

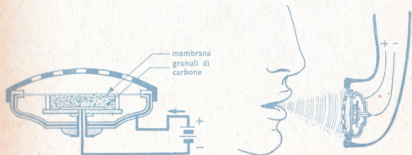
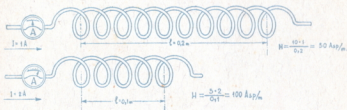
GIUSEPPE BIASUTTI

Amper

ELETTROTECNICA SPERIMENTALE

***Visione delle più attuali teorie
con speciale riguardo ai
programmi ministeriali degli Istituti tecnici industriali***

203 illustrazioni



HOEPLI

BARONI R., Semiconduttori, transistori, diodi al germanio. Teoria, Tecnologia, Applicazioni. 2ª edizione riveduta ed ampliata (uscirà aprile 1960)

BRAGO L., Elettrotecnica. Traduzione italiana a cura del dott. Ing. A. Quercia. 1953, in-16, di pag. XX-316, 139 figure di cui 48 in 33 tavole fuori testo L. 1800

BROEDNER E. e J. WOLF. L'elettrotecnica nei comandi e negli impianti industriali. 1955, in-8, di pag. XVI-272, con 175 illustrazioni e 29 tabelle di cui due fuori testo (Protezione delle macchine elettriche; riassunto sinottico delle caratteristiche dei motori) L. 1600

CASTIGLIONI G., Insegne luminose. Tubi fluorescenti. Tecnica di fabbricazione. 1953, in-8, di pagine XII-232, con 127 illustrazioni L. 1600

COPPI E. Tecnica elettrica negli impianti industriali e civili: Vol. I: «Generatori, i trasformatori e gli utilizzatori». 1960, in-16, di pag. XXIV-428 con 221 figure e 48 tabelle, copertina a colori plastificata L. 2000

Vol. II: «Le apparecchiature ed i materiali» (uscirà marzo 1960)

Vol. III: «Gli impianti elettrici - Criteri di progettazione e costruzione» (in preparazione)

COPPI E. e G. PALEARI. Manuale per la pratica applicazione delle Norme CEI per gli impianti elettrici negli edifici civili. Dati e tabelle indispensabili per l'installatore. 1959, in-16, di pag. XVI-280 con 109 figure e XXII tabelle, copertina a colori plastificata L. 1200

DE AMENTI G., Le installazioni elettriche spiegate attraverso gli schemi e gli apparecchi. Nuova edizione completamente riveduta ed aggiornata da E. Coppi e D. Sironi. Ristampa 1957, in-16, di pag. XX-558, con 380 figure, 43 tabelle e 5 tavole fuori testo. Copertina a colori L. 2000

DESSY F. Principi di elettrotecnica. 5ª edizione aumentata con nuovi capitoli sulla radiologia e la fisica atomica. 1953, in-32, di pagine XXVIII-294, con 64 figure, rilegato su pelle L. 1200

FODDIS G., Corso teorico pratico di telefonia. Ristampa 1959 della 1ª edizione con l'aggiunta di 3 appendici sui maggiori problemi e sui progressi nel campo delle telecomunicazioni. In-8, di pag. CXXIV-832, con 788 figure e schemi, 48 tabelle numeriche, estratto delle principali prescrizioni del C.C.I.F. L. 5000

FRANCESCHELLI D., Riscaldamento elettrico, domestico, industriale, speciale. Riscaldi, avviamento e regolazione. 7ª edizione riveduta a cura di G. Duille Coste. 1956, in-16, di pag. XX-600, con 334 figure, 252 tabelle e 780 formule, copertina a colori plastificata L. 2200

LIWSCHITZ M., Le macchine elettriche. Prima traduzione italiana a cura del dott. Ing. C. Rossi:

Parte I: «Teoria e funzionamento». Ristampa 1958, in-8, di pag. XII-364, con 284 figure nel testo L. 1500

Parte II (in collaborazione con l'ing. H. Glockner): «Tecnica dell'isolamento e costruzione meccanica delle macchine elettriche». Ristampa anastatica 1953, in-8, di pag. XII-362, con 462 figure nel testo e 13 tavole costruttive f. t. L. 1200

Parte III (in collaborazione con il dott. Ing. H. Raymond): «Calcolo e determinazione delle dimensioni delle macchine elettriche». Ristampa anastatica 1957, in-8, di pag. VIII-464, con 398 figure nel testo L. 2000

MAINARDIS M., Centrali elettriche. 3ª edizione rifatta ed aumentata. 1957, in-8, di pag. XXIV-800, con 363 illustrazioni e numerose tabelle. Sopracopertina a colori plastificata L. 4500

— In rilegatura linson, sopracopertina a colori plastificata L. 5500

MANNINO PATANÈ G., Tecnica elettroacustica. Il sistema assoluto (M.K.S. o Giorgi) (2ª ediz. della «Diffusione sonora»). 1955, in-8, di pagine XVI-252, con 118 figure e 15 tabelle L. 1500

— Guida pratica per l'operatore cinematografico - Protezione - Nuovi sistemi di proiezione - Acustica - Stereofonia - ecc. 5ª edizione interamente rifatta (7ª ediz. di E. tina Senner). 1957,

in-16, di pag. XXIV-464, con 340 illustrazioni, 5 tabelle e 3 tavole f. t. Copertina a colori plastificata L. 1800

MANNINO PATANÈ G., La tecnica elettronica e sue applicazioni:

Vol. I: «Nozioni basilari». 4ª edizione parzialmente rifusa, ampliata e aggiornata. 1959, in-8, di pag. XLVIII-852, con 663 illustrazioni e 36 tabelle, copertina a colori plastificata L. 7500

Vol. II: «Applicazioni normali». 3ª edizione 1955, in-8, di pag. XXXII-929, con 601 illustrazioni delle quali 3 fuori testo, e 17 tabelle L. 4000

Vol. III: «Applicazioni industriali» (in preparazione)

— L'energia nucleare nelle sue concezioni e applicazioni pacifiche. 2ª edizione completamente rifusa. 1957, in-16, di pagine XXXVIII-360, con 77 illustrazioni e 13 tabelle, delle quali 5 fuori testo, copertina a colori plastificata L. 1600

MARANTONIO E., Elettrotecnica industriale. Elementi ed applicazioni fondamentali. 1959, in-8, di pag. XX-498, con 547 illustrazioni e 16 tavole, copertina a colori plastificata L. 4500

MARTINOLI B., Isolatori di porcellana. Generalità e caratteristiche. Isolatori per alta tensione. Collaudo degli isolatori. 1947, in-8, di pag. XVI-200, 146 fig. e 16 tabelle L. 500

MAZZILLI L., Arcosaldatura. Corso completo in 20 lezioni. Nozioni e lezioni pratiche ad uso dei tecnici e degli operai saldatori. 3ª edizione aggiornata e ampliata. 1954, in-16, di pag. XII-200, con 124 figure e VIII tabelle. Copertina plastificata L. 600

MAZZOCCHI M., Avvolgimenti delle macchine elettriche a corrente continua e alternata. Costruzione - Riparazione - Anormalità - Localizzazione dei guasti. 9ª edizione aumentata ed aggiornata. 1957, in-8, di pag. XX-800, con 1212 figure originali delle quali 65 a colori e 51 tabelle L. 3500

— Atlante di schemi di avvolgimenti di macchine a corrente continua ed alternata. 667 schemi originali a circuiti distinti e facilmente leggibili (di cui 85 fuori testo). 4ª edizione aumentata e migliorata. 1958, in-8, di pag. VIII-354 L. 2500

— Vademecum dell'avvolgitore (di Mazzocchino avvolgimenti). 3ª edizione completamente rifusa ed aumentata. 1957, in-16, di pag. XII-264, con 176 figure di cui 12 a colori e XXIII tabelle L. 1000

MAZZOLENI F., Ingegneria nucleare. 2ª edizione completamente riveduta e ampliata. 1960, in-8, di pag. XII-600, con 188 illustrazioni, copertina a colori plastificata L. 5000

MONTEFINALE G., Il radar e il suo impiego nella navigazione marittima ed aerea. 2ª edizione completamente riveduta ed ampliata. 1951, in-8, di pag. XVI-348, con 172 incisioni, schemi vari ed un prontuario di terminologia radar inglese-italiana, sopracopertina a colori L. 2000

— Manuale del radarista. Istruzioni sulle tecniche, sui materiali, circuiti, applicazioni ed impiego del radar. 1958, in-8, di pag. XII-476, con 258 figure e schemi vari e un prontuario di terminologia radar inglese-italiano. Copertina a colori plastificata L. 2500

— I radiolocali alla navigazione aerea e marittima. Principi fondamentali. Elementi informativi pratici per l'Aviatore e il Marino. 1960, in-8, di pag. XII-280, con 151 figure. Copertina a colori plastificata L. 2500

MONTE E., Radiotecnica:

Vol. I: «Nozioni fondamentali». 6ª edizione in gran parte rifatta. 1958, in-8, di pag. XXVIII-654 con 441 incisioni, tabelle e abachi L. 3500

Vol. II: «Tubi elettronici e transistori». 5ª edizione in gran parte rifatta. 1954, in-8, di pag. XXIV-816, con 587 incisioni e 38 tabelle L. 3500

Vol. III: «Pratica di radiotrasmissione e ricezione». 6ª edizione interamente rifatta. Molti nuovi disegni e circuiti. Tutte le novità e i progressi più recenti. 1955, in-8, di pag. XXXII-1078, 972 incisioni, tabelle e abachi L. 3500

MORATI L. A. B. C. dell'elettrotecnica per l'elettrotecnista autodidatta. 1956, in-16, di pag. XVI-260, con 258 illustrazioni, copertina a colori plastificata L. 1500

(segue nel risvolto posteriore)



BA

BI

BI

CA

CC

CC

DI

DI

FC

FI

LI

M

M

F

ELETTROTECNICA SPERIMENTALE

Dello stesso Autore:

ATLANTE SCHEMI IMPIANTI ELETTRICI

Tutti gli impianti industriali e domestici ad uso degli elettrotecnici, degli installatori, degli avvolgitori, dei progettisti, con speciale riguardo ai programmi ministeriali del 4° e 5° anno degli istituti tecnici industriali.

Modalità di esecuzione e schemi unifilari di principio di impianti interni, citofoni, portiere elettrico. Impianti per ascensori, schemi per la conversione della corrente, salvamotori, teleavviatori - Avvolgimenti a corrente continua e corrente alternata trifase - Trattazione e schemi di protezione contro le sovratensioni, protezioni differenziali e Buchholz - Apparecchi e trasformatori di misura, schemi di quadri, di centrali, di stazioni di trasformazione e conversione.

2ª edizione rifatta ed aumentata. 1959, libro-atlante in-4, di pagine XII-110, con oltre 100 schemi dettagliati e funzionali di facile comprensione e di pratica attuazione, in LXI tavole in nero e a colori L. 2000

Indispensabile per il montatore, il progettista e l'elettotecnico sia perito industriale che ingegnere. Redatto secondo i programmi ministeriali e quindi indispensabile per l'efficiente preparazione degli esami di stato.

In preparazione:

MACCHINE ELETTRICHE

Costituzione e teoria di generatori e motori a c. a. a. c. c. e dei raddrizzatori. Ad uso degli studenti del 5° anno degli istituti tecnici industriali; di consultazione per i tecnici che operano nei vari settori dell'industria elettrotecnica.

Trasformatori monofasi e trifasi, accoppiamenti in parallelo, autotrasformatori a corrente costante, riduttori di misura - Alternatori, avvolgimenti trifasi, motori sincroni - Motori e generatori asincroni, regolatori ad induzione - Dinamo, particolarità costruttive degli avvolgimenti in serie e parallelo - Motori a corrente continua - Metadinamo - Motori monofasi e trifasi a collettore - Raddrizzatori a semionda, mutatori a vapore di mercurio, convertitori a contatti.

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

Prof. Ing. GIUSEPPE BIASUTTI

ELETTROTECNICA SPERIMENTALE

TEORIA ELETTRONICA - FONTI DI ENERGIA - CORRENTE CONTINUA, SUOI EFFETTI E SUE LEGGI FONDAMENTALI - ELETTROSTATICA E CONDENSATORI - MAGNETISMO ED ELETTROMAGNETISMO - INDUZIONE ELETTROMAGNETICA - AZIONI MECCANICHE TRA CAMPI E CORRENTI - CORRENTI ALTERNATE MONOFASI E POLIFASI - CAMPO ROTANTE TRIFASE

Visione delle più attuali teorie con speciale riguardo ai programmi ministeriali degli Istituti tecnici industriali

203 illustrazioni



EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

1960

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge
nonchè a norma delle convenzioni internazionali
Copyright 1959, by Ulrico Hoepli, Milan



Printed in Italy

PREFAZIONE

Questa « Elettrotecnica sperimentale » conformata agli attuali sviluppi della scienza e della tecnica e che inquadra il programma d'insegnamento per il 4° anno degli Istituti tecnici industriali, persegue lo scopo di porgere allo studioso un mezzo facile per la comprensione ed il dominio dei principi fondamentali dell'elettrotecnica e ciò senza diminuire il rigore scientifico dell'insegnamento. Il corredo di cognizioni matematiche richiesto al lettore è molto ridotto in quanto viene ripreso e sviluppato ogni concetto matematico richiesto dalla sequenza dei capitoli.

