reti, quali ad esempio i seguenti: funzione di trasferimento, integrale di convoluzione, risposta all'impulso, Fast Fourier Transform, Teorema del campionamento. L'uso simultaneo della teoria dei grafi (⁵³), nel frattempo portato ad un alto grado di perfezione formale, avrebbe agevolato poi la scrittura preliminare dell'equazione di stato, consentendone la formalizzazione diretta del modello matematico.

3.8 Dal metodo campistico al metodo circuitale

Nel periodo postmaxwelliano l'elettrotecnica si scisse in due posizioni distinte e, per certi aspetti, anche contrapposte. Da un lato prevaleva l'impostazione dei fisici matematici, contraddistinta dall'approccio campistico; dall'altro, influenzata dalle esigenze proprie di una conoscenza efficace, andava sempre più affermandosi l'impostazione di natura tecnica, basata invece su un approccio sperimentale di natura più direttamente circuitale.

⁵² La parentesi quadra indica una matrice; la matrice colonna [Y] rappresenta le uscite, la matrice colonna [X] le variabili di stato, la matrice colonna [U] gli ingressi.

⁵³ La teoria dei grafi risalente agli anni '50 avrebbe aggiunto, alle già consuete nozioni di nodo, lato e maglia, quelle successive di albero, coalbero, insieme di taglio, anello, ... I concetti di tale teoria avrebbero consentito di individuare, con immediatezza ed in tutta la loro generalità, gli insiemi di correnti e di tensioni indipendenti deducibili da una rete. Essi avrebbero permesso inoltre di introdurre, a partire dai principi di Kirchhoff, i metodi di risoluzione delle reti elettriche degli anelli e degli insiemi di taglio. Risalendo alle origini, L. Euler fu il primo nel 1736 a porre in forma topologica una questione concreta: il problema urbanistico di Königsberg, la sua città. Nel 1874 A. Cayley, docente a Cambridge, introdusse la nozione di albero. Nel 1895 H. Poincaré con la sua "Analysis situs" conferì alla materia un quadro sistematico coerente, il quale fu infine applicato dal cinese K. T. Wang nel 1934 alle reti elettriche.

In questa dicotomia sempre più evidente si rendeva necessaria la scelta preliminare del percorso concettuale da seguire, ovvero se la disciplina doveva essere proposta a partire dai campi verso le reti (metodo storico), oppure in senso opposto (metodo logico).

In tale questione intervenne Giovanni Giorgi, il quale il 12 aprile 1896 dalle pagine di “The Electrician” nell’articolo «The foundations of electrical science» affermò non solo che qualunque gruppo appropriato di fenomeni e di grandezze elettriche poteva essere assunto come fondamentale, ma che vi era nel contempo tutto l’interesse a semplificare l’esposizione, introducendo dapprima il circuito elettrico e da qui progredendo verso i campi e le onde. L’articolo di Giorgi, una pietra miliare con la quale epistemologicamente si evidenziava la sostituzione in elettrotecnica del metodo storico con quello logico, segnava in modo irreversibile la transizione dall’indirizzo antico a quello moderno.

Il Giorgi con le sue Lezioni di Fisica Matematica, pubblicate nel 1926-27, permise alla Scienza Elettrica di intraprendere una nuova strada, basata su un approccio lagrangiano e legata nel contempo, in accordo con la sua presa di posizione su “The Electrician”, sia alla sostituzione del metodo storico con quello logico, sia alla priorità, nell’ordine espositivo, della lettura circuitale rispetto a quella campistica.

Sul piano epistemologico tale impostazione del Giorgi, caratterizzata sia da un forte impatto di generalità e di immediatezza applicativa, che da un radicale risparmio di conoscenze fisico-matematiche preliminari, si basava sull’identità concetto-operazioni propria dell’operazionismo di P. W. Bridgman (⁵⁴), in quegli anni in fase di grande affermazione. Emergeva in tal modo una didattica determinata nell’intenzione di fornire risposte generali e subito. Grazie ad essa l’allievo, evitando una lunga fase di preparazione, era subito condotto a familiarizzare con i concetti ed i metodi di analisi propri di una disciplina direttamente finalizzata ad applicazioni concrete. Quanto al bagaglio delle nozioni preliminari necessarie per l’accesso, esso veniva a ridursi al minimo possibile.

Nonostante l’affermazione del metodo logico ci furono comunque successivi approfondimenti di tipo maxwelliano, volti a fornire ulteriori precisazioni circa i limiti di impiego della teoria

⁵⁴ Secondo la logica classica i concetti assumono il loro significato dalle cose o dagli enti, a cui si riferiscono. Secondo Bridgman, invece, i concetti dovrebbero essere il risultato di operazioni o processi, che hanno portato alla loro definizione. In tal modo nel campo scientifico non esistono concetti dal valore assoluto, ma sempre relativi al processo che ha portato alla loro definizione significativa.

delle reti, i quali diedero luogo a formulazioni perfezionate della condizione di Abraham ed a controesempi da parte di S. Shelkunoff (1971), atti a mostrare sul piano metodologico come la suddetta condizione costituisca una condizione necessaria, ma non sufficiente.

Sviluppando i suoi studi sull'applicazione alla teoria delle reti dell'approccio tensoriale di Levi Civita e Ricci Curbastro, nel 1943, sotto l'impulso delle ricerche condotte in quegli anni alla General Electric nell'area delle Comunicazioni Elettriche, G. Kron, generalizzando l'ormai consolidato approccio alle linee a costanti distribuite, perveniva infine alla rete elettrica equivalente delle equazioni di Maxwell. Tale risultato è sostenuto oggi in modo sempre più concreto dall'avvento dei calcolatori.

3.9 Epilogo

Antecedente al pensiero maxwelliano, la teoria delle reti deve la propria completezza ad un'estensione al cosiddetto regime lentamente variabile delle teorie di Ohm, Faraday e Kirchhoff. Inizialmente autonoma rispetto alle equazioni di Maxwell, la teoria delle reti, non contenendo in sé alcuna indicazione sul ruolo giocato in senso propagativo dalla frequenza, comporta approssimazioni, la cui entità non può essere stabilita a partire dalle osservazioni su cui essa stessa è basata.

La sua area di possibile impiego, fissata dalla sua medesima collocazione storico-culturale, risulta essere in modo esclusivo quella propria del regime lentamente variabile. Qualora infatti se ne estendessero i concetti al regime rapidamente variabile, il suo approccio condurrebbe a risultati di dubbia validità, accettabili solo a posteriori e comunque con la dovuta cautela.

La teoria delle reti, collocata nel contesto dell'elettromagnetismo maxwelliano, può essere correttamente interpretata come la descrizione con altro linguaggio di un insieme di soluzioni approssimate delle equazioni di Maxwell. Tale lettura di natura fisico-matematica consente di evidenziare, con tutta la completezza ed il rigore necessari, sia l'origine campistica dell'approccio circuitale, sia il significato e l'entità dell'insieme delle approssimazioni applicate.

CAP. IV

PERSONAGGI CHE HANNO CONTRIBUITO ALLA NASCITA E ALLO SVILUPPO DELL'INGEGNERIA ELETTRICA

Il presente capitolo riporta delle note prevalentemente di carattere biografico relative ad alcuni illustri personaggi, che, con i loro studi e con le loro ricerche, hanno consentito la nascita e lo sviluppo dell'ingegneria elettrica. Ulteriori informazioni di carattere storico e tecnico (ad esempio enunciazione di teoremi, spiegazione di formule, descrizione di fenomeni, ...) inerenti ai suddetti personaggi sono riportate nei capitoli precedenti ed in appendice. Ampliando il concetto di storia dell'ingegneria elettrica, ovvero includendo nella definizione oltre ad una descrizione delle invenzioni/scoperte succedutesi nel tempo, anche una narrazione biografica dei vari studiosi coinvolti, sono descritti nel presente capitolo alcuni significativi avvenimenti storici attinenti alla vita di scienziati, ingegneri, fisici, matematici, i quali, contraddistinti da spiccate doti intellettive, hanno permesso alla scienza ed alla tecnica elettrica rilevanti progressi dalle origini fino ad oggi.

Il suddetto ampliamento del concetto/definizione di storia è giustificato dall'assunzione che all'origine di un teorema, formula o relazione vi sono anche le vicende personali degli studiosi, in quanto queste influiscono sulla loro formazione mentale e culturale e di conseguenza sulla produzione tecnico-scientifica. Per comprendere le radici profonde di una teoria, non è sufficiente una mera descrizione di date, nomi, ipotesi e dimostrazioni, ma è utile conoscere anche il vissuto dei suoi ideatori. Alla luce di quanto suddetto il presente capitolo può considerarsi un'integrazione dei capitoli precedenti, in quanto, insieme a questi, fornisce una descrizione di fatti, avvenimenti, scoperte ed invenzioni, ossia una visione completa dell'evoluzione dell'ingegneria elettrica.

4.1 Charles Augustin Coulomb



Fig. 4.1 - C. A. Coulomb
(1736-1806).

C. A. Coulomb (fig. 4.1) è stato un fisico francese. Nacque ad Angouleme (comune francese) nel 1736; era figlio di Henry Coulomb, appartenente ad una importante famiglia di Montpellier di legali ed amministratori, e di Catherine Bajet, proveniente da una ricca famiglia di commercianti. Trascorse i primi anni della sua vita ad Angouleme, nel sud-ovest della Francia. Successivamente al trasferimento della famiglia a Parigi frequentò il Collège Mazarin, dove studiò lingue, letteratura, filosofia, matematica, fisica, astronomia e scienze. In seguito a delle difficoltà economiche il padre fece ritornò a Montpellier, mentre la madre continuò a vivere a Parigi con il figlio. Questi ben presto la abbandonò per tornare con il padre a Montpellier, dove nel 1757 entrò nella Società delle Scienze e presentò vari lavori di matematica e astronomia. Successivamente nel 1758 fece rientro a Parigi e nel 1760 venne ammesso alla Scuola del Genio di Mézières⁽⁵⁵⁾ (scuola militare), dove fece amicizia con il gesuita e matematico francese Charles Bossut (1730-1814), che fu uno dei suoi insegnanti, e con Jean Charles Borda (1733-1799).

Conseguì il diploma nel 1761 col grado di luogotenente e venne mandato a Brest, città portuale francese, ma nel 1764 fu trasferito in Martinica, nelle Indie Occidentali, per dirigere i lavori di costruzione del Fort Bourbon, durante i quali manifestò notevoli abilità pratiche e organizzative; le conoscenze apprese durante questa esperienza diedero un importante contributo ad alcuni suoi lavori di meccanica. Si ammalò però in modo grave e la sua salute rimase cagionevole fino alla fine della sua vita.

Nel 1772, rientrato in Francia nel comune di Bouchain, scrisse una memoria di meccanica dal titolo “Essai sur une application des règles, de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l’architecture”, che presentò l’anno successivo all’Accademia delle Scienze di Parigi; alcuni argomenti trattati nella suddetta memoria furono l’influenza dell’attrito e della coesione in alcuni problemi di statica. Coulomb fece uso del calcolo variazionale nella soluzione di alcuni problemi di statica; per questo fu molto stimato dai matematici e

⁵⁵ Mézières è un comune francese.

l'Accademia delle Scienze lo nominò socio corrispondente nel 1774. Nel 1777 vinse il Gran Premio dell'Accademia grazie ad un'importante memoria da lui scritta sugli aghi magnetici e sul modo migliore di realizzarli. In tale memoria trattò per la prima volta il problema dell'elasticità di torsione nei fili cilindrici (capelli e fili di seta) e l'uso della bilancia di torsione, per misurare forze estremamente deboli.

Nel 1779 collaborò a Rochefort alla realizzazione di un forte interamente in legno, che presentò caratteri innovativi, ma che fu molto criticato da altri ingegneri francesi. Durante il soggiorno a Rochefort effettuò ricerche sul fenomeno dell'attrito statico e dinamico, che espose nel trattato dal titolo "Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages", con il quale vinse nel 1781 il Grand Prix dell'Accademia. Risalgono invece al 1784 alcune sue memorie sul concetto di torsione dal titolo "Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de métal", nelle quali espose la legge della elasticità di torsione, uno studio sull'elasticità dei fili di metallo e una teoria sulla azione intermolecolare.

Un insieme di importanti memorie sull'elettricità ed il magnetismo venne elaborato da Coulomb tra il 1785 ed il 1791; nella prima di queste memorie dal titolo "Premier Mémoire sur l'électricité et le magnétisme" descrisse la costruzione della cosiddetta bilancia di torsione di Coulomb, grazie alla quale formulò la legge, che attualmente porta il suo nome, ovvero la cosiddetta legge di Coulomb ⁽⁵⁶⁾ ⁽⁵⁷⁾. Dal 1791 al 1806 elaborò altre 25 memorie, occupandosi soprattutto di distribuzione della carica sui conduttori, di magnetismo e di momenti magnetici.

In seguito alla chiusura di molte istituzioni a causa della Rivoluzione francese, tra le quali l'Accademia delle Scienze, Coulomb lasciò il corpo del Genio Militare francese, si dimise dal suo incarico presso il Comitato dei pesi e delle misure e proseguì le sue ricerche insieme a J. C. Borda in una villa di campagna vicino a Blois (comune francese); tuttavia nel 1795 alla riapertura dell'Institut de France, che aveva preso il posto dell'Accademia delle Scienze, tornò a Parigi e venne eletto membro per la Fisica sperimentale presso il suddetto istituto. Tra

⁵⁶ La legge di Coulomb è riportata al par. 1.9 del cap. 1.

⁵⁷ Enunciata da Cavenish nel 1771.

il 1802 e il 1806 fu nominato ispettore generale dell'Istruzione pubblica e, in particolare, fu responsabile della istituzione dei 'lycées' (licei).

Morì a Parigi nel 1806 a seguito dell'aggravarsi della malattia contratta in Martinica.

4.2 André Marie Ampère



Fig. 4.2 - A. M. Ampère (1775-1836).