Possa questo volume essere di utilità agli studenti ed a tutti coloro che si interessano di Elettrotecnica.

L'Autore

Udine, gennaio 1960.



INDICE

	Pag.
CAP. I - Elettricità - Generatori elettrici	1
<i>Teoria elettronica</i>	1
Corpi conduttori e corpi coibenti	4
Elettrizzazione dei corpi	5
Generatore elettrico	6
Fonti di energia	8
 CAP. II - Corrente continua e sue leggi fondamentali	11
Corrente elettrica	11
Circuito elettrico	11
Ordini di grandezza di tensioni ed intensità	13
Effetti della corrente elettrica	15
Resistenza elettrica	21
Legge di Ohm	21
Resistività (ρ)	23
Coefficiente di temperatura	25
Superconduttività	26
Principi di Kirchhoff	27
Raggruppamento delle resistenze	28
Unità di forza, di energia e di potenza elettrica	33
Legge di Joule	34
<i>Riscaldamento</i>	36
Densità di corrente ammissibile nei conduttori	37
Valvole fusibili	38
Corto circuito	39
L'energia e le sue trasformazioni (secondo la teoria classica)	45
Equivalenza dell'energia e della massa (secondo la teoria della relatività)	46

	Pag.
CAP. III - Pile ed accumulatori	49
<i>Pile</i>	49
<i>Accumulatori</i>	50
Accumulatori al piombo	53
Accumulatori Ironclad	54
Accumulatori al nichel	55
Capacità degli accumulatori	57
Rendimento degli accumulatori	57
Collegamento dei generatori elettrici	58
CAP. IV - Elettrostatica e condensatori	63
Condensatori	65
Collegamento dei condensatori	68
CAP. V - Magnetismo ed elettromagnetismo	71
L'elettrone orbitale	79
Corpi magnetici e diamagnetici	83
Intensità del campo magnetico	85
Flusso di induzione, induzione magnetica, permeabilità	86
Curve di magnetizzazione	88
Isteresi magnetica	90
Energia perduta per isteresi magnetica	93
Circuiti magnetici	94
Legge di Hopkinson	96
Applicazioni dell'effetto magnetico della corrente	97
CAP. VI - Induzione elettromagnetica	103
Mutua induzione	107
Autoinduzione	109
Correnti parassite o di Foucault	110
Rocchetto di Ruhmkorff	112
CAP. VII - Azioni meccaniche tra campi e correnti	115
Determinazione del verso delle forze	116
CAP. VIII - Misure elettriche	119
Sistema di misura « Giorgi »	119
Apparecchi di misura	121
CAP. IX - Corrente alternata	127
Generalità sulle grandezze alternate	127

	Pag.
Grandezze alternate sinusoidali	128
Concetto di « fase »	132
Somma e differenza di grandezze sinusoidali	133
Derivata di una funzione sinusoidale	135
Generazione di f.e.m. sinusoidali	136
<i>Circuiti percorsi da correnti alternate</i>	138
Circuiti con sola resistenza	139
Circuiti con sola induttanza	140
Circuiti con sola capacità	141
<i>Riepilogo</i>	143
Circuiti con resistenza, induttanza e capacità in serie	144
Circuiti mancanti di R , L oppure C	145
Circuiti in risonanza	148
<i>Conduttanza, suscettanza, ammettenza</i>	148
Circuiti composti	152
Potenza	156
Triangolo delle potenze	159
Rifasamento degli impianti monofasi	160
<i>Metodo simbolico</i>	163
Somma	164
Prodotto	164
Quoziente	166
Grandezze alternate non sinusoidali	167
Induttanza nel ferro	168
Perdite nel ferro	171
CAP. X - Sistemi polifasi	173
<i>Generalità</i>	173
Generazione dei sistemi polifasi	174
Sistemi trifasi	175
Collegamento a stella	177
Collegamento a triangolo	181
Sistemi bifasi	184
Sistemi esafasi	185
<i>Sistemi trifasi squilibrati</i>	186
Trasformazione di una stella di impedenze in un triangolo equivalente	189
Trasformazione di un triangolo di impedenze in una stella equivalente	189
<i>Potenza nei sistemi trifasi</i>	193

	Pag.
Misure di potenza in circuiti trifasi con neutro	193
Misure di potenza in circuiti trifasi senza neutro	194
Potenza reattiva	196
Fattore di potenza	197
Rifasamento degli impianti trifasi	197
<i>Campo magnetico rotante</i>	200
Campo rotante trifase	201
Campo rotante multipolare	202
Campi alternativi	205

CAPITOLO I

ELETTRICITÀ - GENERATORI ELETTRICI

TEORIA ELETTRONICA

È noto che le sostanze (siano esse semplici o composte) che costituiscono i corpi sono formate da *molecole* e che ogni molecola è composta da uno o più *atomi* (sono monoatomiche le molecole di quasi tutti i metalli).

I moderni mezzi di indagine hanno rivelato che l'atomo ⁽¹⁾ è costituito essenzialmente da particelle elementari cariche di elettricità di due specie: *positiva* e *negativa*.

Le particelle cariche di elettricità positiva sono state chiamate *protoni*, le particelle cariche di elettricità negativa *elettroni*. Queste particelle elementari che costituiscono l'atomo sono raggruppate in modo da formare un sistema planetario infinitamente piccolo con un nucleo al centro e degli elettroni che ruotano attorno ad esso su orbite giacenti in piani tra loro diversi (ved. fig. 1).

Il nucleo contiene tutta la carica positiva conferitagli dai protoni (e quasi tutta la massa atomica ⁽²⁾) cioè il peso dell'atomo) e pure contiene i *neutroni* che sono particelle di massa uguale a quella dei protoni, prive di carica elettrica e conseguentemente di comportamento neutro, da ciò il loro nome.

⁽¹⁾ Le prime cognizioni sulle attuali vedute relative alla struttura dell'atomo si devono a Lord Rutherford (1911). Anteriormente l'atomo veniva semplicemente considerato come l'ultima indivisibile particella della materia (*atomos* significa, in greco, indivisibile).

⁽²⁾ Infatti è trascurabile la massa dell'elettrone che è 1850 volte minore della massa di un protone, cioè circa 0,0005.

Gli elettroni rotanti attorno al nucleo a distanze tra loro diverse, perchè vari sono i rispettivi raggi delle orbite elettroniche, possono for-

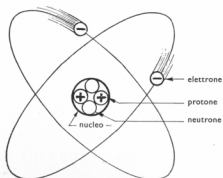


Fig. 1 - Modello di struttura atomica.

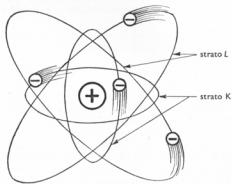


Fig. 2 - Orbite elettroniche.

mare più strati attorno al nucleo. Questi diversi strati concentrici (in ogni strato possono aversi uno o più elettroni) vengono distinti, rispettivamente, con una lettera: dalla *K* alla *Q* ⁽¹⁾ (ved. fig. 2).

⁽¹⁾ Ogni strato contiene un determinato numero massimo di elettroni: lo strato *K*, il più interno, contiene al massimo due elettroni, lo strato *L* contiene

Il diverso numero dei protoni (*numero atomico*), uguale al numero degli elettroni planetari, determina i vari atomi costituenti ogni corpo semplice (*elemento*) e definisce le proprietà fisiche e chimiche del rispettivo elemento.

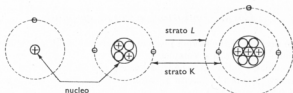


Fig. 3 - H.

Fig. 4 - He.

Fig. 5 - Li.

Modelli degli atomi di idrogeno (H), elio (He), litio (Li).

L'atomo dell'idrogeno (simbolo chimico H), il più leggero, consta di un nucleo positivo costituito da un solo protone (invece i nuclei di tutti gli altri atomi contengono anche i neutroni) e di un elettrone planetario nello strato *K* (ved. fig. 3), l'atomo dell'elio (simbolo chimico He) consta di un nucleo positivo (nucleo costituito da 2 protoni e 2 neutroni) e di 2 elettroni planetari nello strato *K* (vedere fig. 4), l'atomo del litio (Li) di un nucleo positivo (nucleo costituito da 3 protoni e 4 neutroni) e di 3 elettroni planetari: 2 nello strato *K* ed 1 in *L* (ved. fig. 5), l'atomo dell'alluminio (Al) di un nucleo positivo e di 13 elettroni planetari, l'atomo del rame (Cu) di un nucleo positivo e di 29 elettroni planetari, l'atomo dell'uranio di un nucleo positivo e 92 elettroni planetari, esso è l'ultimo della serie naturale ed è il più pesante e complesso.

Seguono gli elementi *transuranici*, poco più di una decina, di recente scoperta, ottenuti « bombardando » i nuclei di alcuni elementi naturali a mezzo di neutroni e di particelle α (ioni di elio: He^{++}).

Dall'associazione degli atomi si formano le molecole degli innumerevoli corpi composti (ved. fig. 6). Dunque la materia, nonostante le sue



Fig. 6 - Molecola dell'acqua (H_2O). Corpo composto, formato da due atomi di H ed uno di O.

al massimo 8 elettroni, lo strato *M*, 18; lo strato *N*, 32; lo strato *O*, 18; lo strato *P*, 13; lo strato *Q*, 1.

svariate proprietà ed i suoi multiformi aspetti, è unica nell'intima essenza: ha struttura granulare ed è costituita fondamentalmente da particelle elementari cariche di elettricità positiva e negativa.

Corpi conduttori e corpi coibenti.

Si è detto che gli elettroni possono formare più strati concentrici. La formazione degli strati è complessa.

Accenniamo solamente che proseguendo nell'analisi dei vari elementi per numero atomico crescente si verifica che lo strato elettronico più esterno (*strato periferico*) può avere al massimo 8 elettroni, ad eccezione dello strato *K* che può contenerne, al massimo, due (He). Solamente gli strati interni possono contenere un numero maggiore di 8 elettroni.

Dunque lo strato periferico può contenere da 1 ad 8 elettroni.

La teoria chimica ci dà conoscenza che gli atomi con meno di 4 elettroni (1, 2, oppure 3) sullo strato periferico costituiscono la classe dei *metalli* mentre gli atomi con più di 4 elettroni (5, 6 oppure 7) circolanti su detto strato periferico formano la classe dei *metalloidi*.

Gli atomi con strato periferico completo, ad 8 elettroni, formano la classe dei *gas rari*: elio, neon, argon, kripton, xeno, radom.

Inoltre (teoria *elettronica della valenza*) gli atomi dei metalli tendono a perdere gli elettroni dello strato periferico (da ciò il nome di *elettroni liberi* dato a questi elettroni) e gli atomi dei metalloidi ad acquistarne (¹).

I metalli che hanno elettroni liberi costituiscono la classe dei *corpi conduttori*. Questi corpi si chiamano conduttori perchè permettono lo spostamento, lungo essi, degli elettroni liberi. I metalloidi, privi di elettroni liberi, costituiscono la classe dei *corpi isolanti* o *coibenti*. Nei metalloidi gli elettroni sono stabilmente vincolati al nucleo, di conseguenza non può aversi apprezzabile movimento di elettroni lungo questi corpi.

Da notare che non esistono corpi perfettamente conduttori o corpi perfettamente isolanti e che il numero degli elettroni liberi in un corpo conduttore è enorme perchè dello stesso ordine, o maggiore, del numero dei suoi atomi.

(¹) Ciò avviene perchè ogni atomo tende alla configurazione stabile di 8 elettroni nello strato periferico. Es. la formazione della molecola dell' H_2O (ved. fig. 6) i cui due elettroni dell'H, inserendosi nello strato *L* (a 6 elettroni) dell'O, lo completano rendendolo stabile.

Elettrizzazione dei corpi.

In un atomo (se in condizioni di equilibrio) il numero degli elettroni è uguale al numero dei protoni e siccome la carica negativa di un elettrone è uguale, in valore assoluto, alla carica positiva di un protone ne deriva che l'atomo integro è un insieme elettricamente neutro (ved. fig. 7).

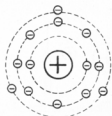


Fig. 7 - Atomo di Al allo stato neutro.

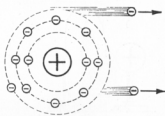


Fig. 8 - Atomo di Al elettrizzato positivamente (per la perdita di due elettroni liberi).

Se però l'atomo perde qualche elettrone libero (ved. fig. 8) rivela una carica di elettricità positiva equivalente ai protoni che vengono a risultare eccedenti.

Il mezzo più elementare per provocare questi fenomeni lo otteniamo col noto processo di elettrizzazione per strofinio.

Se strofiniamo una bacchetta di vetro con della lana (ved. fig. 9) otteniamo che un certo numero di elettroni passa dalla bacchetta di vetro alla lana: il vetro rimane perciò elettrizzato positivamente.

Se invece strofiniamo una bacchetta di ambra gialla⁽¹⁾ con la lana si ha il processo inverso e l'ambra rimane elettrizzata negativamente.

Mediante questo processo si è ottenuta una separazione di cariche



Fig. 9 - Elettrizzazione di due corpi per strofinio: « triboelettricità ».

(¹) Fu Talete di Mileto, filosofo greco, a scoprire nel V secolo a. C. il fatto che l'ambra strofinata acquistava la proprietà di attirare a distanza corpi leggeri. Dal nome dell'ambra (in greco *electron*) deriva il nome di elettricità.

elettriche: « tutte le volte che si separano cariche di nome opposto nascono delle *forze elettriche* ».

Queste forze elettriche tendono a far recuperare all'atomo le cariche elettriche ad esso mancanti.

Hanno così origine le azioni a distanza:

« cariche elettriche di nome contrario si attirano (ved. fig. 10 a) » e cariche elettriche dello stesso nome si respingono (ved. fig. 10 b).

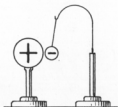


Fig. 10 a - « Attrazione » tra cariche elettriche di nome contrario.

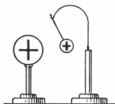


Fig. 10 b - « Repulsione » tra cariche elettriche dello stesso nome.

Generatore elettrico.

Si chiama *generatore elettrico* un qualunque apparato capace di suscitare forze interne atte a svincolare gli elettroni liberi dall'attrazione del nucleo ed a dislocarli, nel senso della forza, lungo il conduttore interno al generatore.

Le estremità di questo conduttore fanno capo a due *morsetti* o *poli* esterni al generatore.

Il morsetto verso il quale vengono sospinte le cariche elettriche negative (dove dunque si addensano gli elettroni) si chiama *polo negativo* (-).

Il morsetto opposto dove prevalgono, conseguentemente, le cariche positive (uguali, in valore, alle cariche negative) costituisce il *polo positivo* (+).

Le forze interne compiono un lavoro per dislocare gli elettroni verso il polo negativo (ved. fig. 11).

Il lavoro da esse compiuto per dislocare la carica unitaria dal polo positivo al negativo contrastata dal lavoro resistente delle forze elettriche, si chiama *forza elettromotrice* ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Dato che la forza elettromotrice rappresenta un lavoro e non le forze interne del generatore, si conclude che la dizione *forza elettromotrice* contrasta con il significato che comunemente si dà alle forze.

Il lavoro assorbito da queste forze elettriche, dovuto all'azione di verso concorde delle due polarità sull'unità di carica in movimento, lavoro che può essere restituito all'esterno del generatore su un utilizzatore elettrico (es. lampadina, ferro da stiro, ecc.) si chiama *tensione elettrica*.

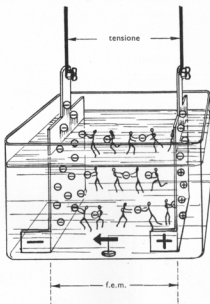


Fig. 11 - Generazione di f.e.m. nella pila.

La tensione elettrica si identifica con la *differenza di potenziale* (d. d. p.) esistente ai due morsetti del generatore essendo il potenziale di un punto il lavoro motore o resistente che le forze elettriche fanno od assorbono quando l'unità di carica passa dal punto considerato alla terra il cui potenziale è praticamente costante perchè il suo stato elettrico rimane invariato comunque grandi siano i fenomeni elettrici che in essa hanno luogo.

L'unità di misura delle forze elettromotrici (e con esse delle tensioni e delle d. d. p. che hanno le stesse dimensioni) è il *volt* (V) che è una ten-

sione pari a $\frac{1}{1,0186}$ della forza elettromotrice (f.e.m.) dell'elemento Weston, assunto come campione al Congresso internazionale di Chicago (1893).

L'apparecchio che misura le tensioni si chiama *voltmetro*. Per misurare la tensione di un generatore o la tensione applicata ad una linea si collegano i due morsetti del voltmetro ai poli del generatore o tra i due fili della linea.

Fonti di energia.

I generatori elettrici sono dunque sistemi atti a produrre f.e.m. Essi convertono in energia elettrica (si ottiene energia elettrica quando si separano cariche elettriche di nome contrario) altre forme di energia: chimica, meccanica, ecc.

Termoelettricità.

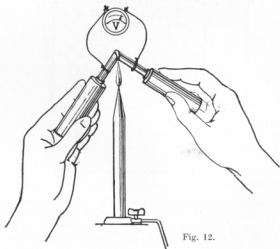


Fig. 12.

Due metalli diversi siano saldati ad una loro estremità. Riscaldando il punto di saldatura si genera una debole f.e.m. dell'ordine dei millivolt. Su questo principio sono fondate le coppie termoelettriche (es. platino, iridio) atte a misurare le alte temperature dei forni.

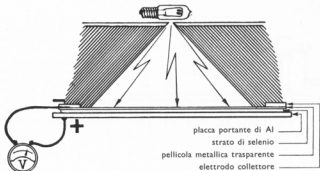
Fotoelettricità.

Fig. 13.

Nella cella fotoelettrica si origina una f.e.m. di contatto (dell'ordine dei decimi di volt) quando un raggio di luce colpisce la cella fotoelettrica. La luce agendo sulla cella la carica perchè espelle elettroni (separa, dunque, gli elettroni dai protoni). Il fenomeno è localizzato presso il contatto tra lo strato di selenio e la pellicola metallica trasparente. La cella fotoelettrica si comporta, sotto l'azione della luce, come la coppia termoelettrica sotto l'azione del calore.

Azione chimica.

Due metalli diversi immersi in acqua acidulata danno luogo ad una f.e.m. (principio della *pila*). Nella pila voltaica costituita da due piastre di Cu e Zn, rispettivamente, immerse in acido solforico diluito, si rende disponibile, ai suoi morsetti, una tensione di circa 1 V.

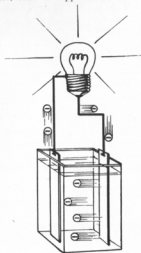


Fig. 14.

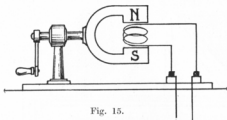
Induzione elettromagnetica.

Fig. 15.

È il fenomeno più importante. Con la rotazione della calamita (campo induttore) si genera ai capi della bobina fissa (avvolgimento indotto) una f.e.m. Su questo principio si basa il funzionamento dei generatori elettromagnetici (es. alternatori) che trasformano la energia meccanica in energia elettrica.

Qualsiasi generatore elettrico (pile, alternatori, ecc.) non genera elettroni il cui numero è costante ed invariabile nell'universo (l'elettricità esiste in Natura, è l'elemento costitutivo della materia) ma semplicemente fa acquisire all'elettrone un'energia potenziale capace di compiere un lavoro separandolo dai protoni.

CAPITOLO II

**CORRENTE CONTINUA E SUE LEGGI
FONDAMENTALI**

Corrente elettrica.

Se applichiamo una d.d.p. agli estremi di un corpo conduttore, gli elettroni liberi verranno sospinti lungo il conduttore dalle forze elettriche determinate da detta d.d.p. con velocità ad esse proporzionale.

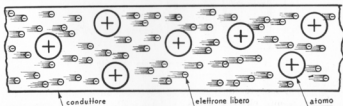


Fig. 16 - Corrente elettrica.

Questo intenso e veloce spostamento di elettroni, questo flusso elettronico, costituisce la *corrente elettrica* nel conduttore (ved. fig. 16).

« La corrente elettrica è, dunque, un movimento d'insieme di elettroni liberi che scorrono lungo un conduttore in una determinata direzione e verso ».

Circuito elettrico.

Mediante un conduttore si colleghino i poli di una pila con una lampadina (ved. fig. 17).

La continuità metallica costituita dal conduttore e dal filamento della lampadina si chiama: *circuito elettrico esterno*.

Causa la d.d.p., o tensione, applicata agli estremi di questo circuito esterno, ha origine in esso una corrente elettrica, un continuo spostamento di elettroni dal polo negativo al polo positivo.

Queste cariche elettriche negative che arrivano al morsetto positivo vengono riportate (entro la pila) al morsetto negativo attraverso la soluzione conduttrice (mentre nei generatori elettromagnetici vengono riportate al rispettivo morsetto lungo l'avvolgimento indotto, ved. fig. 15).

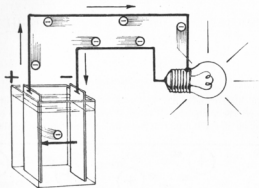


Fig. 17 - Verso convenzionale della corrente elettrica.

Abbiamo sempre, quando circola corrente, un circuito chiuso formato dal circuito elettrico esterno e dal circuito interno al generatore.

Dunque il verso reale della corrente elettrica, nel conduttore esterno, è diretto dal polo negativo al positivo per il fatto che gli elettroni sono negativi (ved. fig. 17).

« Però, per convenzione, si ammette che nel circuito elettrico esterno la corrente circoli nel verso opposto, cioè dal polo positivo al negativo come se si muovessero i protoni anziché gli elettroni e naturalmente nel verso contrario all'effettivo movimento degli elettroni »⁽¹⁾.

Nel circuito elettrico interno al generatore la corrente segue il percorso convenzionale: dal polo negativo al positivo.

⁽¹⁾ Questa convenzione è dovuta al fatto che il verso della corrente elettrica venne stabilito prima di conoscere la struttura elettronica della materia.

Unità di intensità di corrente.

Si definisce *intensità di corrente elettrica* che percorre un circuito, la quantità di elettricità, espressa in *coulomb* ⁽¹⁾, che attraversa ogni sezione del circuito nell'unità di tempo:

$$I = \frac{Q}{t}$$

L'intensità di corrente si esprime in *ampere* (*I*). Così definita l'intensità di corrente, viene di conseguenza determinata l'intensità unitaria ponendo $Q = 1$ coulomb e $t = 1$ secondo.

« In un circuito circola l'intensità di corrente unitaria quando ogni sua sezione è attraversata da 1 coulomb in 1 secondo:

$$1 \text{ ampere} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ secondo}}$$

Per misurare l'intensità di corrente che percorre un circuito elettrico si inserisce in esso un apparecchio di misura chiamato *amperometro* il cui funzionamento è basato sul fatto che le correnti elettriche si rivelano attraverso effetti diversi (ved. pag. 15) che danno modo di misurarle.

Ordini di grandezza di tensioni ed intensità.**Tensioni.**

Tensioni dell'ordine di grandezza di 1 V si misurano fra i morsetti delle pile elettriche e dell'ordine di 2 V ai morsetti degli accumulatori al piombo.

Di poche unità di volt (4 ÷ 8 V) è la tensione ai morsetti di una dinamo da bicicletta.

Di qualche centinaio di volt (220 V) è il valore dell'attuale tensione unificata nei nostri impianti di illuminazione casalinga.

⁽¹⁾ Per ottenere un coulomb (unità di misura della carica elettrica) occorre la carica elettrica contenuta in $6,22 \cdot 10^{18}$ elettroni (circa sei miliardi di miliardi di elettroni).

Deduciamo che la carica elettrica elementare negativa dell'elettrone è:

$$\frac{1}{6,22} \cdot 10^{-18} \text{ coulomb}$$

cioè:

$$0,16 \cdot 10^{-18} \text{ coulomb}; \quad (0,000000000000000016 \text{ coulomb})$$

Con migliaia di volt (es. 15 000 V) vengono alimentate le « cabine » sistemate entro le città per distribuire a bassa tensione (220 e 380 V) l'energia agli utenti luce e forza.

Tensioni dell'ordine di grandezza di decine di migliaia di volt (65 000 ÷ 220 000 V) si hanno tra i conduttori delle linee di trasmissione che trasportano l'energia elettrica dalle lontane centrali idroelettriche alle « stazioni di trasformazione » ubicate alla periferia delle città.

Intensità di corrente.

Dell'ordine dei milliamperes (mA, 1 milliamperes = 1 millesimo di ampere) sono le correnti che il nostro organismo comincia a percepire.

Correnti dell'ordine di decimi di ampere percorrono il filamento di tungsteno delle usuali lampadine ad incandescenza.

SEGNI GRAFICI PER IMPIANTI D'ENERGIA (C.E.I.)			
Pila od accumulatore		Lampada elettrica	
Batteria di accumulatori con inseritore		Valvola fusibile	
Generatore a c.c.		Interruttore	
Voltmetro		Resistenza ohmica	
Amperometro		Trasformatore monofase	

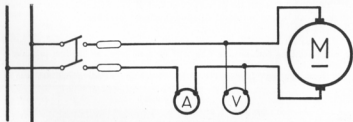


Fig. 18 - Esempio di un circuito elettrico con amperometro inserito e voltmetro derivato.

Correnti dell'intensità di qualche ampere percorrono le resistenze al nichel-cromo dei ferri da stiro.