A. M. Ampère (fig. 4.2) è stato un fisico francese. Nacque a Lione, città francese, nel 1775 da una famiglia borghese e religiosa. Egli fu anche un matematico, chimico, filosofo e compì importanti studi nei campi della matematica, delle probabilità, della geometria, del calcolo delle variazioni e dell'elettrodinamica. Il padre, coinvolto nel movimento rivoluzionario francese, fu ghigliottinato durante la Restaurazione; questo tragico episodio, insieme ad altri, quali, ad esempio, il suo matrimonio, ebbe risvolti negativi sul suo carattere. Ampère dimostrò fin da subito spiccate doti di concentrazione ed interesse per il lavoro, che gli permisero di dedicarsi allo studio della filosofia, della letteratura, della poesia, della musica e soprattutto della matematica, materia per la quale mostrò di avere particolari capacità; infatti a soli tredici anni compose un trattato sulle sezioni coniche. A Bourg (comune francese) nel 1801 venne nominato professore di fisica e nel 1802 elaborò una teoria matematica del gioco, grazie alla quale ottenne una cattedra al collegio di Lione.

Ad Ampère si deve l'invenzione della cosiddetta "bilancia di Ampère", che serviva per studiare le forze che si esercitavano tra due conduttori percorsi da corrente, le quali erano inversamente proporzionali alla distanza tra i conduttori e direttamente proporzionali alle intensità di corrente (⁵⁸).

Negli anni tra il 1820 ed il 1827 studiò l'elettricità ed il magnetismo, focalizzandosi soprattutto sulle azioni reciproche delle correnti elettriche; proprio per questo Ampère è considerato come il fondatore della elettrodinamica, termine da lui stesso coniato. Alcuni

⁵⁸ L'azione reciproca tra due conduttori percorsi da corrente è descritta al par. 1.12 del cap. 1.

scienziati, tuttavia, mostrarono un certo scetticismo verso le teorie di Ampère, le quali solo dopo 30 anni verranno pienamente riconosciute da studiosi come W. Thomson e Lord Kelvin.

Nel 1826 presentò la memoria dal titolo "Sulla teoria matematica dei fenomeni elettrodinamici dedotta unicamente dall'esperienza", nella quale sosteneva la riducibilità dei fenomeni magnetici a fenomeni elettrici, confutando la teoria dei "vortici" di H. C. Oersted, e considerava l'elettrodinamica come una materia, che era possibile sviluppare da un punto di vista matematico. La teoria verrà successivamente sviluppata e perfezionata dal matematico polacco H. Grassmann e da W. E. Weber; il grande J. C. Maxwell definirà Ampère come il "Newton dell'elettricità".

Negli ultimi anni, oltre a portare avanti i suoi studi, ricoprì, per ragioni economiche, numerosi incarichi di insegnamento ed amministrativi, che logorarono profondamente il suo debole fisico.

Ampère morì nel 1836 a Marsiglia, città francese, per un'infezione polmonare trascurata.

4.3 George Simon Ohm



Fig. 4.3 - G. S. Ohm (1789-1854).

G. S. Ohm (fig. 4.3) è stato un fisico e matematico tedesco. Nacque nel 1789 a Erlangen (città tedesca) da una famiglia protestante; il padre Johann era un fabbro senza alcun titolo di studio, ma, da autodidatta, avendo conseguito una buona preparazione culturale, era riuscito ad istruire personalmente i figli. Ohm a 11 anni si iscrisse al Gymnasium di Erlangen; possedeva già una discreta conoscenza di matematica, fisica, chimica e filosofia, per cui trovò la scuola poco interessante, molto formale e noiosa.

Nel 1805 Ohm si iscrisse all'Università di Erlangen, ma, invece di dedicarsi agli studi, trascorrevva molto tempo danzando, pattinando e giocando a biliardo. Il padre, adirato per il comportamento del figlio, lo mandò in Svizzera, dove nel settembre 1806 ottenne un posto come insegnante di matematica in una scuola a Gottstadt bei Nydau. Nel marzo 1809 Ohm lasciò il suo posto a Gottstadt bei Nydau, per diventare un

tutore privato a Neuchatel (comune svizzero). Per due anni egli si attenne ai suoi doveri di tutore e contemporaneamente continuava i suoi studi di matematica. Successivamente nell'aprile del 1811 ritornò all'Università di Erlangen. Ben presto, resosi conto delle poco probabili possibilità di carriera, lasciò l'Università e ricoprì l'incarico di insegnante statale di matematica e fisica alla scuola Realschule di Bamberg (città tedesca); nel 1816 la scuola fu chiusa e fu trasferito in un'altra scuola di Bamberg, per contribuire all'insegnamento della matematica. Nel 1817 ebbe la possibilità di insegnare matematica e fisica al Gymnasium dei Gesuiti di Colonia (⁵⁹), una scuola migliore delle precedenti e con un ottimo laboratorio di fisica. In questi anni approfondì i suoi studi privati, in particolare studiò i testi dei grandi matematici francesi J. L. Lagrange, A. M. Legendre, J. B. Biot e S. D. Poisson e cominciò, nel frattempo, a realizzare esperimenti di fisica nel suo laboratorio scolastico, in particolar modo sull'elettricità 'galvanica', dopo essere venuto a conoscenza dell'esperimento di H. C. Oersted nel 1820.

Ohm studiò la corrente elettrica in un conduttore metallico. In due lavori del 1826 espose una interpretazione matematica del fenomeno della conduzione elettrica, rifacendosi alla teoria di J. B. J. Fourier inerente alla conduzione del calore, ed enunciò una prima versione di quella che oggi è nota come legge di Ohm (⁶⁰). L'anno successivo la sua teoria dell'elettricità fu riportata nel libro "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet". Nell'introduzione espose una sintesi della matematica necessaria per la comprensione della teoria, in quanto in quel periodo anche i più illustri fisici tedeschi non erano in grado di comprendere la sua trattazione matematica dell'elettricità "galvanica". Nonostante gli sforzi, forse anche a causa di una scarsa chiarezza, il libro non ebbe successo, anche per l'impostazione quantitativa e matematica.

Nel 1827 diede le dimissioni dal suo posto da insegnante per contrasti con il Ministero e si guadagnò da vivere con supplenze occasionali. Nel 1833, a riconoscimento delle sue importanti ricerche nel campo dell'elettrologia, fu nominato professore al politecnico di Norimberga; successivamente divenne rettore fino al 1849.

⁵⁹ Città tedesca.

⁶⁰ La legge di ohm è riportata al par. 1.15 del cap. 1.

Le sue idee in ambienti accademici trovarono una scarsa accoglienza, anche a causa del suo carattere introverso e delle sue discussioni personali con personaggi influenti come Johannes Schutzhof del Ministero dell'istruzione a Berlino o come il fisico Georg Friedrich Pohl. Dal 1833 in poi alcuni fisici e matematici tedeschi iniziarono a mostrare interesse per i suoi lavori e a ripetere le sue esperienze; tra questi Gustav Fechner, famoso per le sue ricerche di fisiologia dei sensi, Carl Friedrich Gauss e il suo giovane collega Wilhelm Weber.

In seguito alla riscoperta della legge che lega corrente e tensione, enunciata da Ohm, da parte del francese C. Pouillet, ebbero luogo discussioni internazionali sulla priorità della suddetta legge. Gli inglesi fecero conoscere il lavoro di Ohm, che nel 1841 ricevette la medaglia Copley dalla Royal Society.

Ohm non si occupò solo di elettricità e nel 1843 enunciò un principio fondamentale dell'acustica fisiologica, riguardante i toni puri e la sintesi di Fourier. Nel 1849 si spostò a Monaco come curatore del laboratorio di fisica dell'Accademia Bavarese. Nel 1852, all'età di 63 anni, due anni prima della prematura morte, ottenne la tanto desiderata cattedra di Fisica. Ohm morì a Monaco di Baviera nel 1854.

4.4 Michael Faraday



Fig. 4.4 - M. Faraday (1791-1867).

M. Faraday (fig. 4.4) è stato un fisico e chimico britannico. Nacque nel 1791 a Newington, nella regione del Surrey in Inghilterra, da una indigente famiglia, che non aveva la possibilità di pagare l'istruzione di base per i figli; ma, nonostante ciò, da autodidatta riuscì comunque a conseguire notevoli risultati nel campo della ricerca chimica e fisica, grazie alla sua inappagabile curiosità scientifica e alle sue abilità. Da giovane fu assunto come apprendista rilegatore e passava le sue ore libere leggendo alcuni testi, che aveva a disposizione.

Rimase particolarmente colpito da un articolo sull'elettricità pubblicato sull'Enciclopedia Britannica, tanto da decidere di dedicare la sua vita alla scienza. Per ottenere un posto di lavoro, si rivolse a Sir Humphrey Davy, direttore della Royal Institution di Londra, il quale lo

prese con sé in qualità di assistente di laboratorio. L'abilità pratica di Michael Faraday andò sviluppandosi molto velocemente, fino ad uguagliare quasi quella del suo mentore; ciò diede luogo a degli spiacevoli disaccordi fra i due, in quanto H. Davy non accettava di competere con un suo allievo.

La notorietà di Faraday come chimico si diffuse rapidamente e gli procurò numerosi incarichi da parte dell'industria chimica, all'epoca poco sviluppata. Particolarmente importante fu la sua scoperta di come isolare il benzene; cosa che gli aprì le porte di numerosi laboratori industriali. Successivamente si occupò di ioni in soluzione, scoprendo le leggi che governano l'elettrolisi.

Altri suoi importanti contributi alla scienza furono rappresentati dalla legge dell'induzione elettromagnetica ⁽⁶¹⁾ e dallo sviluppo di un prototipo di generatore elettrico, creato sperimentalmente inserendo un magnete in una bobina. Faraday fu il primo a sviluppare i concetti di campo elettrico e magnetico; tuttavia, non avendo adeguate conoscenze di matematica per una trattazione teorica dei problemi di campo, nel suo lavoro "Ricerche sperimentali sull'elettricità" non riportò neanche un'equazione matematica. I suoi studi, comunque, furono ugualmente di fondamentale importanza, tanto che il grande fisico dell'Ottocento James Clerk Maxwell li prese in considerazione nella formulazione delle sue famose equazioni. Albert Einstein affermò che Faraday ebbe nei confronti di Maxwell la stessa relazione nello sviluppo dell'elettromagnetismo che Galileo ebbe con Newton nello sviluppo della meccanica.

Faraday, che conduceva uno stile di vita semplice, respinse in vita tutti gli onori e le possibilità di guadagno, che potevano derivare dalla sua posizione; tale rifiuto era giustificato dalla sua costante dedizione alla ricerca scientifica e, in particolare, da alcune consolidate convinzioni religiose. Rifiutò la presidenza della Royal Society di Londra ed aderì all'oscura setta dei sandemanisti.

Michael Faraday morì nel 1867 in Inghilterra nella più completa semplicità di mezzi e fedele fino all'ultimo al suo sobrio stile di vita.

⁶¹ La legge dell'induzione elettromagnetica è riportata al par. 1.16 del cap. 1.

4.5 Gustav Robert Georg Kirchhoff



Fig. 4.5 - G. R. Kirchhoff (1824-1887).

G. R. G. Kirchhoff (fig. 4.5) è stato un fisico e matematico tedesco. Nacque a Königsberg, nella Prussia orientale, ⁽⁶²⁾ nel 1824; era figlio dell'avvocato Friedrich Kirchhoff e di Johanna Henriette Wittke. Si iscrisse all'Università Albertus di Königsberg, dove F. E. Neumann e C. G. Jacobi istituirono nel 1833 un seminario di matematica e fisica, per introdurre i loro studenti alla ricerca. Kirchhoff seguì il seminario di Neumann-Jacobi dal 1843 al 1846, ma nel 1843 C. G. Jacobi si ammalò, per cui sulla formazione di Kirchhoff ebbe grande influenza F. E. Neumann.

Tra il 1845 e il 1846 Kirchhoff, ancora studente, iniziò ad approfondire la legge di Ohm durante gli studi sulle correnti elettriche nelle reti di resistori; in seguito a tale approfondimento egli enunciò due principi generali, noti oggi come principi (o leggi) di Kirchhoff ⁽⁶³⁾.

Conseguì la laurea nel 1847 a Königsberg e si trasferì a Berlino per ricoprire un posto di insegnante, non retribuito; nel 1850 si trasferì a Breslavia, in Polonia, in seguito alla nomina a professore straordinario, e qui conobbe e strinse amicizia con Robert Wilhelm Bunsen. Nel 1854, chiamato da Bunsen, si trasferì ad Heidelberg, città tedesca, per ricoprire un posto di professore di fisica e nel 1857 sposò Clara Richelot, figlia del suo insegnante di matematica a Königsberg. Kirchhoff e Bunsen avviarono l'analisi spettroscopica con l'uso del becco Bunsen e dei prismi, scoprendo che ogni riga spettrale era propria della composizione chimica dell'elemento, che la emetteva; inoltre individuarono il cesio e il rubidio. Precedentemente allo sviluppo dell'analisi spettrale, Kirchhoff osservò che le sostanze non solo emettevano, ma anche assorbivano righe spettrali caratteristiche. Nel 1859, in seguito alle analisi condotte sull'assorbimento di righe dello spettro solare da parte di alcune sostanze, Kirchhoff affermò che, per ogni sostanza, il rapporto tra il potere emissivo ed il potere assorbente era una funzione della lunghezza d'onda e della temperatura (funzione di Kirchhoff). Nel 1862

⁶² Oggi Kaliningrad in Russia.

⁶³ Le leggi di Kirchhoff sono riportate al par. 3.1 del cap. 3 ed in appendice.

introdusse il termine “corpo nero”, per indicare quel corpo, che assorbiva, ad ogni temperatura, la radiazione di tutte le lunghezze d’onda. Kirchhoff mise in evidenza l’importanza di determinare il potere emissivo del corpo nero (⁶⁴) fin dal 1860. L’Istituto Fisico-Tecnico di Berlino, istituito nel 1888, un anno dopo la morte di Kirchhoff, decise di determinare sperimentalmente la funzione di Kirchhoff; a questo fine si dedicarono Rubens, O. R. Lummer, A. Pringsheim, F. Kurlbaum, spianando la strada alla fisica dei quanti.

Wilhelm Weber e Rudolf Kohlrausch studiarono, a Heidelberg, in Germania, la natura delle correnti elettriche e pubblicarono nel 1857 i loro risultati sulla velocità della corrente in un filo altamente conduttivo; tali risultati erano simili a quelli già ottenuti da Kirchhoff. Kirchhoff e Weber avevano scoperto che la velocità era indipendente dalla natura del filo ed era circa pari alla velocità della luce; tuttavia entrambi avevano considerato questo risultato casuale.