Correnti di qualche centinaio di ampere costituiscono all'incirca le intensità di corrente che alimentano i motori elettrici delle tramvie urbane.

Effetti della corrente elettrica.

Colleghiamo i morsetti di una batteria di pile con un sottile filo metallico. Il conduttore è sede di una corrente elettrica che si manifesta attraverso i suoi effetti:

Effetto termico.

Il filo si riscalda.

Effetto magnetico.

Gli elettroni in movimento lungo un corpo conduttore danno sempre origine a dei fenomeni magnetici nello spazio circostante al conduttore.

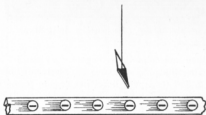


Fig. 19 - Effetto magnetico della corrente elettrica.

Es.: la deviazione dell'ago di una bussola che tende a disporsi normalmente al conduttore percorso da corrente (ved. fig. 19).

Effetto fisiologico.

Sentiamo questo effetto se ad es. tocchiamo con le mani i poli di una batteria di pile così da chiudere il circuito attraverso il nostro corpo che, di conseguenza, verrà attraversato da una corrente.

Effetto elettrochimico.

Secondo la teoria enunciata nel 1887 dallo scienziato svedese Arrhenius, in certe sostanze disciolte in acqua od allo stato fuso, si rallentano i legami che uniscono le parti costituenti le molecole (atomi o gruppi atomici) per cui una frazione di queste si dissocia spontaneamente. Il fenomeno si chiama *dissociazione elettrolitica* e le sostanze (acidi come H_2SO_4 , basi come KOH, sali come NaCl) capaci di dare *ioni* ⁽¹⁾ si chiamano *elettroliti*.

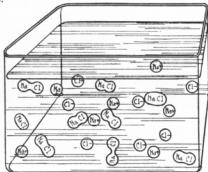


Fig. 20 a - Dissociazione elettrolitica.

Dalla scissione molecolare si ottengono *ioni positivi* o *cationi* (atomi di metalli o di idrogeno privi di uno o più elettroni) liberi nel liquido, e *ioni negativi* o *anioni* (essi pure liberi nel liquido formati dalla restante parte delle molecole dissociate (metalloidi e residui acidi) dotati di cariche elettriche negative perchè arricchiti dagli elettroni mancanti agli ioni positivi).

⁽¹⁾ Nella dissociazione elettrolitica una delle due parti della molecola dissociata acquista o perde uno o più elettroni quanti ne cede o si appropria la parte restante della molecola. Ciascuna di queste due parti dissociate si chiama *ione*. Gli ioni sono dunque atomi (o gruppi atomici) arricchiti od impoveriti di elettroni.

Un ione si dice *monovalente* se ha una sola carica elettrica, positiva o negativa, dovuta alla perdita od all'acquisto di un elettrone, *bivalente* se ha due cariche elettriche, ecc.

Il numero degli ioni dipende dalla natura della sostanza disciolta, dalla sua concentrazione, dalla temperatura della soluzione nonchè dalla presenza di altre sostanze.

Se dunque sciogliamo del sale da cucina (NaCl) in acqua, si formeranno, nel liquido, cationi monovalenti (Na^+) ed anioni monovalenti (Cl^-), ved. fig. 20 a, oppure se vi sciogliamo del solfato di rame (CuSO_4) si formeranno cationi bivalenti (Cu^{++}) ed anioni bivalenti (SO_4^{--}) secondo lo schema di decomposizione:



Le frecce a senso opposto indicano che le reazioni sono reversibili.

La soluzione rimane elettricamente neutra perchè la somma algebrica delle cariche positive e negative possedute dagli ioni è nulla.

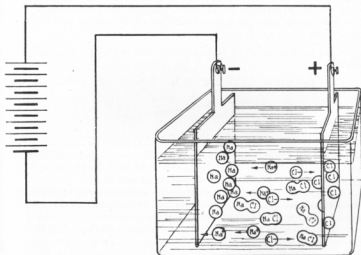


Fig. 20 b - Elettrolisi.

Dunque il fenomeno della dissociazione elettrolitica avviene senza passaggio di corrente elettrica.

Immergiamo nell'elettrolito due piastre (elettrodi) collegate ai poli di una sorgente di elettricità: gli ioni positivi emigreranno verso la lastra negativa (cátodo) mentre gli ioni negativi verranno attratti dall'elettrodo positivo (ánodo), ved. fig. 20 b; è questo il fenomeno dell'elettrolisi.

Gli anioni giunti al polo positivo cedono a questo le loro cariche negative (di conseguenza nel circuito esterno si ha un fluire di elettroni dall'anodo al catodo ossia un passaggio di elettricità) mentre i cationi acquistano al polo negativo (catodo) le cariche negative (elettroni) necessarie a neutralizzare le loro cariche positive.

Nella soluzione elettrolitica la corrente elettrica viene trasportata dagli ioni migranti ai due poli e quindi il passaggio della corrente avviene con trasporto di materia verso gli elettrodi.

La differenza sostanziale tra le correnti elettrolitiche e le correnti nei conduttori consiste nel fatto che negli elettroliti si ha un trasporto di materia (e movimento nei due sensi delle cariche) mentre invece nei conduttori si muovono solo gli elettroni liberi e senza trasporto di materia (infatti gli elettroni hanno massa praticamente trascurabile).

Sull'esposto principio si basa l'industria elettrochimica nelle sue svariate applicazioni quali:

a) la deposizione di metalli sopra altri (*galvanoplastica, galvanostegia*);

b) l'estrazione dei metalli dai loro minerali e la raffinazione dei metalli.

Galvanoplastica.

Serve a riprodurre un oggetto di un certo spessore (es. una medaglia), per mezzo del deposito metallico (rame od altro metallo, deposito ottenuto per via elettrolitica) su un'impronta non metallica (calco su gesso, ecc.) resa conduttrice spalmandola con polvere di grafite.

L'impronta così preparata si immerge in una soluzione concentrata dell'elettrolito e si collega al catodo: con il processo dell'elettrolisi si ricoprirà di uno strato uniforme del metallo prescelto.

Il catodo è formato da un blocco di detto metallo.

Galvanostegia.

Consiste nel ricoprire un metallo comune, ossidabile, con un sottilissimo strato di metallo più pregiato non ossidabile (nichelatura, cromatura, argentatura, doratura, ecc.) a scopo di protezione e decorazione.

Lo spessore della pellicola metallica va dai millesimi ai decimi di millimetro.

Per nichelare un oggetto metallico, es. i cerchioni da bicicletta, si adopera come bagno una soluzione acida di solfato di nichel.

Catodo: piastre di nichel puro.

Il tutto immerso in una vasca generalmente di legno (larice, pitchpine) fasciata internamente (ad es. con una lastra di piombo), ved. fig. 21.

L'elettrolisi farà rivestire di un velo di nichel i cerchioni. Nelle operazioni di galvanostegia gli oggetti da galvanizzare (previamente puliti e sgrassati) devono sempre trovarsi in mezzo a due piastre con funzione da catodo in modo che il deposito avvenga su entrambe le facce dell'oggetto.

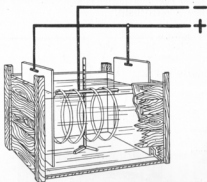


Fig. 21 - « Galvanostegia ». Nichelatura dei cerchioni da bicicletta.

Raffinazione elettrolitica del rame.

L'anodo è costituito da un blocco di rame greggio (97 ÷ 98% di Cu), il catodo da una sottile lastra di rame puro, immersi in una soluzione acida di solfato di rame (CuSO_4) nella quale si trovano, liberi nel liquido (dissociazione elettrolitica), ioni Cu^{++} (cationi) e ioni SO_4^{--} (anioni).

Al passaggio della corrente elettrica il radicale SO_4^{--} attratto dall'anodo, cede a questi le sue cariche negative e quindi reagisce con il rame (di cui è costituito l'anodo) ripristinando nella soluzione le molecole del CuSO_4 .

Al catodo migrano gli ioni Cu^{++} i quali, assumendo due cariche negative (elettroni) si depositano sul catodo come rame metallico. Il rame che così si ottiene è molto puro (99,99%) e viene chiamato *rame elettrolitico*.

Estrazione dell'alluminio.

(Ottenuto da un composto fuso cioè per *via secca*).

Si parte dall'allumina (ossido di alluminio puro) ricavata dal minerale bauxite (sesquiossido idrato impuro di alluminio).

L'allumina si scioglie nella criolite (fluoruro doppio di Al e Na : $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$) in ragione del 10 ÷ 20%.

Il composto che si dissocia e conduce la corrente è l' AlF_3 . Semplicemente si può dire che lo ione Al^{+++} si scarica al catodo mentre il fluoro, che si forma all'anodo, reagisce con l'allumina per riformare il fluoruro di alluminio.

Questo processo continua finchè la concentrazione dell'allumina si mantiene superiore a certi limiti.

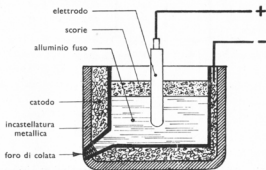


Fig. 22 - Estrazione dell'alluminio.

L'elettrolisi si pratica sul bagno fuso in celle elettrolitiche chiamate impropriamente forni. La temperatura del bagno di criolite ed allumina si mantiene sui 1000 °C.

Per anodo viene adoperato un grosso elettrodo di carbone immerso nella massa fusa.

Le celle possono essere ad anodi multipli costituiti da blocchi rettangolari di carbone artificiale.

Nel fondo della cella (rivestita da un impasto formato da polvere di carbone coke, pece e catrame e che costituisce il catodo, ved. fig. 22) si raccoglie l'alluminio puro che viene spillato ogni due o tre giorni per formare lingotti.

La corrente elettrica serve sia come mezzo riscaldante (l'effetto joule fonde il miscuglio) sia come mezzo elettrolitizzante.

Resistenza elettrica.

Si è accennato che la corrente elettrica è costituita da un flusso di elettroni liberi che sospinti da una d.d.p. procedono attraverso la complessa configurazione degli spazi interatomici del conduttore (ved. fig. 16).

Gli elettroni, nel loro movimento, urtano contro gli atomi supposti fissi (le molecole e gli atomi che le formano sono invece dotati di un loro movimento vibratorio: di una agitazione termica); queste forze di attrito frenano, ostacolano l'avanzare degli elettroni obbligati a percorrere, di conseguenza, una tortuosa traiettoria. Questa opposizione, questo freno al deflusso degli elettroni liberi in seno ai conduttori si chiama *resistenza* e si indica con il simbolo R .

Ogni metallo presenta una particolare struttura dell'edificio atomico, di conseguenza sarà diversa da metallo a metallo la resistenza che ogni conduttore oppone al passaggio della corrente elettrica.

LEGGE DI OHM ⁽¹⁾

A mezzo di una batteria di pile ⁽²⁾ si applichi una tensione ai morsetti M , N della resistenza R che così verrà percorsa da una corrente di intensità I (ved. fig. 23).

L'esperienza ci insegna che se variamo il valore della tensione applicata agli estremi di un conduttore, varia proporzionalmente l'intensità della corrente elettrica circolante nel conduttore stesso.

Variamo il valore della tensione applicata alla resistenza R , misurata dal voltmetro V derivato dagli estremi MN della resistenza, con l'includere o l'escludere alcuni elementi costituenti la batteria e ciò mediante la manovra dell'inseritore semplice S . Varierà, di conseguenza, l'intensità della corrente circolante misurata dall'amperometro A in serie nel circuito.

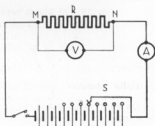


Fig. 23 - Dimostrazione della legge di Ohm.

⁽¹⁾ Georg Ohm, fisico tedesco, (1789-1854).

⁽²⁾ Più pile collegate in serie formano una batteria.

Si ottiene, ai morsetti della batteria, una d.d.p. che è somma delle tensioni esistenti ai poli delle singole pile collegate in serie.

Notiamo che i singoli rapporti $\frac{V}{I}$ tra i valori della tensione applicata e le corrispondenti intensità di corrente rimangono costanti.

Legge di Ohm: per un dato conduttore, ad una data temperatura, il rapporto tra la tensione applicata ai suoi estremi e l'intensità della corrente che lo percorre è costante.

Il quoziente $\frac{\text{volt}}{\text{ampere}}$ esprime la resistenza R del conduttore considerato: $\frac{V}{I} = R$ che si misura in ohm e si indica con la lettera greca Ω (omèga). L'unità di misura dell'ohm è determinata dal rapporto $\frac{V}{I} = R$ perchè sono già state fissate le unità di misura della tensione V e dell'intensità di corrente I .

Poniamo $V = 1$ V ed $I = 1$ A, ⁽¹⁾ otteniamo: $R = 1 \Omega$.

« L'unità di misura dell'ohm è data dalla resistenza esistente fra due sezioni di un conduttore quando applicando la d.d.p. di 1 V tra le due sezioni considerate, vi circola l'intensità di corrente di 1 A ».