In seguito alla morte nel 1869 della moglie Clara, nel 1872 Kirchhoff sposò Luise Brömmel. Nel 1875 accettò l’invito di Hermann von Helmholtz per insegnare fisica matematica a Berlino. Le sue lezioni di fisica-matematica “Vorlesungen über mathematische Physik”, raccolte in quattro volumi (tre postumi), furono un punto di riferimento per la fisica teorica tedesca dei successivi quarant’anni. Tra gli allievi di Kirchhoff e Helmholtz ci fu H. R. Hertz che, oltre ai famosi contributi sperimentali alla dimostrazione delle onde elettromagnetiche ed alla scoperta dell’effetto fotoelettrico, riprese nella sua ultima opera “Principi della Meccanica” un’idea di Kirchhoff, ovvero quella di eliminare dalla fisica il concetto di forza.

Kirchhoff fu nominato nel 1868 membro della Royal Society di Edimburgo e nel 1875 membro della Royal Society; morì a Berlino nel 1887.

⁶⁴ Il potere emissivo integrale per un corpo nero è il maggiore fra quelli emessi da tutti gli altri corpi.

4.6 James Clerk Maxwell



Fig. 4.6 - J. C. Maxwell
(1831-1879).

J. C. Maxwell (fig. 4.6) è stato un fisico e matematico scozzese. Nacque ad Edimburgo, città della Scozia, nel 1831; figlio di un avvocato appartenente ad una famiglia della nobiltà terriera scozzese, i Clerk di Edimburgo, crebbe in campagna, mostrando fin da subito un notevole interesse per la scienza e la tecnica ed una straordinaria capacità nel realizzare ed utilizzare piccole apparecchiature. I genitori avevano deciso di impartire al figlio un'adeguata istruzione in casa fino all'Università, ma, quando aveva otto anni, la madre morì e Maxwell entrò all'Accademia di Edimburgo; qui conobbe Peter Guthrie Tait, che divenne suo amico per tutta la vita.

Maxwell, all'età di soli quattordici anni, compose un saggio sul tracciamento delle curve ovali, nel quale generalizzava l'ellisse e descriveva curve caratterizzate da più di due fuochi. Il saggio venne in parte pubblicato negli atti della Royal Society di Edimburgo e costituiva per un ragazzo di quell'età un notevole lavoro, anche se non era del tutto innovativo, poiché Cartesio aveva in precedenza studiato l'argomento. Tra i suoi amici del periodo scolastico ci fu anche Lewis Campbell; questi divenne professore di greco alla St. Andrew's University e scrisse interessanti biografie di Maxwell pregne di ricordi personali.

Nel 1847 si iscrisse all'Università di Edimburgo, qui studiò matematica, filosofia naturale con J. D. Forbes, ovvero fisica, logica, chimica e filosofia con William Sterling Hamilton (1788-1856), il quale ebbe una notevole influenza sulla formazione culturale di Maxwell. Nel 1850, non avendo ancora ottenuto il diploma, si trasferì al Trinity College di Cambridge, dove conobbe William Thomson, il futuro Lord Kelvin. Uno dei suoi insegnanti fu William Hopkins, insegnante di matematica a Cambridge, che teneva corsi di idrodinamica costantemente seguiti da Maxwell e da J. J. Thomson.

Maxwell conseguì il diploma al Trinity College nel 1854 e qui si trattenne fino al 1856; in questo periodo elaborò con linguaggio matematico le teorie di Faraday sulle linee di forza del

campo elettrico e magnetico. Il suo lavoro “On Faraday’s lines of force” fu letto alla Cambridge Philosophical Society nel 1855 e 1856.

Per poter trascorrere maggior tempo con il padre, che si era ammalato, all’inizio del 1856 Maxwell fece domanda, per insegnare al Marischal College di Aberdeen (⁶⁵); tuttavia il padre morì nel mese di aprile. Gli fu comunque conferito l’incarico di insegnante e iniziò ad insegnare nel mese di novembre.

Nel 1857 fu particolarmente incuriosito dal tema proposto per il Premio Adams sul sistema degli anelli di Saturno, in quanto aveva studiato l’argomento, quando era studente ad Edimburgo. Decise di partecipare e nel suo trattato dimostrò che la stabilità degli anelli si poteva ottenere solo se essi erano costituiti da numerose particelle solide; tale ipotesi fu successivamente confermata dalla sonda Voyager. Il saggio gli permise di vincere il premio.

Nel 1859 si sposò con Katherine Mary Dewar, figlia del direttore del College. In seguito alla fusione del Marischal College con il King’s College, per formare l’Università di Aberdeen, perse il posto di professore di Filosofia Naturale; presentò così la domanda, per insegnare Filosofia Naturale all’Università di Edimburgo, dove vi era disponibilità in seguito al trasferimento del suo insegnante J. D. Forbes; tuttavia, nonostante gli eccellenti risultati scientifici già conseguiti, tra i quali la teoria dei colori primari, la cattedra fu assegnata all’amico P. G. Tait.

Dal 1860 al 1865 fu docente al King’s College di Londra e nel 1861 venne eletto membro della Royal Society, la quale gli aveva assegnato la Medaglia Rumford nel 1860 per i risultati conseguiti sulla teoria e percezione dei colori, scaturiti da una serie di ricerche pubblicate tra il 1855 ed il 1872. Maxwell prospettò la fotografia a colori, riprendendo un’immagine per mezzo di filtri rossi, verdi e blu e proiettando contemporaneamente le lastre su di uno schermo, usando luci con filtri degli stessi colori. Nel corso di una conferenza tenutasi alla Royal Society fece fotografare per tre volte un tartan scozzese, dislocando tre filtri di differenti colori sopra l’obiettivo. Le tre immagini vennero successivamente sviluppate e proiettate su uno schermo per mezzo di tre proiettori differenti. In seguito alla messa a fuoco, ne scaturì l’immagine a colori, la prima nella storia, anche se di bassa qualità per la scarsa

⁶⁵ Città della Scozia.

sensibilità delle lastre usate al verde e la quasi completa insensibilità al rosso. Nel resoconto Maxwell scrisse: “trovando materiali fotografici più sensibili ai raggi meno rifrangibili la rappresentazione dei colori sarebbe grandemente migliorata”.

Nello stesso periodo determinò la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche da lui ipotizzate. La velocità della corrente elettrica era stata misurata alcuni anni prima dai fisici tedeschi W. E. Weber e R. Kohlrausch. Usando i valori da essi pubblicati, Maxwell calcolò la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, ottenendo un valore pari a circa 311.000.000 m/s. Nel 1849 H. Fizeau misurò la velocità della luce, ricavando un valore di circa 315.000.000 m/s. La somiglianza tra i valori ottenuti da Maxwell e Fizeau pareva essere puramente casuale, ma Maxwell si rese conto immediatamente che si trattava di una scoperta fondamentale.

Si ritirò dall'insegnamento per motivi di salute e si trasferì nella sua villa di Glenlair, in Scozia, dalla quale si spostò solo per compiere alcuni viaggi, tra i quali uno in Italia; qui imparò l'italiano, per potere colloquiare con Carlo Matteucci, noto fisico di Pisa, già ministro della Pubblica Istruzione. Durante la permanenza a Glenlair portò a termine la sua teoria cinetica dei gas del 1871 “Theory of Heat”, scrisse nel 1873 il “Trattato sull'elettricità e il magnetismo”, nel quale era descritta la teoria della luce, del campo elettromagnetico ed erano riportate le equazioni, che prenderanno il suo nome, ovvero le cosiddette “equazioni di Maxwell” (⁶⁶). I suddetti due trattati costituiscono le opere di maggior rilievo della fisica “classica” ottocentesca.

Nel 1871 gli venne offerta la possibilità di insegnare fisica sperimentale all'Università di Cambridge e la direzione del nuovo Cavendish Laboratory, che accettò, anche se inizialmente era indeciso. Nel 1879 Maxwell curò la pubblicazione degli appunti di Henry Cavendish con il titolo “The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish”; tale opera costituisce uno dei più importanti capitoli della storia dell'elettricità. Egli si impegnò anche a spiegare il funzionamento del radiometro del chimico inglese W. Crookes.

Nel 1873 divenne curatore scientifico dell'Enciclopedia Britannica, per la quale scrisse numerose voci, mettendo così in evidenza il suo interesse e impegno per la diffusione della

⁶⁶ La concezione dell'elettromagnetismo di Maxwell è riportata al par. 1.18 del cap. 1.

cultura scientifica. In questi anni ottenne vari riconoscimenti fuori dalla Gran Bretagna, tra i quali la medaglia Volta e la laurea honoris causa conferita dall'Università di Pavia, e venne eletto membro di numerose istituzioni ed accademie scientifiche.

Continuò ad insegnare durante l'anno 1879, nonostante il peggioramento delle sue condizioni di salute; in estate tornò con la moglie, anch'ella ammalata, a Glenlair. Rientrò a Cambridge e morì il 5 novembre 1879, a soli 48 anni, di tumore intestinale.

A conclusione di questa nota biografica si riportano di seguito i suoi principali lavori: "A Dynamical Theory of the Electromagnetic field" del 1865, "Theory of Heat" del 1871, "Treatise of Electricity and Magnetism" del 1873 e "Matter and Motion" del 1876.

4.7 Oliver Heaviside



Fig. 4.7 - O. Heaviside (1850-1925).

O. Heaviside (fig. 4.7) è stato un matematico, fisico ed ingegnere britannico. Nacque a Londra nel 1850; impiegato in una società di telegrafi e membro della Royal Society dal 1891, mostrò interesse per l'elettrologia e per la relativa applicazione alla telegrafia e alla telefonia. Studiò la propagazione delle onde elettromagnetiche nello spazio e lungo le linee elettriche con un'impostazione matematica, elaborando il metodo degli operatori funzionali; con tale metodo determinò gli effetti di distorsione dovuti alla capacità elettrostatica e all'induttanza delle linee elettriche, dimostrando, in opposizione alla legge di W. H. Preece, direttore dei telegrafi inglesi, che non sussistevano limitazioni alla lunghezza delle linee telefoniche e che la telefonia a grande distanza era plausibile. Nel 1902 ipotizzò l'esistenza nell'alta atmosfera terrestre di regioni fortemente ionizzate e dotate di potere riflettente per le radioonde; la regione ionosferica, oggi designata con la lettera E, fu denominata "strato di Heaviside" o "strato di Kennelly-Heaviside" (⁶⁷).

⁶⁷ Ad Heaviside si deve il metodo operatoriale riportato al par. 3.6 del cap. 3.

I suoi primi scritti risalgono al periodo tra il 1874 e il 1879; la pubblicazione di tali scritti fu ostacolata dalla loro difficile comprensione e dall'apparente mancanza di rigore nelle nuove procedure matematiche da lui elaborate. I suoi lavori furono anche rifiutati dalla Royal Society; solo nel 1891, a seguito di un'esposizione più chiara, iniziarono ad essere pubblicati sul periodico "*The electrician*" e furono riuniti in tre volumi dagli editori del periodico, per formare la sua più rilevante opera dal titolo "*Electromagnetic theory*". Le altre pubblicazioni vennero stampate e riunite in due volumi dal titolo "*Electrical papers*". Heaviside morì a Torquay, in Inghilterra, nel 1925.

4.8 Leon Charles Thevenin



Fig. 4.8 - L. C. Thévenin (1857-1926).

L. C. Thevenin (fig. 4.8) è stato un ingegnere francese specializzato in telegrafia. Nacque a Meaux, comune francese, nel 1857; conseguì il diploma all'École polytechnique nel 1876 ed all'École supérieure de télégraphie nel 1879. Nel 1880 iniziò a lavorare nell'amministrazione delle poste e telegrafi francesi; durante questo periodo tenne anche corsi di matematica ed effettuò ricerche sull'elettricità.

Nel 1883 pubblicò un teorema per facilitare la risoluzione dei circuiti elettrici, oggi noto come teorema di Thévenin ⁽⁶⁸⁾ ⁽⁶⁹⁾, ricavata a partire dalle leggi di Kirchhoff.

Nel 1888 ricoprì l'incarico di insegnante di matematica e di elettrotecnica all'École supérieure de télégraphie. Thévenin fu a favore del decreto del 1895, con il quale la supervisione delle installazioni elettriche industriali venne affidata agli ingegneri telegrafici francesi. Nel 1896 ebbe la nomina di direttore dell'istituto scolastico dove insegnava. Successivamente condusse vari studi, che ebbero notevole influsso sul metodo di costruzione delle reti elettriche, e chiese che venisse incrementata e migliorata la strumentazione del laboratorio dell'istituto, per poter eseguire ricerche più accurate; tale richiesta fu accettata nel 1916 successivamente alle sue

⁶⁸ Il teorema di Thevenin è riportato in appendice.

⁶⁹ Era già stato enunciato da Helmholtz nel 1853.

dimissioni avvenute nel 1901, anno in cui prese il suo posto Édouard Estaunié. In seguito Thévenin ottenne la nomina di direttore degli atelier del boulevard Brune, dove si occupò dei macchinari, che stampavano i francobolli.

Morì nel 1926 a Parigi, dove si trovava per essere curato.

4.9 Charles Proteus Steinmetz



Fig. 4.9 - C. P. Steinmetz (1865-1923).

C. P. Steinmetz (fig. 4.9) è stato un matematico ed ingegnere elettrotecnico tedesco. Nacque nel 1865 a Breslavia, nella provincia di Slesia⁽⁷⁰⁾, da Carl Heinrich Steinmetz; era affetto da nanismo, gobba e displasia della spalla, come suo padre e suo nonno. Durante la frequentazione del Johannes Gymnasium dimostrò notevoli capacità in matematica e fisica. Successivamente si iscrisse alla Università di Breslavia, in Polonia, e nel 1883 conseguì la laurea di primo livello; mentre era in procinto di terminare il suo dottorato nel 1888, venne indagato dalla polizia tedesca. Steinmetz venne preso di mira dalle autorità per l'appartenenza ad un gruppo universitario socialista e per alcuni articoli, che scrisse sul giornale locale⁽⁷¹⁾; per evitare l'arresto, nel 1888 si rifugiò a Zurigo e, quando il suo permesso di soggiorno decadde, emigrò negli Stati Uniti nel 1889. Qui lavorò per Rudolf Eickermeyer a Yonkers (comune degli Stati Uniti d'America) e pubblicò alcuni suoi lavori sull'isteresi magnetica, sulla teoria delle correnti alternate e sulle fulminazioni nelle linee elettriche; introdusse nell'elettrotecnica il cosiddetto metodo simbolico⁽⁷²⁾. L'azienda di Eickermeyer realizzò i trasformatori per la trasmissione di potenza elettrica tra diverse apparecchiature elettriche e meccaniche e nel 1893, insieme con tutti i suoi brevetti e progetti, venne rilevata dalla General Electric. Steinmetz⁽⁷³⁾ morì a Schenectady, città statunitense, nel 1923.

⁷⁰ Facente parte all'epoca della Germania.

⁷¹ La stampa socialista era stata dichiarata illegale da parte di Otto von Bismarck.

⁷² Il metodo simbolico è riportato al par. 3.5.1 del cap. 3.

⁷³ Fu anche direttore dei laboratori di ricerca General Electric, dove ebbe un ruolo fondamentale allo sviluppo di

4.10 Arthur Edwin Kennelly



Fig. 4.10 - A. E. Kennelly (1861-1939).

A. E. Kennelly (fig. 4.10) è stato un ingegnere elettrotecnico statunitense. Nacque a Bombay, in India, nel 1861. Egli fu un autodidatta; inizialmente lavorò come operatore di una società telegrafica, successivamente divenne assistente di T. A. Edison. Nel 1902 ottenne la cattedra di elettrotecnica all'Università di Harvard a Cambridge, città del Massachusetts, e nel 1930 gli fu conferita la nomina di professore emerito. Apportò contributi determinanti in ogni settore dell'elettrotecnica, soprattutto dal punto di vista teorico, grazie all'applicazione della matematica all'elettrotecnica; tra i suoi vari contributi vi è quello al metodo simbolico, detto metodo di Steinmetz-Kennelly, impiegato per l'analisi delle reti elettriche in regime sinusoidale. Kennelly si interessò anche di problemi relativi alla propagazione delle correnti elettriche telegrafiche e telefoniche lungo una linea. Ipotizzò, insieme ad altri, l'esistenza della ionosfera e studiò il problema della propagazione di un'onda elettromagnetica fra due strati conduttori paralleli; lo strato E della ionosfera è stato denominato “*strato di Kennelly*” o anche “*strato di Kennelly-Heaviside*” in suo omaggio. Morì a Boston nel 1939.

4.11 Edward Lawry Norton



Fig. 4.11 - E. L. Norton
(1898-1983).

E. L. Norton (fig. 4.11) è stato un ingegnere elettrotecnico statunitense. Nacque a Rockland, negli Stati Uniti d'America, nel 1898. Lavorò inizialmente come radio operatore nella Marina Militare degli USA tra il 1917 e il 1919. Frequentò l'Università statunitense del Maine e successivamente si iscrisse al MIT (Massachusetts Institute of Technology) nel 1920, laureandosi in ingegneria elettrica nel 1922. A New York lavorò presso la Western Electric Corporation, che cambiò la denominazione in Bell Laboratories nel 1925; in tale anno conseguì un master in ingegneria elettrica presso la Columbia University. Nel 1961 andò in pensione. Nel corso della sua carriera Norton registrò 19 brevetti e scrisse 92 memoranda tecnici.

Un importante contributo, che Norton apportò alla teoria dei circuiti, fu il teorema che oggi porta il suo nome, ovvero il teorema di Norton (⁷⁴), duale del teorema di Thévenin. Il teorema fu concepito contemporaneamente anche dal fisico tedesco Hans Ferdinand Mayer, ma Norton pubblicò per primo i risultati delle sue ricerche nel 1926. Morì a Chatham, nel New Jersey, nel 1983.

⁷⁴ Il teorema di Norton è riportato in appendice.

4.12 Bernard Tellegen



Fig. 4.12 - B. Tellegen
(1900-1990).

B. Tellegen (fig. 4.12) è stato un ingegnere elettrotecnico olandese. Nacque a Winschoten, in Olanda, nel 1900; inventò il pentodo nel 1926 ed il giratore nel 1948 ed enunciò nel 1952 il teorema di conservazione delle potenze virtuali, noto anche come teorema di Tellegen (⁷⁵).

Nel 1923 si laureò in ingegneria elettrica all'Università di Delft in Olanda e lavorò inizialmente presso i laboratori di ricerca della Philips a Eindhoven, città olandese. Dal 1946 al 1966 Tellegen fu professore aggiunto di Teoria dei circuiti presso l'Università di Delft; inoltre ha ricoperto la

carica di presidente e membro onorario della Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap (Società Elettronica e Radio dei Paesi Bassi) dal 1942 al 1952. Nel 1953 ottenne dall'Australian Institute of Radio Engineers la carica di membro onorario a vita.

Nel 1960 Tellegen fu eletto membro dell'Accademia Reale delle Arti e delle Scienze dei Paesi Bassi. Nel 1970 l'Università di Delft gli conferì una laurea honoris causa. Tellegen è stato socio della IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) e vinse la Medaglia Edison nel 1973. Morì a Eindhoven, in Olanda, nel 1990.

⁷⁵ Il teorema di Tellegen è riportato in appendice.

APPENDICE

FONDAMENTI TEORICI DELL'ELETTROTECNICA CIRCUITALE

1. Concetti introduttivi

Il fine principale dell'elettrotecnica circuitale, ovvero della teoria dei circuiti elettrici, è quello di fornire gli strumenti teorici necessari per l'analisi e la sintesi di un circuito elettrico (⁷⁶).

Un circuito elettrico (⁷⁷) è realizzato connettendo tra loro vari componenti ed è sede di fenomeni di tipo elettrico e magnetico. E' possibile associare ad un circuito un modello matematico (⁷⁸), rappresentato da opportune equazioni, la cui risoluzione permette di determinare le grandezze elettriche proprie del circuito, ovvero le tensioni e le correnti.

I circuiti possono essere suddivisi in due classi fondamentali, ovvero la categoria dei circuiti a costanti distribuite e quella dei circuiti a parametri concentrati; questi ultimi sono detti a parametri concentrati, poiché i principali fenomeni elettrici possono essere confinati in ben definiti volumi di spazio.

In un circuito a parametri concentrati il tempo di propagazione delle onde elettromagnetiche è trascurabile (⁷⁹); ne consegue, come già detto, che il campo elettrico e magnetico possono essere confinati in regioni di spazio ben definite, ovvero in componenti chiamati rispettivamente condensatori ed induttori, mentre i fenomeni di dissipazione dell'energia si verificano in componenti detti resistenze.

⁷⁶ L'analisi di un circuito elettrico consiste nel determinare le tensioni e le correnti, assegnate la topologia e le relazioni costitutive dei componenti. La sintesi consiste nel determinare la topologia e le caratteristiche dei componenti, in modo da avere le tensioni e/o le correnti desiderate.

⁷⁷ Spesso si usa il termine rete come sinonimo di circuito.

⁷⁸ Un modello matematico è un insieme di equazioni ed altre relazioni matematiche, che descrivono i fenomeni fisici. In generale un modello si determina a partire da leggi generali (per esempio leggi di conservazione o di bilancio) e da relazioni costitutive di natura sperimentale.

⁷⁹ In un circuito a parametri concentrati si può ritenere valida l'ipotesi di trascurare i fenomeni di propagazione elettromagnetica all'interno del circuito e quindi le dimensioni fisiche dei conduttori e dei componenti, se la dimensione massima del circuito è inferiore ad un decimo della lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza di lavoro.

Nel caso in cui il tempo di propagazione delle onde elettromagnetiche non è trascurabile, il modello a parametri concentrati deve essere sostituito dal modello a costanti distribuite; in questo caso assumono importanza le dimensioni fisiche dei conduttori e dei componenti, mentre il campo elettrico e quello magnetico non sono più confinati in regioni ben definite dello spazio, bensì sono distribuiti nello spazio.

I circuiti a parametri concentrati possono essere ulteriormente suddivisi nelle seguenti sotto-classi:

1. circuiti lineari e non lineari;
2. circuiti adinamici (resistivi) e dinamici;
3. circuiti tempo-invarianti e tempo-varianti.

I circuiti di cui alla sotto-classe 1 sono descritti da equazioni lineari o non lineari. I circuiti di cui alla sottoclasse 2 contengono resistenze o componenti dinamici come i condensatori, gli induttori ed i mutui induttori; un circuito dinamico è descritto da equazioni integro-differenziali, mentre un circuito di tipo adinamico (resistivo) è descritto da equazioni algebriche. I circuiti di cui alla sotto-classe 3 sono descritti da equazioni, i cui coefficienti non dipendono dal tempo, circuiti tempo-invarianti, o da equazioni i cui coefficienti dipendono dal tempo, circuiti tempo-varianti. Un esempio di componente tempo-variante è l'interruttore, il cui valore di resistenza cambia a seguito della sua chiusura o apertura.

Nel seguito vengono analizzati i circuiti a parametri concentrati, lineari, tempo-invarianti, adinamici (resistivi) o dinamici, in regime permanente ⁽⁸⁰⁾.

2. Teoria dei grafi

Un circuito è un insieme di componenti a due o più terminali ⁽⁸¹⁾ e i punti, in cui essi convergono, sono detti nodi del circuito. E' possibile associare ad ogni circuito un'entità matematica G detta grafo, formata da un insieme N di nodi (nodi del circuito) e da un insieme

⁸⁰ Nel regime permanente le tensioni e le correnti hanno valore costante nel tempo (regime stazionario) o variano periodicamente nel tempo (regime periodico). Il regime transitorio è un regime di funzionamento, nel quale le tensioni e le correnti del circuito variano nel tempo in modo non periodico.

⁸¹ I componenti a 2 terminali sono detti bipoli, quelli a più terminali multipoli.

B di lati (bipoli/componenti del circuito (⁸²)), che connettono i nodi tra loro. Con tale associazione si ottiene la struttura topologica del circuito, ovvero il modo in cui sono connessi i componenti tra loro.

Ad ogni nodo è associato un potenziale, mentre ad ogni lato sono associate una corrente ed una tensione. Il potenziale di un nodo scelto di solito casualmente, detto nodo di riferimento, è posto uguale a zero, mentre gli altri nodi, detti nodi indipendenti, hanno potenziali generalmente diversi da zero. Una proprietà fondamentale di un circuito elettrico, che si trasferisce al corrispondente grafo, è la cosiddetta proprietà di connessione, secondo la quale tutto il circuito è elettricamente connesso e quindi per ogni nodo del circuito è possibile trovare un percorso che, seguendo i lati del grafo, connette tale nodo al nodo di riferimento. Questa proprietà permette di uguagliare la differenza tra il potenziale di un nodo ed il potenziale del nodo di riferimento alla tensione del lato, che connette i due nodi.

Ogni lato del grafo G può essere numerato ed orientato; l'orientazione del lato corrisponde al riferimento della corrente in quel lato. Il riferimento della tensione del lato non può essere stabilito indipendentemente dal riferimento della corrente. Se si assume la convenzione degli utilizzatori, il riferimento della tensione del lato ha il segno positivo sul terminale dove "entra" la corrente. Con questa convenzione la potenza istantanea $p(t) = v(t) \cdot i(t)$, se è positiva, è dissipata o assorbita, se è negativa, è erogata. Se si assume la convenzione dei generatori il riferimento della tensione del lato ha il segno positivo sul terminale dove "esce" la corrente; in questo caso la potenza, se è negativa, è dissipata o assorbita, se è positiva, è erogata. Viene utilizzata nel seguito la convenzione degli utilizzatori.

L'albero T è un sottografo connesso di G, è costituito da un percorso aperto, che connette tutti i nodi, e da una parte dei lati del grafo G (⁸³). Il sottografo complementare all'albero T è detto coalbero.

In ogni grafo può essere individuato più di un albero. In un grafo con n nodi ogni albero T ha n - 1 lati, ogni coalbero ha b - n + 1 lati. Se si aggiunge un lato del coalbero ad alcuni lati dell'albero T, si ottiene una maglia, che è formata da alcuni lati dell'albero e dall'unico

⁸² Supposto che il circuito sia costituito solo da bipoli.

⁸³ In un grafo con n nodi un particolare tipo di albero è quello stellare, ottenuto collegando n - 1 nodi, comunque scelti, con l'n-esimo, che si assume come nodo di riferimento. Un altro particolare tipo di albero è quello lineare, ottenuto collegando tutti gli n nodi mediante una spezzata aperta.

lato del coalbero. Per ogni lato del coalbero è possibile ripetere la suddetta operazione, formando ogni volta una maglia diversa, indipendente da tutte le altre. Si può dimostrare che il numero di maglie indipendenti di un circuito/grafico è pari al numero dei lati del coalbero, ovvero pari a $b - (n - 1) = b - n + 1$; mentre il numero di nodi indipendenti è pari a $n - 1$.

3 Principi di Kirchhoff

I principi di Kirchhoff (primo e secondo) consentono di scrivere le equazioni topologiche del circuito, che descrivono la modalità di connessione dei componenti tra loro.

In base al primo principio la somma delle correnti “entranti”, ossia con riferimento entrante, in un nodo è uguale alla somma delle correnti “uscenti”, ossia con riferimento uscente.

In base al secondo principio ogni tensione di un lato è uguale alla differenza dei potenziali dei nodi estremi del lato, oppure la somma algebrica delle tensioni dei lati di una maglia è nulla.

E' possibile scrivere le equazioni inerenti ai suddetti principi, utilizzando il grafico associato al circuito, costituito da n nodi e b lati numerati ⁽⁸⁴⁾, ed assegnando ad ogni lato del grafico una tensione ed una corrente con i riferimenti correlati dalla convenzione degli utilizzatori e ad ogni nodo indipendente un potenziale (il potenziale del nodo di riferimento è posto uguale a 0). Si può individuare inoltre un insieme di maglie indipendenti, si possono numerare le maglie e si può assegnare ad ognuna la stessa orientazione oraria o antioraria.

Le equazioni relative al primo principio di Kirchhoff per tutti i nodi indipendenti possono essere scritte in forma matriciale come segue:

$$\mathbf{A} \mathbf{i} = \mathbf{0} \tag{3.1}$$

dove \mathbf{i} ⁽⁸⁵⁾ è il vettore colonna delle correnti di lato di dimensioni $[b \times 1]$. La matrice \mathbf{A} , detta matrice ridotta di incidenza, ha un numero di righe pari al numero di nodi indipendenti ($n - 1$) ed un numero di colonne pari al numero di lati b : $\mathbf{A} [(n - 1) \times b]$. Il generico termine a_{kj} della matrice \mathbf{A} è pari ad 1, se il riferimento della corrente del lato j è uscente dal nodo k , è pari a -1 , se il riferimento della corrente del lato j è entrante nel nodo k , è pari a 0, se il lato j non è

⁸⁴ E' possibile numerare indipendentemente i lati con i numeri ed i nodi con le lettere.