Per farsi un concetto del valore dell'unità di misura dell'ohm, sono necessari:

m 58	di filo di rame elettrolitico	sezione 1 mm ²		
» 28	»	alluminio	»	»
» 2,3	»	manganina	»	»
» 1	»	nicel-cromo	»	»

per ottenere appunto la resistenza del valore di un ohm.

Dalla relazione $\frac{V}{I} = R$ otteniamo $\frac{V}{I} = I$ come pure $V = R I$.

Queste tre uguaglianze ci danno la possibilità di calcolare una delle tre grandezze quando sono note le altre due.

L'espressione $V = R I$ ci dice che la tensione applicata al circuito uguaglia il lavoro resistente fatto dalla forza che contrasta il movimento

(1) Nell'espressione $V = 1$ V la prima V rappresenta il simbolo della grandezza (tensione), la seconda V preceduta dal numero, l'unità di misura (volt). Per cui l'espressione, ad es., $V = 5$ V si legge « tensione = 5 volt » e l'espressione $I = 2$ A si legge « intensità di corrente = 2 ampere », ecc. Da notare che i nomi delle unità di misura, se scritti per esteso, vanno scritti con lettera iniziale minuscola (per quanto si riferiscano a nomi propri) es. volt, ampere, ohm, ecc., ma con lettera maiuscola se abbreviati (es. V, A, Ω , ecc.). Ed inoltre i nomi delle unità di misura sono indeclinabili (es. volt e non « volts ») e se scritti abbreviati non vanno seguiti dal punto (es. V e non V.).

delle cariche lungo il conduttore costituente il circuito, forza che nasce dagli urti e dagli attriti degli elettroni in movimento e che, ovviamente, è proporzionale al valore della resistenza R ed alla velocità di movimento degli elettroni liberi (intensità di corrente).

Il prodotto $R I$, uguale al valore della tensione applicata, viene comunemente chiamato *caduta di tensione* o *caduta ohmica* (1).

Resistività (ρ).

Nel circuito di fig. 24 (alimentato a tensione costante) si inseriscano ordinatamente, fra i morsetti $M N$, dei fili metallici:

a) di lunghezze diverse ma di uguale sezione e costituiti dallo stesso materiale: dal rapporto $\frac{V}{I}$ relativo alle diverse lunghezze deduciamo che la resistenza varia in ragione diretta della lunghezza del conduttore (a parità di sezione);

b) di sezioni diverse ma di uguale lunghezza e dello stesso materiale: dal rapporto $\frac{V}{I}$ relativo alle diverse sezioni concludiamo che la resistenza varia in ragione inversa della sezione del conduttore (a parità di lunghezza);

c) applichiamo successivamente fra i morsetti $M N$ dei fili metallici costituiti da diverso materiale (rame, alluminio, ferro, ecc.) ma tutti della medesima lunghezza e sezione: constateremo che la resistenza a parità di lunghezza e sezione è anche funzione del materiale di cui è formato il conduttore.

Indichiamo con la lettera greca ρ (leggere rò) questa sua dipendenza.

Se si esprime la lunghezza (l) del conduttore in metri e la sua sezione (s) in mm^2 , si può, dunque, impostare la seguente equazione:

$$R = \rho \frac{l}{s} \text{ ohm}$$

in cui ρ esprime la *resistenza specifica* o *resistività*.

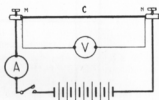


Fig. 24 - Misura di resistenze
(C conduttore in prova).

(1) Effettivamente la caduta ohmica, lavoro resistente fatto dalle forze contrastanti, si dovrebbe indicare con $-R I$ e dire che $R I$ equilibra la caduta ohmica.

ρ è una costante fisica dipendente dalla natura del materiale, $\rho = Rl/s = R \frac{s}{l}$ ed indica la resistenza di uno spezzone di filo di un dato materiale avente sezione unitaria (1 mm^2) e lunghezza unitaria (1 m).

Il suo valore espresso in ohm $\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ e riferito alla temperatura di 20°C , è dato dai manuali.

Es. rame $\rho = 0,017$;

alluminio $\rho = 0,03$

ferro $\rho = 0,1$

nicel-cromo $\rho = 1$

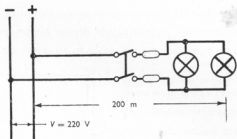


Fig. 25.

Esercizio. (Cadute di tensione). Si abbia una linea in filo di rame della sezione di $1,6 \text{ mm}^2$ che alimenta un gruppo di lampadine distante m 200 dalla linea principale a 220 V (ved. fig. 25). Il gruppo delle lampadine assorbe una intensità di corrente di 1,3 A. La lunghezza della linea (andata e ritorno) è pertanto di 400 m.

$$\text{Resistenza della linea } R = \rho \frac{l}{s} = 0,017 \frac{400}{1,6} \text{ ohm} = 4,25 \text{ ohm}$$

Caduta di tensione V_e in linea:

$$V_e = RI = 4,25 \times 1,3 = 5,5 \text{ volt}$$

Valore della tensione di alimentazione alle lampadine:

$$V_l = V - V_e = 220 - 5,5 = 214,5 \text{ volt}$$

Caduta percentuale di tensione in linea:

$$V_e \% = 2,5\%$$

La caduta massima di tensione (differenza tra la tensione a vuoto e la tensione che si stabilisce in ciascun punto dell'impianto quando sono inseriti tutti gli apparecchi utilizzatori suscettibili di funzionare contemporaneamente) non deve superare il 4% della tensione a vuoto per circuito di illuminazione e misti ed il 6% per gli altri circuiti quando la tensione all'inizio della parte d'impianto sotto misura rimanga costante (Norme C.E.I. per gli impianti elettrici negli edifici civili. Supplemento 139 anno 1958).

Coefficiente di temperatura.

Ci è noto dalla fisica che se riscaldiamo un metallo aumenta l'ampiezza di vibrazione degli atomi che lo costituiscono. Questa agitazione termica più attiva che a temperatura normale interferisce maggiormente lo spostamento degli elettroni liberi sospinti lungo il corpo conduttore dalle forze elettriche.

Aumenta quindi, in funzione diretta della temperatura, la resistenza elettrica R del conduttore.

Indichiamo con α ⁽¹⁾ (*coefficiente di temperatura*) la variazione di resistenza che subisce un conduttore di 1 ohm di resistenza iniziale se la sua temperatura aumenta, o diminuisce, di 1 °C.

Per un conduttore di R ohm di resistenza sarà perciò $R\alpha$ la variazione della sua resistenza all'incremento di 1 °C ed $R\alpha t$ la variazione totale per l'incremento di t °C (ad es. se passiamo da 0 °C a t °C. In questo caso indicheremo con R_0 la resistenza del conduttore considerato a 0 °C).

Sommiamo alla resistenza iniziale R_0 questo incremento $R\alpha t$ di resistenza, otterremo la resistenza $R_t = R_0 + R_0\alpha t$ del conduttore a t °C:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

Per i metalli puri il coefficiente di temperatura α è prossimo a 0,004 ⁽²⁾. Si deduce che la resistenza elettrica di un conduttore aumenta all'incirca del 10% per ogni 25 °C di variazione della sua temperatura.

Per i metalli non puri, es. le loro leghe, il coefficiente di temperatura ha valore minore che per i metalli puri. Per la manganina (lega di 84% Cu,

⁽¹⁾ α lettera dell'alfabeto greco. Si legge alfa.

⁽²⁾ Se invece la temperatura iniziale è T_i °C e finale T_f °C, otteniamo:

$$R_f = R_i \left[1 + \alpha (T_f - T_i) \right], \text{ per il rame } \alpha = \frac{1}{234,5 + T_f}$$

sostituendo si ottiene:

$$R_f = R_i \frac{234,5 + T_f}{234,5 + T_i}$$

12% Mn, 4% Ni) il coefficiente di temperatura è praticamente trascurabile ($\alpha = 0,00001$) cioè nella manganina la resistenza rimane sensibilmente costante al variare della temperatura. (La manganina serve perciò alla costruzione di campioni di resistenza). I conduttori non metallici (es. carbone) hanno un coefficiente di temperatura negativo. In essi la resistenza elettrica diminuisce con l'aumentare della temperatura.

I normali dielettrici, se sottoposti a temperature di oltre un centinaio di gradi centigradi, tendono a perdere la loro resistenza elettrica che per essi è resistenza di isolamento, tendono cioè a diventare corpi conduttori perchè a queste temperature si rallentano i legami che tengono vincolati gli elettroni dello strato periferico al nucleo. Causa l'aumentata ampiezza della vibrazione termica degli atomi, alcuni di questi elettroni periferici possono uscire dall'edificio atomico rendendosi liberi e così, resi liberi, provocare nel corpo coibente una corrente (*corrente di dispersione*) se sollecitati da una opportuna d.d.p.

Superconduttività.

Siccome per la maggior parte dei metalli puri il coefficiente α ha valore prossimo a $\frac{1}{273}$ circa, si deduce, e l'esperienza lo conferma, che a temperature prossime allo zero assoluto ($-273,16$ °C) la resistenza elettrica nei metalli puri si annulla:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) = R_0 \left(1 + \frac{-273}{273} \right) = R_0 (1 - 1) = 0$$

È nullo, di conseguenza, il lavoro resistente delle forze d'attrito che si oppongono al movimento degli elettroni liberi: la corrente elettrica circola in tali conduttori, se sottoposti a temperature prossime allo zero assoluto, senza svolgervi calore.

A questo fenomeno si dà il nome di « superconduttività ».

Ad es. in un circuito elettrico costituito da un anello metallico riesce possibile mantenere in circolazione, per più giorni, un'intensissima corrente (che supera qualche centinaio di ampere per ogni mm^2) determinata da una f.e.m. istantanea generata da una rapida variazione di flusso concatenato con il circuito.

PRINCIPI DI KIRCHHOFF

Il 1° principio di Kirchhoff ⁽¹⁾ stabilisce:

« In ogni punto d'incontro di un sistema di conduttori ⁽²⁾ la somma delle correnti entranti nel nodo è uguale alla somma delle correnti da esso uscenti » (ved. fig. 26).

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

Questo principio è ovvio: esso esprime il fatto che il movimento degli elettroni attraverso il nodo soddisfa alla condizione della continuità. Infatti se supponessimo una corrente uscente dal nodo più intensa di quella entrante, noi avremmo una erogazione di cariche elettriche dal

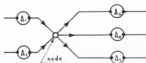


Fig. 26 - Primo principio di Kirchhoff.

nulla e viceversa se supponessimo una corrente entrante più intensa di quella uscente avremmo una impossibile accumulazione di cariche nel detto nodo.

Il 2° principio di Kirchhoff dice:

« La somma algebrica delle f.e.m. che agiscono nei singoli lati di un circuito chiuso uguaglia la somma algebrica dei prodotti delle resistenze per le intensità di corrente che circolano nei lati della maglia ».

Nel circuito della fig. 27 indichiamo rispettivamente con V_a, V_b, V_c, V_d i potenziali dei nodi A, B, C, D e con E, I, R (completati dagli indici 1, 2, 3, 4) le f.e.m., le intensità, e le resistenze dei rispettivi lati della maglia.

Se si assumono per positive, come si fa abitualmente, le f.e.m. e le correnti che nel circuito hanno il verso destrorso e come negative, ovvia-

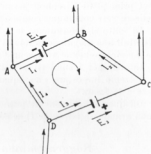


Fig. 27 - Secondo principio di Kirchhoff.

⁽¹⁾ Gustav Kirchhoff, fisico tedesco (1824-1887). I principi sono del 1847.

⁽²⁾ I circuiti elettrici complessi (*reti*) si presentano come tanti circuiti poligonali chiusi aventi lati e punti in comune. Ognuno di questi circuiti chiusi si chiama *maglia* mentre si chiama *nodo* il punto d'incontro di tre o più conduttori.

mente, quelle che nel circuito hanno verso sinistoso, si ottiene, applicando la legge di Ohm a ciascuno dei lati della maglia:

$$\begin{aligned} V_a - V_b + E_1 &= R_1 I_1 \\ V_b - V_c &= -R_2 I_2 \\ V_c - V_d - E_3 &= -R_3 I_3 \\ V_d - V_a &= R_4 I_4 \end{aligned}$$

e sommando membro a membro:

$$E_1 - E_3 = R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4$$

cioè

$$\Sigma E = \Sigma R I.$$

I principi di Kirchhoff permettono di risolvere problemi connessi a maglie di reti comunque complesse.

Di solito si determinano le intensità delle correnti circolanti nei singoli lati di una maglia della rete di cui si conoscono le rispettive resistenze e le f.e.m. applicate a ciascun lato.

Infatti, per i suddetti principi, ad una maglia costituita da « n » lati potremo impostare « n » equazioni distinte tra le intensità, le resistenze e le f.e.m.

Da queste equazioni di primo grado si rileveranno gli « n » valori di una grandezza (ad es. la I) se sono conosciuti gli altri valori (E ed R).

Raggruppamento delle resistenze.

Resistenze in serie ⁽¹⁾.

Si abbiano tre resistenze R_1 , R_2 , R_3 collegate in serie (ved. fig. 28) alimentate dalla tensione V .