⁸⁵ Nel seguito i caratteri in grassetto indicano delle matrici o dei vettori colonna.

connesso al nodo k . Il nodo di riferimento non viene considerato nella scrittura della matrice \mathbf{A} .

Le equazioni relative al secondo principio di Kirchhoff, enunciato come segue: ogni tensione di un lato è uguale alla differenza dei potenziali dei nodi estremi del lato, possono essere scritte in forma matriciale per tutti i lati del grafo come segue:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{e} \quad (3.2)$$

dove \mathbf{v} è il vettore colonna delle tensioni di lato di dimensioni $[b \times 1]$ ed \mathbf{e} è il vettore colonna dei potenziali dei nodi indipendenti di dimensioni $[(n - 1) \times 1]$.

Le equazioni relative al secondo principio di Kirchhoff, enunciato come segue: la somma algebrica delle tensioni dei lati di una maglia è nulla, per ogni maglia indipendente possono essere scritte in forma matriciale come segue:

$$\mathbf{B} \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

dove \mathbf{v} è il vettore colonna delle tensioni di lato di dimensioni $[b \times 1]$, \mathbf{B} è la matrice ridotta delle maglie, che è formata da 1 , -1 e 0 ed ha dimensioni $[(b - n + 1) \times b]$. Il generico termine b_{kj} della matrice \mathbf{B} è pari ad $+1$ o a -1 , se il lato j appartiene alla maglia k ed ha riferimento concorde o discorde con l'orientazione della maglia stessa (⁸⁶), è pari a 0 se il lato j non appartiene alla maglia k .

Le matrici ridotta di incidenza \mathbf{A} e ridotta delle maglie \mathbf{B} sono tra loro ortogonali, ovvero risulta:

$$\mathbf{A} \mathbf{B}^T = \mathbf{0}. \quad (3.4)$$

I principi di Kirchhoff (3.1 e 3.2) consentono di formulare $b + n - 1$ equazioni in $2b + n - 1$ incognite (correnti e tensioni di lato, potenziali dei nodi indipendenti); per risolvere il circuito è necessario un ulteriore numero di equazioni pari a b (⁸⁷); tali equazioni sono rappresentate

⁸⁶ L'orientazione della maglia è determinata dal riferimento della corrente del lato di coalbero, che individua la maglia.

⁸⁷ In modo che il numero di equazioni sia pari al numero di incognite ed il sistema di equazioni sia così determinato.

dalle relazioni costitutive dei componenti (lati del grafo).

4 Proprietà di conservazione della potenza istantanea e teorema di Tellegen

Si consideri un circuito, al quale è associato un grafo costituito da b lati ed n nodi; si indichi con v_k ed i_k la tensione e la corrente del k -esimo lato; la proprietà della conservazione della potenza istantanea, considerando la convenzione degli utilizzatori, si può formulare come segue:

$$\sum_{k=1}^b (v_k i_k) = v_1 i_1 + v_2 i_2 + \dots + v_b i_b = \mathbf{v}^T \mathbf{i} = (\mathbf{e}^T \mathbf{A}) \mathbf{i} = \mathbf{e}^T (\mathbf{A} \mathbf{i}) = \mathbf{0} \quad (^{88}), \quad (4.1)$$

ovvero la somma algebrica delle potenze dei componenti (lati) di un circuito (grafo) è nulla ad ogni istante. In base alla suddetta proprietà in un sistema chiuso la potenza erogata in ogni istante dai componenti attivi è assorbita dai componenti passivi del circuito.

Si considerino due circuiti A e B differenti (⁸⁹), ma con la medesima topologia, ovvero con uguale numero di nodi n e di lati b e con il medesimo grafo (⁹⁰). Si indichino con v_k^A e i_k^A le grandezze del k -esimo lato del grafo associato al circuito A e con v_k^B e i_k^B le grandezze del k -esimo lato del grafo associato al circuito B. Il teorema di Tellegen (⁹¹), considerando la convenzione degli utilizzatori, afferma che la somma algebrica delle potenze virtuali è nulla, ovvero:

$$\sum_{k=1}^b v_k^A i_k^B = \sum_{k=1}^b v_k^B i_k^A = 0, \quad (4.2)$$

dove il termine $v_k^A i_k^B$ è detto potenza virtuale. Il teorema di Tellegen è valido, purché i 2 circuiti abbiano lo stesso grafo, mentre i componenti (bipoli) possono essere differenti. Se i 2 circuiti A e B hanno gli stessi componenti e lo stesso grafo, ovvero sono uguali, la potenza virtuale è la vera potenza istantanea di lato e l'equazione 4.2 rappresenta la proprietà di

⁸⁸ E' stata utilizzata la seguente proprietà delle matrici: se $\mathbf{A} = \mathbf{B}^T \mathbf{C}$, allora $\mathbf{A}^T = \mathbf{C}^T \mathbf{B}$.

⁸⁹ Costituiti da componenti (bipoli) diversi.

⁹⁰ I lati del grafo del circuito A devono avere numerazione uguale a quella dei lati del grafo del circuito B.

⁹¹ Il teorema di Tellegen è detto anche teorema delle potenze virtuali ed è stato enunciato da B. Tellegen nel 1952.

conservazione della potenza istantanea, ovvero la potenza erogata in ogni istante dai componenti attivi è assorbita dai componenti passivi del circuito. La proprietà di conservazione della potenza istantanea è perciò un corollario del teorema di Tellegen. Da questo teorema è possibile dedurre alcune importanti proprietà energetiche dei circuiti.

5 Bipoli

I bipoli lineari e tempo-invarianti possono essere adinamici (resistivi) o dinamici. I bipoli adinamici sono descritti da equazioni algebriche. I bipoli dinamici sono descritti da equazioni integro-differenziali; in questo caso è conveniente passare al dominio dei numeri complessi tramite l'operazione di trasformazione secondo Laplace o secondo Steinmetz (a seconda che la rete sia in regime variabile aperiodico oppure sinusoidale), al fine di trasformare le equazioni integro-differenziali in equazioni algebrico-complesse.

5.1 Bipoli adinamici

In generale per un bipolo adinamico è possibile scrivere la seguente equazione implicita:

$$av(t) + bi(t) = h(t), \quad (5.1.1)$$

dove $v(t)$ e $i(t)$ sono la tensione e la corrente del bipolo, i cui riferimenti sono associati secondo la convenzione degli utilizzatori. La suddetta equazione è l'equazione implicita di una retta nel piano (v, i) .

Esplicitando la 5.1.1 rispetto alla tensione (con $a \neq 0$), si ottiene il cosiddetto modello di Thevenin del bipolo:

$$v(t) = Ri(t) + v_s(t). \quad (5.1.2)$$

Questa equazione esiste se il bipolo non è un generatore ideale di corrente.

Esplicitando la 5.1.1 rispetto alla corrente (con $b \neq 0$), si ottiene il cosiddetto modello di Norton del bipolo:

$$i(t) = Gv(t) + i_s(t). \quad (5.1.3)$$

Questa rappresentazione esiste se il bipolo non è un generatore ideale di tensione.

5.2 Bipoli dinamici

Esempi di bipoli dinamici, lineari, tempo-invarianti sono il condensatore e l'induttore. Le relazioni costitutive di questi bipoli in forma differenziale sono le seguenti (⁹²):

$$i_c(t) = C \, dv_c(t)/dt \quad (5.2.1)$$

$$v_L(t) = L \, di_L(t)/dt \quad (5.2.2)$$

dove $i_c(t)$ è la corrente del condensatore misurata in [A], C è la capacità del condensatore misurata in [F] (⁹³), $v_c(t)$ è la tensione ai capi del condensatore misurata in [V], L è l'induttanza dell'avvolgimento dell'induttore misurata in [H] (⁹⁴), $i(t)$ è la corrente che percorre l'avvolgimento dell'induttore misurata in [A] e $v(t)$ è la tensione ai capi dell'avvolgimento misurata in [V] (⁹⁵).

I bipoli descritti dalle equazioni 5.2.1 e 5.2.2 sono ideali, ovvero privi di elementi dissipativi.

Il condensatore gode delle seguenti proprietà: se la tensione ai suoi capi è costante, il condensatore equivale ad un circuito aperto.

L'induttore gode delle seguenti proprietà: se la corrente, che percorre l'avvolgimento, è costante, l'induttore equivale ad un cortocircuito.

Esplicitando l'espressione 5.2.1 rispetto al differenziale della tensione si ottiene:

$$dv_c = (1/C) i_c \, dt,$$

integrando primo e secondo membro tra t e t_0 , si ottiene:

$$v_c(t) = v_c(t_0) + (1/C) \int_{t_0}^t i_c(x) dx \quad (5.2.3)$$

⁹² Nello scrivere le relazioni costitutive, si è fatto uso della convenzione degli utilizzatori.

⁹³ L'unità di misura della capacità è il farad; il termine farad deriva dal nome del fisico inglese Michael Faraday (1791-1867).

⁹⁴ L'unità di misura dell'induttanza è l'henry; il termine henry deriva dal nome del fisico americano Joseph Henry (1797-1878).

⁹⁵ Si evidenzia, comunque, che in un induttore non sempre è presente un avvolgimento.

L'espressione 5.2.3 mostra che la tensione di un condensatore in un generico istante t non dipende solo dalla corrente in t , come in un resistore, ma anche dall'andamento della corrente tra t_0 e t e da $v_c(t_0)$; per tale motivo il condensatore è detto "elemento con memoria".

Esplicitando l'espressione 5.2.2 rispetto al differenziale della corrente si ottiene:

$$di_L = (1/L) v_L dt,$$

integrando primo e secondo membro tra t e t_0 , si ottiene:

$$i_L(t) = i_L(t_0) + (1/L) \int_{t_0}^t v(x) dx \quad (5.2.4)$$

L'espressione 5.2.4 mostra che la corrente di un induttore in un generico istante t non dipende solo dalla tensione in t , come in un resistore, ma anche dall'andamento della tensione tra t_0 e t e da $i(t_0)$; per tale motivo l'induttore è detto "elemento con memoria".

Le energie accumulate in un condensatore ed in un induttore nell'intervallo di tempo $[0, t]$ hanno le seguenti espressioni:

$$E_c(t) = 1/2 C [v_c^2(t) - v_c^2(0)] \quad (5.2.5)$$

$$E_L(t) = 1/2 L [i_L^2(t) - i_L^2(0)] \quad (5.2.6)$$

L'espressione 5.2.5 si ottiene dalla 5.2.1 moltiplicando ambo i membri per $v_c(t)$ ed integrando primo e secondo membro tra 0 e t .

L'espressione 5.2.6 si ottiene dalla 5.2.2 moltiplicando ambo i membri per $i_L(t)$ ed integrando primo e secondo membro tra 0 e t .

Si può notare dalle 5.2.5 e 5.2.6 che l'energia accumulata, in un condensatore ed in un induttore, dipende solo dai valori iniziali e finali della tensione e della corrente.

5.3 Teoremi di Thevenin e di Norton

Due bipoli si dicono equivalenti, se presentano la stessa caratteristica nel piano (v, i) ; nel caso di bipoli lineari e tempo-invarianti la suddetta caratteristica è una retta. I teoremi di Thevenin e di Norton stabiliscono un criterio per determinare un bipolo equivalente ad uno dato.

Il teorema di Thevenin afferma che un circuito resistivo (adinetico), lineare, tempo-invariante “visto” da 2 terminali è equivalente ad un bipolo formato da un generatore ideale di tensione $v_{eq}(t)$ in serie con una resistenza R_{eq} , in cui $v_{eq}(t)$ è la tensione a vuoto tra i 2 terminali e R_{eq} è la resistenza interna, o equivalente, determinata in corrispondenza degli stessi terminali con i generatori indipendenti del circuito disattivati (cortocircuitati i generatori di tensione, “aperti” quelli di corrente).

Il teorema di Norton afferma che un circuito resistivo (adinetico), lineare, tempo-invariante “visto” da 2 terminali è equivalente ad un bipolo formato da un generatore ideale di corrente $i_{eq}(t)$ in parallelo ad una conduttanza G_{eq} , in cui $i_{eq}(t)$ è la corrente di cortocircuito tra i 2 terminali e G_{eq} è la conduttanza interna, o equivalente, determinata in corrispondenza degli stessi terminali con i generatori indipendenti del circuito disattivati (cortocircuitati i generatori di tensione, “aperti” quelli di corrente).

Le relazioni tra i parametri relativi rispettivamente al bipolo equivalente di tipo serie (modello di Thevenin) ed al bipolo equivalente di tipo parallelo (modello di Norton) sono le seguenti:

$$R_{eq} = 1/G_{eq} \quad (5.3.1)$$

$$v_{eq}(t) = R_{eq} i_{eq}(t).$$

Se il circuito (⁹⁶) è dinamico, lineare e tempo-invariante, i suddetti teoremi sono ugualmente validi, pur di sostituire alle grandezze $v_{eq}(t)$ e $i_{eq}(t)$ le relative grandezze trasformate secondo Steinmetz $V_{eq}(j\omega)$ e $I_{eq}(j\omega)$ ed alla resistenza R_{eq} e conduttanza G_{eq} i rispettivi parametri complessi impedenza $Z_{eq}(j\omega)$ ed ammettenza $Y_{eq}(j\omega)$.

⁹⁶ In regime sinusoidale.

6 Doppi bipoli

6.1 Doppi bipoli adinamici

I doppi bipoli sono caratterizzati da due coppie di terminali ciascuna delle quali è chiamata porta; affinché due terminali possano essere considerati una porta, è fondamentale che la corrente entrante in un terminale sia uguale alla corrente uscente dall'altro terminale. Ad ogni porta viene assegnata una tensione ed una corrente, i cui riferimenti sono correlati dalla convenzione degli utilizzatori.

La categoria dei doppi bipoli è varia. Appartengono a tale categoria, ad esempio, i trasformatori (componenti a due porte) ed i transistori (componenti tripolari, a 3 terminali); in quest'ultimo caso le due porte sono definite, rispettivamente, tra i 2 terminali indipendenti ed il terminale di riferimento.