I voltmetri derivati alle singole resistenze ci indicano le rispettive cadute di tensione.

Applichiamo la legge di Ohm a ciascuna delle resistenze costituenti la serie:

$$\begin{aligned} V_1 &= R_1 I \\ V_2 &= R_2 I \\ V_3 &= R_3 I \end{aligned}$$

⁽¹⁾ Due o più resistenze si dicono *collegate in serie* tra loro quando si connettono una di seguito all'altra.

Necessariamente le singole resistenze verranno attraversate dalla stessa intensità di corrente se al sistema viene applicata una d.d.p.

Sommando membro a membro queste uguaglianze otteniamo:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V = (R_1 + R_2 + R_3) I$$

Se al posto delle tre resistenze noi avessimo una unica resistenza (R_s) pari alla somma delle tre in serie, si otterrebbe l'equazione:

$$V = R_s I$$

Confrontando quest'ultima equazione con la precedente si ha che:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

« Più resistenze in serie equivalgono ad una unica resistenza di valore somma dei valori delle resistenze « in serie ».

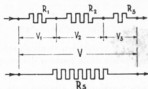


Fig. 28 - R_1, R_2, R_3 resistenze in serie.

R_s resistenza unica pari alla somma di $R_1 + R_2 + R_3$.

Resistenze in parallelo ⁽¹⁾.

Colleghiamo in *parallelo* ⁽¹⁾ (in derivazione) le tre resistenze (ved. figura 29) alimentate dalla tensione V . Applichiamo il primo principio di Kirchhoff al nodo M :

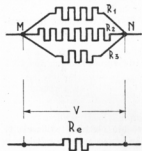


Fig. 29 - Resistenze in parallelo e resistenza equivalente.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

da cui $V = \frac{I}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$

Se al sistema delle tre resistenze in parallelo sostituiamo una unica *resistenza equivalente* (R_e) cioè la resistenza che sostituita al sistema delle resistenze in parallelo (come indicato nella fig. 29) assorba dalla linea la stessa intensità di

⁽¹⁾ Due o più resistenze riunite per i loro estremi costituiscono un sistema di resistenze in parallelo. Di conseguenza le singole resistenze collegate in parallelo vengono alimentate dallo stesso valore di tensione (la d.d.p. esistente ai nodi $M N$ nel caso della fig. 29).

corrente se alimentata dalla stessa tensione applicata al sistema, otteniamo:

$$V = R_e I$$

Dal confronto dei secondi membri delle due equazioni, si ottiene:

$$R_e = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad \text{ed in generale} \quad R_e = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

« La resistenza equivalente di più resistenze in parallelo è uguale al reciproco della somma dei reciproci delle singole resistenze derivate » (1).

Caso particolare di due sole resistenze R_1 ed R_2 in parallelo.

$$R_e = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}$$

da cui:

$$R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

« La resistenza equivalente di due resistenze in parallelo è uguale al prodotto delle due resistenze, diviso per la loro somma ».

In particolare la resistenza equivalente di « n » resistenze in parallelo, tra loro uguali, è l'ennesima parte del valore di una singola resistenza:

$$R_e = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R}} = \frac{1}{\frac{n}{R}} \quad \text{da cui} \quad R_e = \frac{R}{n}$$

Collegamenti delle resistenze.

Le lampadine, come ogni altro apparecchio elettrico utilizzatore, (stufe, motori, ecc.) si possono collegare sia in serie che in parallelo.

(1) Riassumendo: la resistenza di più elementi in serie è sempre maggiore della resistenza di uno di essi perchè alla sua resistenza va aggiunta quella, sia pur piccola, di tutte le altre.

Invece la resistenza di uno degli elementi in parallelo è sempre più grande della resistenza equivalente del sistema perchè alla sezione dell'elemento considerato si aggiunge, al fluire degli elettroni, la sezione, sia pur piccola, di tutti gli altri elementi in parallelo.

Collegamento in serie. — Si possono però collegare in serie solamente apparecchi elettrici costruiti per essere attraversati dalla stessa intensità di corrente ($I = \frac{V}{R}$).

Nel collegamento in serie la tensione totale si ripartisce in ragione diretta delle singole resistenze.

Esempio. 5 lampadine uguali, $R = 88$ ohm, $V = 44$ V, $I = 0,5$ A si possono collegare in serie fra loro ed alimentarle dalla rete cittadina (ved. fig. 30).

$$V = 220 \text{ V}$$

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 440 \text{ ohm}$$

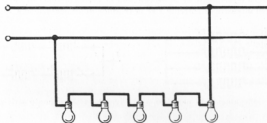


Fig. 30 - Illuminazione in serie.

Così collegate le lampadine funzionano perfettamente perchè attraversate dalla loro normale corrente.

$$\text{Infatti: } I = \frac{V}{R_t} = \frac{220}{440} = 0,5 \text{ A}$$

In molte città l'illuminazione pubblica cittadina è fatta in serie. Le speciali lampade hanno tutte filamenti della stessa sezione, adatte dunque ad essere percorse dalla stessa intensità di corrente che è, generalmente, di 9,6 A.

Le diverse potenze delle lampade inserite, cioè le loro varie luminosità, vengono ottenute usando filamenti di diverse lunghezze.

Principali vantaggi degli impianti di illuminazione cittadina con lampade in serie:

a) superiorità tecnico-economica delle lampade costruite per elevate intensità di corrente e per basse tensioni;

b) tutte le lampade del circuito hanno uguali condizioni di alimentazione. Conseguentemente si ottiene uniformità nell'illuminamento stradale.

c) maggior semplicità dei circuiti eseguiti con conduttori unipolari di sezione costante e minori perdite di energia in quanto le perdite sono funzioni dell'unica corrente che circola nei singoli utilizzatori e non della somma di esse come nel caso in cui tutte le lampade fossero alimentate in parallelo.

Collegamento in parallelo ed in serie-parallelo.

Esercizio. Si abbiano 4 resistenze del valore di 6 ohm ciascuna. Qual'è la loro resistenza equivalente se le colleghiamo in parallelo come in fig. 31 e quale il valore dell'intensità di corrente I se la tensione di alimentazione è $V = 220$ V ?

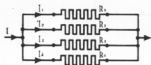


Fig. 31 - Collegamento in parallelo.

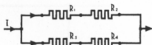


Fig. 32 - Collegamento serie-parallelo.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 6 \text{ ohm}$$

$$R_r = \frac{R}{n} = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ ohm}$$

$$I = \frac{V}{R_r} = \frac{220}{1,5} = 146,6 \text{ A}$$

oppure:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 220 : 6 = 36,66 \text{ A}$$

$$I = 4 \cdot I_1 = 146,6 \text{ A}$$

Calcolare la resistenza equivalente se formiamo due circuiti derivati formati ciascuno da due coppie di resistenze come in fig. 32 e calcolare la I .

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4 = R = 12 \text{ ohm}$$

$$R_r = \frac{R}{n} = \frac{12}{2} = 6 \text{ ohm} \quad I = \frac{V}{R_r} = 220 : 6 = 36,6 \text{ A}$$

Unità di forza, di energia e di potenza elettrica.

L'unità di forza è il *newton* (Nw), esso deriva dall'unità di massa (la massa esprime la quantità di materia di un corpo) e dall'unità di accelerazione.

1 newton è la forza che applicata alla massa di 1 kg le imprime un aumento di velocità di 1 metro al secondo per ogni secondo (l'accelerazione di 1 m al sec²).

Il *joule* (J) è il lavoro che fa 1 Nw quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione della forza.

Si ha la potenza di 1 *watt* (W) quando si compie (o si assorbe) il lavoro di 1 joule in 1 secondo (1).

Si ha la forza di 1 kg quando la massa di 1 kg subisce l'accelerazione di gravità *g*.

Di conseguenza il kg-forza (detto anche soltanto kilogrammo) varia al variare di *g* perchè la forza-peso varia al variare della distanza del punto in cui essa agisce rispetto al centro della terra oltre che aumentare con l'aumentare della latitudine; al livello del mare è: all'equatore 9,78 m/sec², al polo 9,83 m/sec² ed alle nostre latitudini 9,81 m/sec².

Abbiamo dunque l'equivalenza: 1 kg = 9,81 Nw.

Il kgm (lavoro che compie il kg forza quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione dello spostamento) è *g* volte più grande del joule (1 kgm = 9,81 joule).

Ed 1 cavallo-vapore (potenza erogata od assorbita da 75 kgm/sec) è: $75 \times 9,81 \text{ W} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$. Inversamente $1 \text{ kW} = 1,36 \text{ CV}$.

Ricordando che la tensione è il lavoro che si fa o si assorbe quando si ha in movimento l'unità di carica, si deduce che se in un circuito elettrico, sottoposto alla tensione *V*, si muove la carica *Q*, è *Q V* il corrispondente lavoro espresso in joule.

Questo lavoro diviso per il tempo *t* (secondi) in cui si compie, ci dà la potenza *P* (watt) erogata od assorbita dal circuito:

$$P = V \frac{Q}{t} = V I$$

Dalla $V = R I$ (moltiplicando per *I*) si ottiene $P = R I^2$.

(1) Una potenza di 1 watt per la durata di 1 ora corrisponde ad un lavoro di 3600 joule. Questo lavoro si chiama watt-ora (Wh). Il Wh è l'unità di lavoro o energia quando il tempo si misura in ore anzichè in secondi. $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ joule}$.

LEGGE DI JOULE

Come accennato a pag. 11, gli elettroni liberi di un conduttore sottoposti ad una d.d.p., si muovono nella direzione delle forze elettriche.

Il loro moto dovrebbe essere un moto uniformemente accelerato in quanto ogni elettrone è sospinto da una forza costante, però a causa dei loro urti ed attriti con gli atomi supposti fissi, subiscono una tale azione contrastante che il loro moto avviene invece ad una velocità media proporzionale alla forza agente.

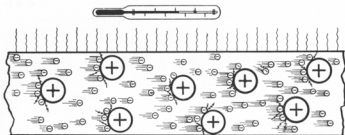


Fig. 33 - Effetto joule.

A causa di queste collisioni (ved. fig. 33) si ha sviluppo di calore nel conduttore di resistenza R percorso dalla corrente di intensità I . Precisamente si converte in energia termica la parte di energia cinetica che gli elettroni perdono nei loro frequentissimi urti ed attriti con gli atomi.

Joule⁽¹⁾ ha dimostrato sperimentalmente che tutta l'energia elettrica ($R I^2 t$ joule) assorbita dal conduttore per vincere la resistenza R , si trasforma in calore:

$$Q = 0,000239 R I^2 t = 0,000239 V I t = 0,000239 \frac{V^2}{R} t \text{ (calorie)}$$

ove Q è espresso in grandi calorie (Cal).

Una grande caloria rappresenta la quantità di calore che bisogna somministrare ad 1 kg di acqua distillata per elevarne la temperatura da 14,5 °C a 15,5 °C.

(1) James Joule, fisico inglese (1818-1889). La legge è del 1841.

0,000239 rappresenta l'equivalente termico del joule ⁽¹⁾ (equivale alla quantità di calore, espressa in grandi calorie, prodotta in 1 secondo da una resistenza di 1 ohm percorsa dalla corrente di 1 ampere).

t ha per unità di misura il secondo.

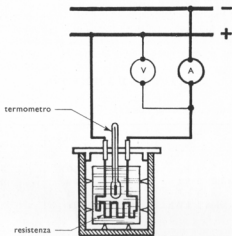


Fig. 34 - Calorimetro.

Questa trasformazione dell'energia elettrica in calore si chiama: *effetto Joule* ⁽²⁾.

Per i suoi esperimenti, Joule usò un calorimetro (ved. fig. 34) la cui resistenza R era completamente immersa nell'alcool che funzionava da

⁽¹⁾ (Ved. pag. 45) $427 \text{ kgm} = 1 \text{ Cal}$, viceversa $1 \text{ kgm} = \frac{1}{427} \text{ Cal} = 9,81 \text{ joule}$:

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{427 \cdot 9,81} \text{ Cal} = 0,0002387 \text{ Cal}$$

⁽²⁾ La legge di Joule ha un'ovvia spiegazione teorica. Infatti il lavoro assorbito dalla resistenza R attraversato dalla corrente I , è, in ogni secondo, $R I^2$ come appare chiaro se si tiene presente che in detto circuito la tensione applicata deve necessariamente essere $V = R I$ e quindi la potenza $V I = R I^2 = \frac{V^2}{R}$.

liquido calorimetrico. Un termometro serviva a misurare l'aumento di temperatura da cui veniva dedotta la quantità di calore svolta. L'equivalente termico del joule è ottenibile dal rapporto tra i joule consumati VIt (misurati con il voltmetro, l'amperometro e l'orologio) e le corrispondenti calorie svolte.