Un doppio bipolo richiede, per essere descritto correttamente, due equazioni indipendenti tra loro. La generica relazione (equazione) implicita, in forma matriciale, è la seguente:

$$\mathbf{H}_v \mathbf{v}(t) + \mathbf{H}_i \mathbf{i}(t) = \mathbf{h}^s(t), \quad (6.1.1)$$

dove i vettori delle tensioni $\mathbf{v}(t)$, delle correnti $\mathbf{i}(t)$ e dei termini noti (sorgenti indipendenti) $\mathbf{h}^s(t)$ hanno dimensioni $[2 \times 1]$. Le matrici \mathbf{H}_v e \mathbf{H}_i hanno dimensioni $[2 \times 2]$. Per ottenere le relazioni esplicite, è necessario esplicitare due variabili alla volta in funzione delle due rimanenti, considerate indipendenti. Le due relazioni basate rispettivamente sui parametri resistenza e conduttanza in forma matriciale sono le seguenti (⁹⁷):

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{R} \mathbf{i}(t) + \mathbf{v}_s(t) \quad (6.1.2)$$

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{G} \mathbf{v}(t) + \mathbf{i}_s(t) \quad (6.1.3)$$

I vettori colonna delle tensioni e delle correnti $\mathbf{v}(t)$ ed $\mathbf{i}(t)$, di componenti rispettivamente $v_1(t)$, $v_2(t)$ e $i_1(t)$, $i_2(t)$ ed i vettori colonna dei termini noti $\mathbf{v}_s(t)$ ed $\mathbf{i}_s(t)$ hanno dimensioni $[2 \times 1]$; le matrici \mathbf{R} (matrice delle resistenze, di elementi r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22}) e \mathbf{G} (matrice delle conduttanze, di elementi g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22}) hanno dimensioni $[2 \times 2]$.

⁹⁷ Esistono altre relazioni basate su parametri differenti, per es. i parametri ibridi, di trasmissione,

Gli elementi delle suddette matrici possono essere determinati mediante opportune misure eseguite alle porte del doppio bipolo (⁹⁸). La relazione 6.1.2 è detta controllata in corrente, in quanto le tensioni sono funzioni delle correnti. Analogamente la relazione 6.1.3 è detta controllata in tensione, in quanto le correnti sono funzioni delle tensioni.

E' valida la seguente uguaglianza tra i parametri (matrice delle resistenze e matrice delle conduttanze) delle suddette relazioni 6.1.2 e 6.1.3:

$$\mathbf{R} = \mathbf{G}^{(-1)} \quad (6.1.4)$$

Le relazioni 6.1.2 e 6.1.3 sono dette cardinali, in quanto in esse sono esplicitate una variabile di una porta e una dell'altra porta. Per un doppio bipolo è possibile che esista solo una delle relazioni 6.1.2 e 6.1.3; ad esempio, se per la matrice \mathbf{R} risulta $\det(\mathbf{R}) = 0$, allora non esiste la sua inversa, cioè la matrice delle conduttanze \mathbf{G} , e la relazione esplicita 6.1.3 non esiste. In questo caso la matrice \mathbf{R} ha due righe dipendenti tra loro e di conseguenza anche le due tensioni $v_1(t)$ e $v_2(t)$ sono dipendenti linearmente tra loro.

In generale una relazione esplicita non esiste, quando le variabili, che dovrebbero essere indipendenti (ad es. le tensioni v_1 e v_2), sono legate tra loro da una dipendenza lineare (ad es. $v_1 = kv_2$).

6.1.1 Potenza dei doppi bipoli

Per un doppio bipolo la potenza istantanea è definita come segue (⁹⁹):

$$p(t) = v_1(t) i_1(t) + v_2(t) i_2(t) = \mathbf{v}(t)^T \mathbf{i}(t). \quad (6.1.1.1)$$

Se è nota una delle 2 relazioni cardinali 6.1.2 e 6.1.3 di un doppio bipolo omogeneo, è

⁹⁸ Per esempio nel caso di un doppio bipolo rappresentato dall'equazione 6.1.2 (supposto $\mathbf{v}_s(t) = 0$) l'elemento r_{11} della matrice \mathbf{R} si può determinare come rapporto tra la tensione v_1 e la corrente i_1 con la seconda porta aperta, ovvero a vuoto ($i_2 = 0$).

⁹⁹ La potenza elettrica P assorbita da un bipolo in corrente continua (convenzionato da utilizzatore), alimentato da una tensione V e percorso da una corrente I , è espressa dalla seguente espressione $P = VI$. La tensione e la corrente sono costanti nel tempo e perciò anche la potenza è costante nel tempo. La potenza elettrica istantanea $p(t)$ assorbita da un bipolo in corrente sinusoidale, alimentato da una tensione $v(t)$ e percorso da una corrente $i(t)$, è espressa dalla seguente espressione $p(t) = v(t) i(t)$. La tensione e la corrente sono variabili nel tempo e perciò anche la potenza istantanea è variabile nel tempo. Il valore medio della suddetta potenza istantanea $p(t)$ in un periodo prende il nome di potenza attiva P .

possibile determinare la potenza; ad esempio se si conosce la matrice delle conduttanze \mathbf{G} , l'espressione della potenza 6.1.1.1 diviene:

$$p(t) = \mathbf{v}(t)^T \mathbf{i}(t) = \mathbf{v}(t)^T \mathbf{G} \mathbf{v}(t) \quad (6.1.1.2)$$

La matrice \mathbf{G} fornisce le seguenti informazioni sulla potenza (¹⁰⁰):

1. se \mathbf{G} è definita positiva (¹⁰¹) $\Rightarrow p(t) > 0 \Rightarrow$ componente passivo;
2. se \mathbf{G} è definita negativa (¹⁰²) $\Rightarrow p(t) < 0 \Rightarrow$ componente attivo;
3. se \mathbf{G} è antisimmetrica (¹⁰³) $\Rightarrow p(t) = 0 \Rightarrow$ componente inerte.

6.1.2 Proprietà dei doppi bipoli

Le principali proprietà dei doppi bipoli sono le seguenti.

1. Connettendo una sorgente indipendente, ad esempio un generatore di corrente, alla prima porta di un doppio bipolo, è possibile rilevare la risposta (tensione) alla seconda porta a vuoto. Connettendo la stessa sorgente indipendente alla seconda porta, si rileva la risposta (tensione) alla prima porta a vuoto (¹⁰⁴). Un doppio bipolo, in cui le due risposte sono uguali, è detto doppio bipolo reciproco. In questo caso per gli elementi delle matrici \mathbf{R} e \mathbf{G} valgono le seguenti uguaglianze $r_{12} = r_{21}$ e $g_{12} = g_{21}$, ovvero le matrici sono simmetriche. Sono reciproci i doppi bipoli costituiti da componenti lineari (es.: resistori, induttori, ...) e da generatori

¹⁰⁰ Considerando la convenzione di segno degli utilizzatori.

¹⁰¹ Una matrice \mathbf{A} è definita positiva, se risulta $\mathbf{X}^T \mathbf{A} \mathbf{X} > 0$ per qualsiasi $\mathbf{X} \neq 0$, dove \mathbf{X} è un vettore colonna di dimensioni $[n \times 1]$ ed \mathbf{A} è una matrice quadrata di dimensioni $[n \times n]$.

¹⁰² Una matrice \mathbf{A} è definita negativa, se risulta $\mathbf{X}^T \mathbf{A} \mathbf{X} < 0$ per qualsiasi $\mathbf{X} \neq 0$, dove \mathbf{X} è un vettore colonna di dimensioni $[n \times 1]$ ed \mathbf{A} è una matrice quadrata di dimensioni $[n \times n]$.

¹⁰³ Una matrice \mathbf{A} è antisimmetrica se $\mathbf{A}^T = -\mathbf{A}$.

¹⁰⁴ Nel doppio bipolo reciproco, di cui al testo, la tensione ai capi della sorgente indipendente, in questo caso un generatore di corrente, misurata alla prima porta è differente da quella misurata alla seconda porta; sono uguali solo le due risposte (tensioni) alla prima ed alla seconda porta. Connettendo un generatore indipendente di tensione alla prima porta di un doppio bipolo reciproco e rilevando la risposta (corrente di cortocircuito) alla seconda porta chiusa in cortocircuito, si può constatare che la suddetta risposta è la stessa che si ha alla prima porta (chiusa in cortocircuito), connettendo il generatore di tensione alla seconda porta. Sono invece differenti nei due casi le correnti nei generatori indipendenti di tensione.

indipendenti (¹⁰⁵).

2. Un doppio bipolo, alimentato alla porta di ingresso da un generatore indipendente di corrente e con l'altra porta a vuoto, si dice simmetrico se, scambiando tra loro le due porte, ovvero connettendo la seconda porta al generatore con la prima porta a vuoto, non variano la tensione ai capi del generatore indipendente di corrente e la risposta (tensione). In questo caso le due porte sono indistinguibili tra loro. Per gli elementi delle matrici \mathbf{R} e \mathbf{G} valgono le seguenti uguaglianze $r_{11} = r_{22}$, $r_{12} = r_{21}$ e $g_{11} = g_{22}$, $g_{12} = g_{21}$. Un doppio bipolo simmetrico è anche reciproco, ma non vale l'inverso; la simmetria è una condizione "più forte" della reciprocità.

3. Un tripolo (¹⁰⁶) si dice equilibrato se le equazioni costitutive non cambiano al variare del terminale di riferimento.

4. Un doppio bipolo gode della proprietà di unidirezionalità, se in una delle due equazioni della forma matriciale 6.1.2 compaiono la tensione e la corrente di una sola porta (ad es. $v_1 = r_{11} i_1$ oppure $v_2 = r_{22} i_2$). In questo caso per i termini della matrice \mathbf{R} vale la seguente uguaglianza $r_{12} = 0$, oppure $r_{21} = 0$ (¹⁰⁷).

5. Un doppio bipolo gode della proprietà di zerodirezionalità se le due porte sono sconnesse tra loro. In questo caso per gli elementi delle matrici \mathbf{R} e \mathbf{G} valgono le seguenti uguaglianze $r_{12} = r_{21} = 0$ e $g_{12} = g_{21} = 0$.

6.2 Doppi bipoli dinamici

Per i doppi bipoli dinamici si definiscono le stesse relazioni implicite ed esplicite dei doppi bipoli adinamici, pur di considerare al posto delle grandezze funzioni del tempo le relative grandezze trasformate, secondo Laplace o secondo Steinmetz, ed al posto dei parametri resistenza e conduttanza i parametri complessi impedenza ed ammettenza; la matrice \mathbf{R} delle resistenze diviene perciò la matrice \mathbf{Z} delle impedenze, e, analogamente, la matrice \mathbf{G} delle conduttanze diviene la matrice \mathbf{Y} delle ammettenze. Con la trasformazione molte proprietà e

¹⁰⁵ Generalmente un doppio bipolo che contiene generatori controllati non è reciproco.

¹⁰⁶ Componente munito di 3 terminali.

¹⁰⁷ Lo stesso vale per la relazione 6.1.3, in questo caso risulta $g_{12} = 0$, oppure $g_{21} = 0$.

definizioni relative ai doppi bipoli adinamici sono valide anche per i doppi bipoli dinamici.

7 Metodi per la soluzione dei circuiti elettrici

7.1 Teorema di sovrapposizione degli effetti

Il teorema di sovrapposizione degli effetti è valido solo per i circuiti lineari ed afferma che ogni tensione o corrente di un componente di un circuito lineare "a regime" può essere espressa come combinazione lineare delle M sorgenti indipendenti di tensione e delle N sorgenti indipendenti di corrente. Indicando con $x_k(t)$ la k -esima tensione o la k -esima corrente, relative al componente k , in base al suddetto teorema risulta:

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^M a_j v_j^s(t) + \sum_{j=M+1}^{M+N} b_j i_j^s(t) = \sum_{j=1}^{M+N} x_{k,j}(t) \quad (7.1.1)$$

dove $v_j^s(t)$ e $i_j^s(t)$ sono la tensione e la corrente del j -esimo generatore ed i coefficienti a_j e b_j sono indipendenti dai valori delle sorgenti stesse.

Questo teorema ha delle applicazioni pratiche molto importanti; oltre ad essere utile nella dimostrazione di altri teoremi e proprietà dei circuiti, permette anche di risolvere un circuito lineare, considerando attiva una sorgente alla volta; ad esempio se si disattivano tutte le sorgenti meno la prima (¹⁰⁸), è possibile determinare la grandezza $x_{k1}(t)$. Ripetendo l'operazione per ogni sorgente j , con le rimanenti disattivate, è possibile determinare tutti i contributi $x_{k,j}(t)$. La somma dei contributi è uguale alla grandezza (tensione o corrente) $x_k(t)$.

Questa procedura è utile in particolar modo nel caso in cui le sorgenti indipendenti hanno forme d'onda diverse; ad esempio se le sorgenti sono sia di tipo stazionario, che di tipo sinusoidale, si può procedere come segue. Si risolve il circuito con il metodo dei fasori, considerando attiva una sorgente sinusoidale alla volta e disattivando le sorgenti stazionarie. Successivamente si risolve il circuito in corrente continua, considerando attiva una sorgente stazionaria alla volta e disattivando le sorgenti alternate sinusoidali; in questo caso è possibile inoltre ricorrere alla seguente semplificazione, ovvero si possono considerare "aperti" i condensatori e cortocircuitati gli induttori.

¹⁰⁸ Disattivare un generatore di tensione vuol dire cortocircuitare il generatore, ovvero annullare la tensione ai capi del generatore; disattivare un generatore di corrente vuol dire annullare la corrente erogata dal generatore, ovvero interrompere (aprire) il lato in cui è inserito il generatore.