Quantità di calore sviluppata da 1 kWh:

$$Q = 0,000239 \times 1000 \times 3600 = 860 \text{ Cal}$$

RISCALDAMENTO

Esaminiamo la seguente tabella:

	Calorie	Prezzo L.	Prezzo L. per 1000 Calorie
Legna 1 kg	3000	10	3,30
Carbone Cardiff 1 kg	8000	30	4,00
Gas 1 m ³	3500	25	7,00
Energia elettrica 1 kWh	860	18	21,00

A prima vista sembra sia di somma convenienza utilizzare una stufa a legna od a carbone oppure un bruciatore a gas per riscaldare un locale.

Da tener presente, però, che una qualsiasi fiamma, per la sua combustione, consuma ossigeno indispensabile ai nostri polmoni e di conseguenza non è consigliabile riscaldare locali completamente chiusi per mezzo di queste tre sorgenti di calore che inquinano l'ambiente di CO e CO₂, il cosiddetto nemico invisibile. Se il locale da riscaldare è provvisto di camino o di una qualsiasi canna di tiraggio ed i prodotti della combustione vengono convogliati in esso, eliminiamo il mortale pericolo del CO e CO₂ ma i 3/4, circa, del calore prodotto dalla combustione del carbone, delle legna o del gas si perdono nell'atmosfera ed il rendimento diminuisce nella stessa proporzione.

Nella necessità di riscaldare locali chiusi è consigliabile adoperare radiatori elettrici che non abbisognano di ossigeno per il loro funzionamento e perciò non inquinano l'aria ambiente.

Densità di corrente ammissibile nei conduttori.

Il calore prodotto per effetto joule nei conduttori percorsi da corrente eleva gradualmente la loro temperatura su quella dell'ambiente fino ad un valore tale (denominato di *regime*) per cui la potenza elettrica sviluppata nel conduttore sia uguale al calore che in ogni secondo viene trasmesso all'ambiente dalla superficie esterna (superficie irradiante) del conduttore. Un eccessivo riscaldamento danneggia l'isolante posto a protezione dei conduttori: bisogna dunque contenere entro determinati valori la sopraelevazione di temperatura (¹).

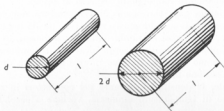


Fig. 35.

Dato che la superficie irradiante di un conduttore circolare di lunghezza unitaria è funzione lineare del diametro (πd) mentre la sua sezione ne è funzione quadratica: $\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$, deve la densità di corrente (cioè il rapporto $\frac{I}{s}$ tra la corrente e la sezione, che si misura in $\frac{\text{ampere}}{\text{mm}^2}$), diminuire con l'aumentare della sezione del conduttore se vogliamo che conduttori di diverso diametro determinino uguali sopraelevazioni di temperatura.

Infatti si considerino due conduttori (ved. fig. 35) l'uno di diametro d , l'altro di doppio diametro, entrambi della stessa lunghezza, dello stesso materiale ed attraversati dalla stessa densità di corrente.

Il primo di resistenza R se percorso dall'intensità di corrente I , svilupperà un numero di calorie al secondo proporzionale ad $R I^2$; il secondo di sezione 4 volte maggiore e perciò di resistenza 4 volte più

(¹) Ad es. le norme C.E.I. prescrivono temperature massime di 60°C per i normali fili elettrici incassati dei nostri impianti casalinghi.

piccola $\left(\frac{R}{4}\right)$ verrà percorso da una corrente 4 volte maggiore. La sua intensità è quadrupla ($4 I$) perchè è quadrupla la sua sezione dato che il confronto si fa a pari densità di corrente per cui, a parità di lunghezza, svilupperà un numero di calorie al secondo proporzionale ad:

$$\frac{R}{4} (4 I)^2 = \frac{R}{4} 16 I^2 = 4 R I^2$$

ossia un numero di calorie al secondo 4 volte maggiore che nel primo caso. Ma nel caso del conduttore di sezione maggiore la superficie irradiante, esterna, si è solamente raddoppiata rispetto al primo.

Conclusioni: la sopraelevazione di temperatura del conduttore di sezione maggiore tende a raddoppiare rispetto a quella del conduttore di sezione minore, se percorsi entrambi dalla stessa densità di corrente.

Al fine di ottenere identiche sopraelevazioni di temperatura nei due conduttori in esame dovremo dunque ridurre la densità di corrente nel conduttore di sezione maggiore.

In generale, le densità di corrente nei conduttori in relazione alla sopraelevazione di temperatura ammessa, variano a seconda del materiale di cui è costituito il conduttore, della sezione, del servizio a cui è adibito (intermittente o continuo) e dalle modalità di raffreddamento (naturale od artificiale).

Per non raggiungere i limiti ammessi di sovratemperatura nei conduttori isolati e protetti da un tubo (Bergmann; polivinile, ecc.) dei nostri impianti casalinghi (di limitate sezioni) è consigliabile ridurre a $2 \div 3$ amp/mm² la densità di corrente circolante in essi mentre nei conduttori di maggiore sezione, ad es. per impianti di forza si deve progressivamente diminuire tale densità. (Es. per sezioni di 50 mm² la massima densità di corrente sarà di circa 2 amp/mm², per sezioni di 100 mm² la densità sarà di circa 1 amp/mm², ecc.

Quando il calcolo ci porta a forti sezioni, useremo conduttori multipli, in parallelo, al fine di aumentare la superficie irradiante e con essa la densità di corrente (a parità di sezione totale) senza sorpassare i limiti ammessi di sovratemperatura.

Valvole fusibili.

Le valvole fusibili sono costituite, nella loro essenza, da uno spezzone di filo di piombo (in generale il \varnothing del filo di piombo si sceglie uguale al \varnothing del filo di rame costituente il circuito da proteggere) inserito all'inizio del circuito, a valle del contatore.

Si consideri un corto spezzone di filo di piombo ed uno di rame di uguale sezione e lunghezza, disposti in serie (percorsi dunque dalla stessa intensità di corrente).

Il calore prodotto per effetto joule, al passaggio della corrente, nello spezzone di piombo ($\rho = 0,2$) è circa 12 volte maggiore del calore prodotto, nello stesso tempo, nello spezzone di rame ($\rho = 0,017$). Inoltre la temperatura di fusione del piombo (327 °C) è circa un terzo di quella del rame (1083 °C). Si deduce che, prescindendo da secondarie considerazioni, il filo di piombo fonde in un tempo che è circa la trentaseiesima ($12 \times 3 = 36$) parte del tempo impiegato dal filo di rame avente uguale sezione e lunghezza di quello di piombo se percorso dalla stessa corrente.

Il filo di piombo fonde perciò istantaneamente al verificarsi di un corto circuito proteggendo impianti ed apparecchiature dai periculosissimi effetti conseguenti ai corti circuiti.

Corto circuito.

In un impianto si verifica un « corto circuito » quando due conduttori di opposta polarità, per un guasto all'isolante, vengono a contatto: la corrente percorre un circuito più corto.

Esempio. Si abbia un circuito (ved. fig. 36) che alimenta una lampadina potenza 75 W, tensione 220 V. La corrente che percorre l'intero circuito, in condizioni normali, è:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{75}{220} = 0,34 \text{ A}$$

Resistenza del filamento della lampadina:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{220}{0,34} = 647 \text{ ohm}$$

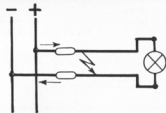


Fig. 36 - Corto circuito.

Al verificarsi del guasto la resistenza della parte del circuito percorsa dalla corrente di c.c. diventa trascurabile.

Supponiamo abbia un valore di 0,1 ohm e che il valore della tensione che alimenta il circuito, al verificarsi del guasto, rimanga invariato:

$$I_{cc} = \frac{V}{R_{cc}} = \frac{220}{0,1} = 2200 \text{ A}$$

Intensità inammissibile perchè fonderebbe i conduttori, con pericolo d'incendio, se l'impianto non fosse protetto da adeguate valvole fusibili.

Effettivamente la corrente di c.e., pur essendo rilevante, è notevolmente inferiore a quella dedotta con il calcolo perchè il valore della tensione alimentatrice diminuisce sensibilmente, dall'istante del c.e., causa la conseguente maggior caduta di tensione sulla linea alimentatrice.

I Esercizio. Un radiatore elettrico deve mantenere sui 18 °C la temperatura di un locale di dimensioni 4 × 4,2 alto m 3 mentre all'esterno la temperatura invernale è di - 5 °C.

Determinare le calorie svolte dal radiatore ogni ora.

L'esperienza insegna che abbisognano circa 40 watt/m³ orari per mantenere sui 18 °C la temperatura di un locale durante le accennate condizioni invernali.

Volume del locale:

$$4 \cdot 4,2 \cdot 3 = \div 50 \text{ m}^3$$

Potenza del radiatore:

$$40 \cdot 50 = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$$

Calorie orarie svolte:

$$Q = 860 \cdot 2 = 1720 \text{ Cal}$$

II Esercizio. Si abbiano due resistenze ohmiche da 15 ohm e 30 ohm rispettivamente. Determinare le calorie sviluppate disponendo le resistenze in serie e susseguentemente in parallelo. Tensione di alimentazione: 160 V. Tempo: 1 ora ogni prova.

In serie:

$$R_t = R_1 + R_2 = 15 + 30 = 45 \text{ ohm}$$

$$Q = 0,000239 \frac{V^2}{R} \cdot 3600 = 489 \text{ Cal.}$$

In parallelo:

$$R_s = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{15 \cdot 30}{15 + 30} = 10 \Omega$$

$$Q = 0,000238 \frac{160^2}{10} \cdot 3600 = 2193 \text{ calorie}$$

III Esercizio. Uno scalda-acqua elettrico (boiler), ved. fig. 37 ⁽¹⁾, ha la potenza di 1 kW e la capacità di litri 80.

(1) Nello scalda-acqua elettrico l'acqua fredda entra dal basso in pressione e l'acqua calda viene prelevata dall'alto, ciò per evitare che il recipiente possa rimanere senz'acqua durante il funzionamento. Inoltre una valvola idraulica sistemata sul tubo dell'acqua fredda impedisce che il recipiente si svuoti nel caso

Determinare il tempo necessario affinché la temperatura dell'acqua aumenti da 15 °C ad 80 °C (ammesso che non vi siano dispersioni).

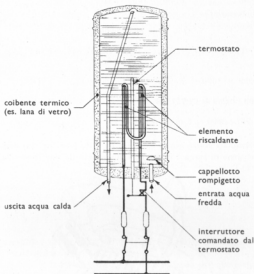


Fig. 37 - Sezione di uno scaldacqua elettrico.

venza a mancare la pressione nella tubazione alimentatrice. Il cappello rompigetto sistemato sull'estremità del tubo dell'acqua fredda serve per evitare una troppo rapida miscelazione dell'acqua fredda con la calda.

L'elemento riscaldante (resistenza al cromo-nichel) è racchiusa in un tubo a tenuta stagna (tubo di metallo inossidabile).

Il termostato ha la funzione di interrompere il circuito quando la temperatura dell'acqua nel recipiente raggiunge un prefissato valore massimo (questo valore massimo, valore di scatto, si determina con il girare una apposita *rosetta di regolazione*) e di richiudere il circuito quando la temperatura dell'acqua, raffreddandosi, è diminuita di circa 5 °C dal prefissato valore di scatto.

L'organo sensibile alla temperatura (termostato contenuto nel tubo centrale immerso nell'acqua) agisce sull'interruttore disposto sotto la calotta isolante del recipiente.

La temperatura dell'acqua nel recipiente non deve sorpassare gli 80 °C e ciò per evitare un principio di ebollizione.

Le normali capacità degli scaldacqua, per uso casalingo, sono di litri 50, 80, 100 e 120.

Differenza di temperatura:

$$80 - 15 = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Calorie necessarie:

$$Q = 65 \times 80 = 5200 \text{ Cal}$$

$$5200 = 860 \times t_{\text{sc}}; \quad t_{\text{sc}} = 5200 : 860 = 6 \text{ ore}$$

oppure:

$$5200 = 0,000239 \times 1000 \times R \times I^2 \times t_{\text{sc}} = 0,239 t_{\text{sc}} \quad (R \times I^2 = P = 1)$$

$$t_{\text{sc}} = 5200 : 0,239 = 21\,757 \text{ secondi}$$

$$t_{\text{sc}} = 21\,757 : 3600 = 6 \text{ ore circa}$$

IV Esercizio. La resistenza di un ferro da stiro (ved. fig. 38) della potenza di 300 W e tensione di targa 160 V viene alimentata da una linea alla tensione unificata di 220 V.



Fig. 38 - Resistenza riscaldante in un ferro da stiro elettrico.

Determinare la nuova potenza assorbita dal ferro da stiro.

$$\frac{P_{160}}{P_{220}} = \frac{V_{160}^2}{R} : \frac{V_{220}^2}{R} = \frac{V_{160}^2}{V_{220}^2}$$

La potenza varia come il quadrato delle tensioni.

$$P_{220} = P_{160} \frac{V_{220}^2}{V_{160}^2} = P_{160} \left(\frac{V_{220}}{V_{160}} \right)^2$$

e sostituendo i valori

$$P_{220} = 300 \left(\frac{220}{160} \right)^2 = 567 \text{ W}$$

Si suppone che il valore della resistenza elettrica del ferro da stiro non subisca variazioni apprezzabili nei due casi.