7.2 Metodo del tableau

Il metodo del tableau permette di scrivere le equazioni di un circuito a parametri concentrati. Le equazioni di Kirchhoff di un circuito forniscono una descrizione topologica del circuito, indipendentemente dal tipo di componenti usati. Per completare la descrizione, è necessario considerare le equazioni costitutive dei componenti, che forniscono il legame esistente tra le correnti e le tensioni. Si consideri un circuito (¹⁰⁹) lineare, adinamico, tempo-invariante e si associ ad esso il relativo grafo (costituito da b lati ed n nodi), numerando tutti i rispettivi lati. Si individui un albero stellare (¹¹⁰), costituito da $n - 1$ lati. Si stabilisca il riferimento della corrente in ciascun lato del grafo (¹¹¹); di conseguenza è fissato, in base alla convenzione degli utilizzatori, il riferimento della tensione di ogni lato. Il numero dei lati del coalbero è pari a $b - n + 1$. Assegnare ad ogni nodo il numero del lato dell'albero ad esso connesso e al nodo di riferimento il numero 0. Applicando nell'ordine il primo principio di Kirchhoff ai nodi indipendenti del grafo, il secondo principio di Kirchhoff (¹¹²) ai lati del grafo e considerando le equazioni costitutive dei componenti del circuito, si ottiene il seguente sistema di equazioni in forma matriciale:

$$\mathbf{A} \mathbf{i} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{e} \tag{7.2.1}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{i}, t) = \mathbf{0}$$

dove \mathbf{v} e \mathbf{i} sono i vettori colonna delle tensioni e delle correnti di lato di dimensioni $[b \times 1]$, \mathbf{e} è il vettore colonna dei potenziali dei nodi indipendenti di dimensioni $[(n - 1) \times 1]$, \mathbf{A} è la matrice ridotta di incidenza di dimensioni $[(n - 1) \times b]$ e l'equazione $\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{i}, t) = \mathbf{0}$ rappresenta le relazioni costitutive dei componenti. Complessivamente si hanno $2b + n - 1$

¹⁰⁹ Con le grandezze tensioni e correnti stazionarie (costanti nel tempo) o alternate sinusoidali.

¹¹⁰ Il metodo del tableau è valido anche se l'albero non è stellare, è stato considerato un albero stellare per semplicità di trattazione. L'albero stellare esiste solo se il grafo è completo.

¹¹¹ Il riferimento delle correnti dei lati dell'albero, che convergono al nodo di riferimento, deve essere scelto in modo che le relative tensioni, in base alla convenzione degli utilizzatori, abbiano il riferimento con il segno negativo in corrispondenza del nodo a potenziale nullo; ovvero le correnti dei lati dell'albero devono avere riferimenti "uscanti" dai nodi.

¹¹² Ogni tensione di un lato è uguale alla differenza dei potenziali dei nodi estremi del lato.

equazioni in $2b + n - 1$ incognite (b correnti e b tensioni dei lati, $n - 1$ potenziali dei nodi). Scrivendo le equazioni costitutive nella seguente forma:

$$\mathbf{H}^v \mathbf{v} + \mathbf{H}^i \mathbf{i} = \mathbf{h}_s, \quad (7.2.2)$$

dove \mathbf{H}^v e \mathbf{H}^i sono matrici quadrate di dimensioni $[b \times b]$ ed \mathbf{h}_s è il vettore colonna delle sorgenti dei lati di dimensioni $[b \times 1]$, il sistema 7.2.1 può essere riscritto in forma matriciale come segue:

$$\begin{array}{cccccc} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A} & \mathbf{e} & \mathbf{0} & \\ -\mathbf{A}^T & \mathbf{I}_b & \mathbf{0} & \mathbf{v} & = & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}^v & \mathbf{H}^i & \mathbf{i} & & \mathbf{h}_s \end{array} \quad (7.2.3)$$

Nel sistema 7.2.3 il primo termine a sinistra è una matrice di dimensioni $[(2b + n - 1) \times (2b + n - 1)]$, indicata con la lettera \mathbf{T} nel seguito, \mathbf{I}_b è la matrice identità di dimensioni $[b \times b]$ e \mathbf{h}_s il vettore colonna dei termini noti di dimensioni $[b \times 1]$. Il circuito possiede un'unica soluzione, se la matrice \mathbf{T} è invertibile, ovvero se risulta $\det(\mathbf{T}) \neq 0$; se, al contrario, risulta $\det(\mathbf{T}) = 0$, il circuito non ammette soluzioni.

Se il circuito (¹¹³) è lineare, dinamico, tempo-invariante, il sistema 7.2.3 è valido, pur di sostituire alle grandezze funzioni del tempo le relative grandezze complesse trasformate (secondo Steinmetz) ed alle matrici reali \mathbf{H}^v ed \mathbf{H}^i le relative matrici complesse (¹¹⁴). In base alla suddetta sostituzione si ottiene il seguente sistema algebrico-complesso in forma matriciale:

$$\begin{array}{cccccc} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A} & \mathbf{E}(j\omega) & \mathbf{0} & \\ -\mathbf{A}^T & \mathbf{I}_b & \mathbf{0} & \mathbf{V}(j\omega) & = & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}^v & \mathbf{H}^i & \mathbf{I}(j\omega) & & \mathbf{H}_s \end{array} \quad (7.2.4)$$

¹¹³ In regime sinusoidale.

¹¹⁴ Se nelle relazioni costitutive 7.2.2 dei componenti dinamici le grandezze funzioni del tempo sono sostituite con le relative grandezze trasformate (secondo Steinmetz) ed alla derivata delle grandezze funzioni del tempo è sostituito il prodotto di $j\omega$ per la trasformata delle grandezze, si ottengono delle relazioni costitutive di tipo complesso e quindi le matrici \mathbf{H}^v ed \mathbf{H}^i sono anch'esse complesse.

7.3 Metodo nodale

Il metodo nodale permette di scrivere le equazioni di un circuito in maniera più efficiente del metodo del tableau, ovvero riduce le dimensioni del sistema. Il fine del metodo è quello di determinare i potenziali dei nodi indipendenti. Si suppone nel seguito che il circuito contenga solo componenti controllati in tensione; il termine "controllato in tensione" si applica a tutti i componenti (bipoli, tripoli e multipoli) per i quali le correnti sono funzioni delle tensioni (¹¹⁵).

Si consideri un circuito (¹¹⁶) lineare, adinamico (resistivo), tempo-invariante e si associ ad esso il relativo grafo (costituito da b lati ed n nodi). Si individui un albero stellare (¹¹⁷) costituito da $n - 1$ lati, ottenuto collegando $n - 1$ nodi, comunque scelti, con l' n -esimo, che si assume come nodo di riferimento; in tal modo ad ogni nodo risulta connesso un solo lato dell'albero (ad eccezione del nodo di riferimento). Si numerino tutti i lati del grafo (¹¹⁸). Si assegni ad ogni nodo il numero del lato dell'albero ad esso connesso e al nodo di riferimento il numero 0. Si stabilisca arbitrariamente il riferimento della corrente in ciascun lato del grafo (¹¹⁹); di conseguenza è fissato, in base alla convenzione degli utilizzatori, il riferimento della tensione di ogni lato. Le grandezze incognite da determinare sono rappresentate dai potenziali degli $n - 1$ nodi indipendenti.

Applicando il primo principio di Kirchhoff ai nodi indipendenti del grafo, si ottiene il seguente sistema in forma matriciale costituito da $n - 1$ equazioni nelle b correnti di lato:

$$\mathbf{A} \mathbf{i} = \mathbf{0}. \quad (7.3.1)$$

¹¹⁵ Il metodo si applica, se tutti i bipoli sono di tipo parallelo (es.: un generatore di corrente in parallelo con una conduttanza); nel caso in cui siano presenti bipoli di tipo serie (es. un generatore di tensione in serie con una resistenza) è possibile applicare il metodo nodale, pur di trasformare i bipoli di tipo serie negli equivalenti bipoli di tipo parallelo.

¹¹⁶ Con le grandezze tensioni e correnti stazionarie (costanti nel tempo) o alternate sinusoidali.

¹¹⁷ Il metodo nodale è valido anche se l'albero non è stellare.

¹¹⁸ Conviene, per maggiore chiarezza, numerare dapprima e consecutivamente tutti i lati dell'albero (1, 2, 3, ..., $n - 1$) e proseguire successivamente con la numerazione dei lati del coalbero (n , $n + 1$, ..., b).

¹¹⁹ Il riferimento delle correnti dei lati dell'albero, che convergono al nodo di riferimento, deve essere scelto in modo che le relative tensioni, in base alla convenzione degli utilizzatori, abbiano il riferimento con il segno negativo in corrispondenza del nodo a potenziale nullo; ovvero le correnti dei lati dell'albero devono avere riferimenti "uscanti" dai nodi.

Applicando il secondo principio di Kirchhoff ai lati del grafo (¹²⁰), si ottiene il seguente sistema in forma matriciale costituito da b equazioni nelle b tensioni di lato e negli $n - 1$ potenziali dei nodi:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{e} \quad (7.3.2)$$

Infine è possibile esprimere ogni corrente di lato in funzione della relativa tensione tramite le relazioni costitutive, ottenendo il seguente sistema in forma matriciale costituito da b equazioni:

$$\mathbf{i} = \mathbf{G} \mathbf{v} + \mathbf{i}_s. \quad (7.3.3)$$

Dai 3 sistemi precedenti si ottiene la seguente equazione in forma matriciale (¹²¹):

$$\mathbf{G}^{\text{nod}} \mathbf{e} = -\mathbf{A} \mathbf{i}_s \quad (7.3.4)$$

dove $\mathbf{G}^{\text{nod}} = \mathbf{A} \mathbf{G} \mathbf{A}^T$ è la matrice nodale del circuito di dimensioni $[n - 1 \times n - 1]$, \mathbf{e} è il vettore colonna incognito dei potenziali di nodo di dimensioni $[n - 1 \times 1]$, \mathbf{A} è la matrice ridotta di incidenza di dimensioni $[(n - 1) \times b]$ (¹²²), \mathbf{G} è la matrice delle conduttanze dei lati di dimensioni $[b \times b]$ ed \mathbf{i}_s (¹²³) è il vettore colonna dei generatori di corrente dei lati di dimensioni $[b \times 1]$.

Risolvendo l'equazione in forma matriciale 7.3.4, si ottiene il vettore colonna \mathbf{e} , ovvero i potenziali degli $n - 1$ nodi indipendenti.

Se il circuito (¹²⁴) è lineare, dinamico, tempo-invariante, l'equazione 7.3.4 è valida, pur di sostituire alle grandezze funzioni del tempo le relative grandezze complesse trasformate

¹²⁰ Ogni tensione di un lato è uguale alla differenza dei potenziali dei nodi estremi del lato.

¹²¹ L'equazione 7.3.4 si ottiene dalla 7.3.1, andando a sostituire in questa al vettore colonna \mathbf{i} la 7.3.3 e successivamente al vettore colonna \mathbf{v} la 7.3.2.

¹²² Il generico termine a_{kj} della matrice \mathbf{A} è pari ad 1 se il riferimento della corrente del lato j è uscente dal nodo k , è pari a -1 se il riferimento della corrente del lato j è entrante nel nodo k , è pari a 0 se il lato j non è connesso al nodo k .

¹²³ La componente k -esima i_{sk} del vettore colonna \mathbf{i}_s è assunta positiva, se ha riferimento uguale a quello della corrente del lato k , altrimenti è assunta negativa.

¹²⁴ In regime sinusoidale.

(secondo Steinmetz) ed alla matrice nodale \mathbf{G}^{nod} la matrice nodale complessa \mathbf{Y}^{nod} .

Il metodo nodale sopra descritto è un caso particolare del metodo delle sezioni, nel caso in cui l'albero è stellare, ovvero tutti i lati dell'albero convergono nel nodo di riferimento (¹²⁵).

7.3.1 Scrittura diretta della matrice nodale del circuito

Nel metodo nodale gli elementi della matrice nodale del circuito \mathbf{G}^{nod} possono essere determinati direttamente come segue. Il termine G_{kk} è pari alla somma delle conduttanze connesse al nodo k , il termine G_{kj} è pari alla somma cambiata di segno delle conduttanze connesse tra i nodi k e j .

7.4 Metodo delle maglie

Il metodo delle maglie rappresenta il metodo duale del metodo nodale. Il fine del metodo è quello di determinare le correnti delle maglie indipendenti. Si suppone nel seguito che il circuito contenga solo componenti controllati in corrente; il termine "controllato in corrente" si applica a tutti i componenti (bipoli, tripoli e multipoli) per i quali le tensioni sono funzioni delle correnti (¹²⁶).

Si consideri un circuito lineare, adinamico (resistivo), tempo-invariante (¹²⁷) e si associ ad esso il relativo grafo (costituito da b lati ed n nodi), numerando tutti i rispettivi lati. Si

¹²⁵ Si definisce sezione una superficie chiusa, che taglia il circuito (rete) in due parti. Ad ogni albero è possibile associare un sistema fondamentale di sezioni (costituito da $n - 1$ sezioni indipendenti), in modo che ognuna di esse tagli un solo lato dell'albero e sia orientata come questo. I riferimenti delle correnti dei lati dell'albero sono assunti "uscanti" dalla sezione. La numerazione dei lati dell'albero individua la numerazione delle sezioni (ad es. il lato $n. 1$ dell'albero individua la sezione $n. 1$ ed è tagliato da questa). Nel metodo delle sezioni le incognite sono le tensioni delle sezioni, che coincidono con le tensioni dei lati dell'albero, ed il primo principio di Kirchhoff (7.3.1) si applica alle sezioni, non ai nodi. Nell'equazione in forma matriciale 7.3.4 il generico termine a_{kj} della matrice \mathbf{A} è pari ad 1, se il riferimento del lato j è "uscante" dalla sezione k , è pari a -1 , se il riferimento del lato j è "entrante" nella sezione k , è pari a 0, se il lato j non attraversa la sezione k . Il generico termine G_{kj} della matrice \mathbf{G}^{nod} è pari, per $k = j$, alla somma delle conduttanze dei lati, che attraversano la sezione k , mentre, per $k \neq j$, è pari alla somma delle conduttanze dei lati, che attraversano con lo stesso riferimento entrambe le sezioni k e j , in caso contrario la somma è considerata con segno negativo. La soluzione della 7.3.4 fornisce le tensioni delle sezioni, ovvero il vettore colonna \mathbf{e} . Si evidenzia infine che nel metodo delle sezioni l'albero non è stellare.

¹²⁶ Il metodo si applica, se tutti i bipoli sono di tipo serie (es.: un generatore di tensione in serie con una resistenza); nel caso in cui siano presenti bipoli di tipo parallelo (es. un generatore di corrente in parallelo con una conduttanza) è possibile applicare il metodo delle maglie, pur di trasformare i bipoli di tipo parallelo negli equivalenti bipoli di tipo serie.

¹²⁷ Con le grandezze tensioni e correnti stazionarie (costanti nel tempo) o alternate sinusoidali.

individui un albero, costituito da $n - 1$ lati. Si stabilisca arbitrariamente il riferimento della corrente in ciascun lato del grafo (¹²⁸); di conseguenza è fissato, in base alla convenzione degli utilizzatori, il riferimento della tensione di ogni lato. Il numero dei lati del coalbero, e quindi delle maglie indipendenti, è pari a $b - n + 1$. Ogni maglia indipendente è formata dai vari lati dell'albero e da un solo lato del coalbero; la corrente di quest'ultimo lato rappresenta la corrente di maglia incognita ed il suo riferimento determina l'orientazione della maglia. La numerazione delle maglie indipendenti coincide con la numerazione dei lati del coalbero, ad esempio il lato n. 1 del coalbero individua la maglia n.1. Applicando il secondo principio di Kirchhoff (¹²⁹) alle maglie indipendenti del circuito, si ottiene il seguente sistema in forma matriciale di $b - (n - 1)$ equazioni:

$$\mathbf{B} \mathbf{v} = \mathbf{0}. \quad (7.4.1)$$

Esplicitando le correnti dei lati del grafo in funzione delle correnti di maglia (correnti dei lati del coalbero), si ottiene il seguente sistema in forma matriciale di b equazioni:

$$\mathbf{i} = \mathbf{B}^T \mathbf{I}^m, \quad (7.4.2)$$

dove \mathbf{I}^m è il vettore colonna incognito delle correnti di maglia di dimensioni $[b - (n - 1) \times 1]$.

Infine è possibile esprimere ogni tensione di lato in funzione della relativa corrente tramite le relazioni costitutive, ottenendo il seguente sistema in forma matriciale di b equazioni:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \mathbf{i} + \mathbf{v}_s. \quad (7.4.3)$$

Dai 3 sistemi precedenti si ottiene la seguente equazione in forma matriciale (¹³⁰):

$$\mathbf{R}^m \mathbf{I}^m = - \mathbf{B} \mathbf{v}_s \quad (7.4.4)$$

¹²⁸ Nell'attribuire i riferimenti alle correnti dei lati del grafo, e quindi alle correnti dei lati del coalbero, è necessario che le maglie indipendenti abbiano tutte la medesima orientazione oraria o antioraria (coincidente con il riferimento della corrente dei lati del coalbero), in modo tale che, per la determinazione degli elementi R_{kj} (con $k \neq j$) della matrice delle maglie del circuito \mathbf{R}^m , valga sempre la stessa regola; ovvero R_{kj} è pari alla somma cambiata di segno delle resistenze comuni alle maglie k e j (consultare il par. 7.4.1).

¹²⁹ La somma algebrica delle tensioni dei lati di una maglia è nulla.

¹³⁰ L'equazione 7.4.4 si ottiene dalla 7.4.1 andando a sostituire in questa al vettore \mathbf{v} la 7.4.3 e successivamente al vettore \mathbf{i} la 7.4.2.

dove $\mathbf{R}^m = \mathbf{B} \mathbf{R} \mathbf{B}^T$ è la matrice delle maglie del circuito di dimensioni $[b - (n - 1) \times b - (n - 1)]$, \mathbf{B} è la matrice ridotta delle maglie di dimensioni $[b - (n - 1) \times b]$ (¹³¹), \mathbf{R} è la matrice delle resistenze dei lati di dimensioni $[b \times b]$, e \mathbf{v}_s (¹³²) è il vettore colonna dei generatori di tensione dei lati di dimensioni $[b \times 1]$.

Risolvendo l'equazione in forma matriciale 7.4.4, si ottiene il vettore colonna \mathbf{I}^m , ovvero le correnti delle maglie indipendenti (correnti dei lati del coalbero).

Se il circuito (¹³³) è lineare, dinamico, tempo-invariante, l'equazione 7.4.4 è valida, pur di sostituire alle grandezze funzioni del tempo le relative grandezze complesse trasformate (secondo Steinmetz) ed alla matrice delle maglie \mathbf{R}^m la matrice complessa delle maglie \mathbf{Z}^m .

Il metodo delle maglie è un caso particolare del metodo degli anelli; nel metodo delle maglie gli anelli coincidono con il sistema di maglie indipendenti (¹³⁴).

7.4.1 Scrittura diretta della matrice delle maglie del circuito

Gli elementi della matrice delle maglie del circuito \mathbf{R}^m possono essere determinati direttamente come segue. Il termine R_{kk} è pari alla somma delle resistenze presenti nella maglia k , il termine R_{kj} è pari alla somma cambiata di segno delle resistenze comuni alle maglie k e j (¹³⁵).

¹³¹ Il generico termine b_{kj} della matrice \mathbf{B} è pari ad $+1$ o -1 , se il lato j appartiene alla maglia k ed ha orientazione concorde o discorde con quella della maglia stessa, è pari a 0 , se il lato j non appartiene alla maglia k .

¹³² La componente k -esima v_{sk} del vettore colonna \mathbf{v}_s è assunta positiva, se ha riferimento uguale a quello della tensione del lato k , altrimenti è assunta negativa.

¹³³ In regime sinusoidale.

¹³⁴ Per anello di un grafo si intende un percorso chiuso delimitato dai lati del grafo, per maglia si intende un percorso chiuso, che non è attraversato al suo interno da alcun lato. Nel metodo degli anelli le incognite sono le correnti degli anelli.

¹³⁵ A condizione che le maglie indipendenti abbiano tutte orientazione oraria o antioraria. Nel caso in cui una maglia ha orientazione antioraria e quella adiacente, tramite un lato, ha orientazione oraria, la resistenza del lato comune va considerata con segno positivo.

7.5 Confronto tra il metodo nodale ed il metodo delle maglie

Il metodo nodale ed il metodo delle maglie rappresentano metodi sistematici per l'analisi delle reti elettriche. Convieni utilizzare il primo metodo, se si devono determinare i potenziali dei nodi o in caso di reti contenenti molti elementi (conduttanze, generatori di corrente, ...) connessi in parallelo o se la rete oggetto di analisi è del tipo non planare, in quanto in questo caso non è possibile applicare il metodo delle maglie. Convieni utilizzare il secondo metodo in caso di reti contenenti molti elementi (resistori, generatori di tensione, ...) connessi in serie.

Infine è utile evidenziare che, qualora il numero dei nodi sia superiore al numero delle maglie, conviene utilizzare il metodo nodale, viceversa, se il numero delle maglie è superiore al numero dei nodi, conviene impiegare il metodo delle maglie.

CONCLUSIONE

A conclusione del presente lavoro si evidenzia che, al fine di preservare il carattere storico della tesi, sono state riportate solo alcune significative formule e relazioni, prediligendo una descrizione critico-storica dei fenomeni, piuttosto che una loro traduzione in formule e simboli, ad eccezione dell'appendice.

L'evoluzione futura dell'ingegneria elettrica sarà possibile grazie soprattutto alle scoperte, intuizioni e teorie degli scienziati, che hanno scritto fino ad oggi la storia della tecnica elettrica ed hanno contribuito con i loro studi a sviluppare un sapere tecnico-scientifico, presupposto essenziale per ogni nuova teoria in avvenire. Caratteristica basilare di ogni scienza è quel continuum tra passato, presente e futuro, che, contraddistinto da un'origine, è comunque privo di una conclusione/fine, sottolineando in tal senso l'assenza di limiti nel campo della ricerca teorica; l'attività di ricerca e di studio, in quanto attività intellettuale, non ha confini, ciò ha permesso agli scienziati di ogni tempo la possibilità di valicare le conoscenze delle loro epoche e quindi di elaborare teorie innovative.

Questa tesi, conclusiva del mio percorso di studi universitari, sarà comunque un input per continui ed ulteriori studi, proficui per lo svolgimento della mia attività professionale.

BIBLIOGRAFIA

Capitolo 1

- L. Puccianti, “*Storia della fisica*”, ed. Le Monnier, Firenze, 1951.
- E. Amaldi, “*Fisica sperimentale, parte II*”, ed. Tipo-Litografia Marves, Roma, 1959.
- C. A. Reichem, “*Storia della fisica*”, ed. Ugo Mursia, 1965.
- R. Fuchs Walter, “*La fisica moderna illustrata*”, ed. Rizzoli, Milano, 1967.
- D. Bernal John, “*Storia della scienza*”, Editori Riuniti, Roma, 1969.
- P. Caldirola, A. Loinger, “*Teoria, fisica e realtà*”, ed. Liguori, Napoli, 1979.
- P. Caldirola, M. Fontanesi, E. Sindoni, “*Elettromagnetismo*”, ed. Masson, 1982.
- A. Braccesi, “*Una storia della fisica classica*”, ed. Zanichelli, Bologna, 1992.
- M. Giugliano, “*Storia della fisica da Galilei ad Einstein*”, ed. Youcanprint, 2013.
- A. Baracca, “*Storia della fisica italiana. Un’introduzione*”, ed. Jaca Book, Milano, 2017.

Capitoli 2, 3 e 4

- L. Lombardi, “*Il centenario dell’induzione elettromagnetica e l’opera scientifica di Michael Faraday*”, L’elettrotecnica, 1931.
- G. Polvani, “*Antonio Pacinotti: la vita e le opere*”, L’elettrotecnica, 1932.
- G. Giorgi, “*Verso l’elettrotecnica moderna*”, ed. Tamburini, Milano, 1949.
- L. Orizio, F. Radice, “*Storia dell’industria elettrica in Italia, 1882-1962*”, ed. La Culturale, Milano, 1964.
- J. C. Maxwell, “*Trattato di elettricità e magnetismo*”, ed. UTET, Torino, 1973.

- A. Capocaccia, U. Forti, A. Mondini, “*Storia della tecnica*”, ed. UTET, Torino, 1973.
- Singer, Holmyard, Hall, Williams, “*Storia della tecnologia*”, ed. Boringhieri, Torino, 1978.
- V. Castronovo, “*L’industria italiana dall’Ottocento ad oggi*”, ed. Mondadori, Milano 1980.
- W. von Siemens, “*La mia vita e le mie invenzioni*”, ed. Longanesi & C., Milano, 1982.
- G. Colombo, “*Industria e politica nella storia d’Italia. Scritti scelti: 1861-1916*”, a cura di C. G. Lacaita, ed. Cariplo Laterza, Bari, 1985.
- R. Giannetti, “*La conquista della forza. Risorse, tecnologia ed economia nell’industria elettrica italiana (1883-1940)*”, ed. Franco Angeli, Milano, 1985.
- B. Bezza, “*Energia e sviluppo. L’industria elettrica italiana e la società Edison*”, ed. Einaudi, Torino, 1986.
- C. Sicola, “*125 anni per l’energia*”, Milano, 1988.
- G. Mori (a cura di), “*Storia dell’industria elettrica in Italia, Le origini 1882-1914*”, ed. Laterza, Bari, 1992.
- H. Ford, “*Il mio amico Edison*”, ed. Bollati-Boringhieri, Torino, 1992.
- L. De Rosa (a cura di) “*Storia dell’industria elettrica in Italia. Il potenziamento tecnico e finanziario*”, ed. Laterza, Bari, 1993.
- A. Ferraresi, “*Nuove industrie, nuove discipline, nuovi laboratori: la Scuola superiore di elettrotecnica di Torino (1886-1914)*” in “*Innovazione e modernizzazione in Italia fra Otto e Novecento*”, a cura di E. Decleva, C. G. Lacaita, A. Ventura, ed. Franco Angeli, Milano, 1995 (pp. 376–494).
- R. Maiocchi, “*Storia della scienza in Occidente*”, ed. La Nuova Italia, Firenze, 1995.
- C. Pavese, M. Fortis, A. Quadrio Curzio “*Il gruppo Edison, 1883-2003*”, ed. Il Mulino, Bologna, 2003.

D. Bodanis, T. Cannillo, “*L’universo elettrico. L’elettrizzante storia dell’elettricità*”, ed. Mondadori, 2006.

V. Cantoni, A. Silvestri (a cura di), “*Storia della tecnica elettrica*”, ed. Cisalpino Istituto Editoriale Universitario Monduzzi Editore, Milano, 2009.

M. Guarnieri, “*The Beginning of Electric Energy Transmission: Part One*”, IEEE Industrial Electronics Magazine”, marzo 2013.

M. Guarnieri, “*The Beginning of Electric Energy Transmission: Part Two*”, IEEE Industrial Electronics Magazine”, giugno 2013.

M. Guarnieri, “*Fatti e protagonisti dell’elettromagnetismo*”, ed. Aracne, Roma, 2015.

M. Guarnieri, “*Revolving and Evolving-Early dc Machines*”, IEEE Industrial Electronics Magazine”, settembre 2018.

M. Guarnieri, “*The Development of ac Rotary Machines*”, IEEE Industrial Electronics Magazine”, dicembre 2018.

M. Guarnieri, “*Da Habilis a Jobs: due milioni di anni con la tecnologia*”, ed. Esculapio, Bologna, 2019.

Appendice

G. Someda, “*Elementi di elettrotecnica generale*”, ed. Pàtron, Bologna, 1977.

C. A. Desoer, E. S. Kuh: “*Fondamenti di teoria dei circuiti*”, ed. Franco Angeli, Milano, 1980.

L. O. Chua, C. A. Desoer, E. S. Kuh, “*Linear and Nonlinear Circuits*”, ed. McGraw- Hill, New York, 1987.

N. Balabanian, “*Electric Circuits*”, ed. McGraw-Hill, New York, 1994.

G. Martinelli, M. Salerno, “*Fondamenti di Elettrotecnica, vol. I e II*”, ed. Scientifiche Siderea, Roma, 1995.

C. M. Arturi, “*Lezioni di elettrotecnica*”, ed. Progetto Leonardo, 1996.

D. E. Johnson, J. L. Hilburn, P. D. Scott, "Electric Circuit Analysis", ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.

C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, "*Circuiti Elettrici*", ed. McGraw-Hill, Milano, 2004.

R. C. Dorf, "*Electric Circuits*", ed. John Wiley & Sons, New York, 2004.

V. Daniele, A. Liberatore, R. Graglia e S. Manetti, "*Elettrotecnica*", ed. Monduzzi, Bologna, 2005.

P. P. Civalleri, "*Elettrotecnica, Tomo I*", ed. Levrotto & Bella, Torino, 2005.

R. Perfetti, "*Circuiti elettrici*", ed. Zanichelli, Bologna, 2013.