Effettivamente il valore della resistenza non rimane costante in quanto essa assume, rispettivamente, temperature diverse nell'uno e nell'altro caso per il fatto che sono diverse le intensità delle correnti assorbite alle due tensioni.

V Esercizio. Un ferro da stiro ha i seguenti dati di targa:

$$P = 300 \text{ W}, \quad V = 150 \text{ V}$$

Determinare l'intensità della corrente assorbita ed il valore della resistenza:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{300}{150} = 2 \text{ A}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{150}{2} = 75 \text{ ohm}$$

e direttamente:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{150^2}{300} = 75 \text{ ohm}$$

VI Esercizio: Variazione della resistenza elettrica del filamento delle lampadine ad incandescenza.

Si chiede il valore dell'aumento della resistenza del filamento di tungsteno ($\alpha = 0,0042$) di una lampadina: $P = 80 \text{ W}$, $V = 220 \text{ V}$, nel passare dalla temperatura ambiente alla temperatura di funzionamento (2200 °C circa).

Ricaviamo il valore della resistenza ohmica del filamento di tungsteno durante il funzionamento.

L'intensità di corrente che assorbe la lampadina è:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{80}{220} = 0,36 \text{ ampere}$$

$$R_t = \frac{V}{I} = \frac{220}{0,36} = 610 \text{ ohm}$$

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

$$610 = R_0 (1 + 0,0042 \cdot 2200) = R_0 \cdot 10,24$$

da cui:

$$R_0 = \frac{610}{10,24} = 60 \text{ ohm}$$

Dunque la resistenza del filamento di tungsteno, a 2200 °C, è circa 10 volte maggiore della sua resistenza a temperatura ambiente. Ciò significa che nell'istante iniziale di accensione l'intensità di corrente assorbita dalla lampadina $\left(I = \frac{V}{R_s} = \frac{220}{60} = 3,6 \text{ A} \right)$ è 10 volte maggiore dell'intensità assorbita a funzionamento normale.

Determinazione delle temperature.

La resistenza di un filo di rame, avvolto strettamente ad elica (bobina), misura 1,75 ohm a freddo (temperatura ambiente 15 °C).

Dopo un prolungato funzionamento la resistenza (valore della resistenza « a caldo ») ha raggiunto 2,1 ohm.

Si domanda la temperatura finale (T_f) della bobina.

Dalla $R_f = R_i \frac{234,5 + T_f}{234,5 + T_i}$ (ved. pag. 25), sostituendo i valori noti,

si ha:

$$2,1 = 1,75 \frac{234,5 + T_f}{234,5 + 15} \text{ da cui si ottiene } T_f = 65 \text{ °C}$$

Questo metodo (metodo delle *variazioni di resistenza*) permette di ottenere il valore medio della temperatura raggiunta negli avvolgimenti interni delle macchine, dalla misura della resistenza a freddo ed a caldo.

Resistenza del corpo umano.

Il corpo umano presenta una resistenza di valore incerto e variabile. Come grossolano ordine di grandezza si può assumere:

50 000 ohm tra le mani asciutte e callose di un operaio;

5 000 ohm tra le mani asciutte e non callose di un impiegato;

3 000 ohm tra le mani umide di sudore di un ragazzo calzato malamente ed il suolo.

Se noi tocchiamo contemporaneamente con le mani i due conduttori in tensione dei nostri impianti casalinghi, chiudiamo il circuito attraverso il nostro corpo: circolerà in esso una corrente ($I = V/R$).

Se invece tocchiamo un solo conduttore in tensione applichiamo al nostro corpo una d.d.p. che farà circolare una corrente attraverso il nostro corpo se non siamo perfettamente isolati dal suolo (un perfetto isolamento interrompe il circuito).

È dunque indispensabile, quando si deve toccare un conduttore, od apparato sotto tensione dei nostri impianti casalinghi, isolarsi a dovere con il salire su una pedana isolante (es. una tavoletta di legno) o con il salire su una sedia o su una scala e mai appoggiarsi imprudentemente al muro o toccare il soffitto mentre si è in contatto con il conduttore in tensione.

Il limite massimo dell'intensità di corrente sopportabile dal corpo umano si aggira sui 0,04 ampere (0,1 ampere è sempre mortale) ed una tale intensità di corrente, più spesso mortale, può essere causata anche da modesti valori di tensione.

Es.: una persona che scenda in una umida cantina mentre porta in mano una lampada portatile, insufficientemente isolata, alimentata da una rete tensione 125 V; $I = \frac{V}{R} = \frac{125}{3000} = 0,04$ A.

L'energia e le sue trasformazioni (secondo la teoria classica)

Si è più volte accennato alla trasformazione dell'energia elettrica in calore (effetto Joule), ma essa costituisce un caso singolo di una serie di trasformazioni, alle quali è necessario riferirsi brevemente.

L'energia, infatti, come la materia, non si crea nè si distrugge, ma si trasforma.

Fin dal 1774 Lavoisier scoprì la legge della conservazione della massa e Landolt ne dette la conferma sperimentale. Fondandosi su un presupposto analogo, Julius R. Mayer, James P. Joule, H. von Helmholtz e Gustavo A. Hirn, inferirono il principio della conservazione dell'energia, come enunciato del quale può assumersi il seguente:

Una determinata quantità di energia si mantiene costante in un sistema isolato attraverso qualsiasi ciclo di trasformazioni che possano subire le sue singole forme (energia potenziale, cinetica, elettrica, raggianti, chimica, ecc.).

In particolare: ad una determinata quantità di energia meccanica, o lavoro (427 chilogrammetri) corrisponde sempre la stessa quantità di energia termica (1 grande caloria).

Qualsiasi progetto di creare energia dal nulla e cioè per mezzo di un dispositivo capace di far percorrere ad un sistema un ciclo di trasformazioni, il quale ripassi periodicamente per il suo stato iniziale liberando energia, è da escludersi. Il moto perpetuo di prima specie è quindi impossibile. È questo anche il primo principio della termodinamica, per chiarire il quale richiameremo alla memoria che una trasformazione si dice reversibile quando può procedere da *A* (per es. lavoro consumato) verso *B* (per es. lavoro svolto) che da *B* verso *A* senza richiedere energia all'esterno; in caso contrario si dice irreversibile.

La trasformazione di una certa quantità di energia, di una forma qualsiasi, in calore, è un fenomeno reversibile? È questa la domanda che si posero Sadi Carnot, R. Clausius e Lord Kelvin.

Abbiamo visto che il primo principio della termodinamica nega la possibilità di creare energia dal nulla, ma esso non si oppone al progetto di costruire un dispositivo capace di trasformare dell'energia calorifica in meccanica, questa in elettricità, l'elettricità di nuovo in energia calorifica per poi riprendere in modo continuo il ciclo delle trasformazioni (moto perpetuo di seconda specie).

Dalla lunga serie di studi portati a termine da detti scienziati, si pervenne all'importante conclusione che in qualsiasi macchina termica (per es. la macchina a vapore) la trasformazione del calore in energia meccanica (per es. moto rotatorio) avviene sempre con una perdita di energia termica, una parte cioè del calore messo in gioco non può essere trasformato in energia meccanica.

La trasformazione dell'energia termica è quindi un fenomeno irreversibile ed il moto perpetuo di seconda specie è anch'esso da escludere.

Ma allora l'universo nel suo divenire non è che una serie di trasformazioni irreversibili e la quantità di calore in esso esistente tenderà pertanto ad aumentare senza posa a causa di questa degradazione (entropia) delle varie forme di energia in calore non ulteriormente trasformabile. Il secondo principio assegna al mondo fisico uno stato finale di energia termica uniformemente distribuita.

Ma nessun fenomeno naturale è in tale stato possibile: è la morte termica dell'universo.

Equivalenza dell'energia e della massa (secondo la teoria della relatività).

Ci siamo riferiti, nel precedente paragrafo, al principio della conservazione della massa (Lavoisier) ed a quello della conservazione dell'energia (Mayer). Dobbiamo ora dimostrare come ambedue questi principi siano contraddetti da ricerche sperimentali.

Il primo è contraddetto dal fatto che in una reazione nucleare la somma delle masse dei componenti non è uguale a quella del composto.

Infatti, la massa di due protoni (2,015176), due neutroni (2,017900) e due elettroni (0,001086) è uguale a 4,034162, mentre la massa del composto, cioè di un atomo di He, è 4,003842.

Si ha quindi in tale reazione nucleare una perdita, o difetto di massa, pari a 0,03020 e la liberazione di $6,57 \cdot 10^6$ calorie. Se si assume il principio di equivalenza, la massa sparita (0,030320) corrisponde all'energia liberata ($6,57 \cdot 10^6$ calorie). Abbiamo in tal modo una trasformazione della massa in energia.

Inversamente: allorché dei raggi γ (¹) dotati di un'energia di $2,60 \cdot 10^6$

(¹) Le radiazioni elettromagnetiche γ (gamma) vengono emesse dai nuclei degli atomi che si disintegrano. Esse sono della stessa natura dei raggi X, ma di lunghezza d'onda ancora più breve, possono essere emessi da tali nuclei insieme ai corpuscoli α (ioni di He) e β (elettroni). Queste radiazioni, come l'elettricità, hanno carattere puramente granulare; ciascun granulo (o «quanto») è stato chiamato: *fotone*.

e · V ⁽¹⁾ colpiscono del piombo, si ha l'uscita di due corpuscoli: un elettrone ed un positrone (elettrone positivo) in coppia, dotata nel complesso di un'energia cinetica pari a $1,60 \cdot 10^6$ e · V.

È quindi sparita un'energia di un milione di elettroni-volt. Assunto lo stesso principio di equivalenza, tale energia sparita deve corrispondere alla massa di due corpuscoli formatisi (500 000 elettroni-volt per la massa individuale di ogni corpuscolo formatosi): abbiamo avuto ora una trasformazione dell'energia in massa.

Concludendo: nel primo caso aveva luogo una smaterializzazione della massa, nel secondo una materializzazione dell'energia.

I due principi di conservazione possono quindi essere assunti in uno solo, il principio dell'equivalenza dell'energia e della massa (Einstein) la cui espressione matematica è:

$$W = m \cdot c^2$$

ma che si può enunciare letteralmente come segue ⁽²⁾: « L'energia equivalente ad una determinata quantità di massa è data dal prodotto di detta massa per il quadrato della velocità della luce », oppure:

« La massa di una determinata quantità di energia è misurata dal rapporto fra detta energia ed il quadrato della velocità della luce ».

⁽¹⁾ L'elettrone-volt (e · V) è l'unità di energia elettronica ed equivale all'energia acquistata da un elettrone nel passare per due punti dello spazio tra i quali esiste la differenza di potenziale di 1 volt.

L'unità vale $1,6 \cdot 10^{-12}$ joule, si tratta perciò di una quantità piccolissima.

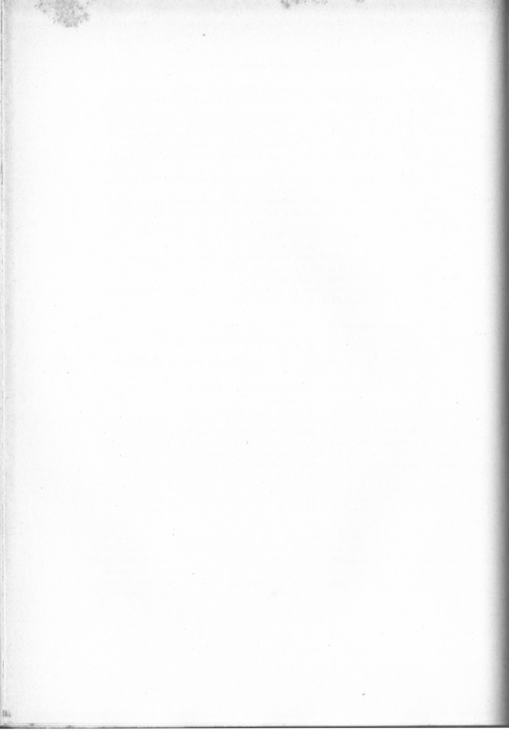
⁽²⁾ Dalla relazione di Einstein: $W = m \cdot c^2$

W espresso in erg/sec (10 erg = 1 joule)

m espresso in grammi

c = $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec (velocità della luce)

si rileva che ad una grandissima quantità di energia corrisponde una piccolissima massa (1 grammo di materia equivale a 90 miliardi di kW/sec cioè 21,5 miliardi di grandi calorie) e viceversa l'assorbimento da parte di un qualunque sistema nucleare di una energia W è accompagnata da un aumento della sua massa.



CAPITOLO III

PILE ED ACCUMULATORI

PILE

L'esperienza insegna che se si immergono due metalli diversi in un elettrolito nasce tra questi due metalli una f.e.m. che dipende solamente dalla natura dei metalli e da quella dell'elettrolito (e non dalle loro dimensioni).

Questo apparecchio, capace di mantenere una corrente in un circuito collegato ai suoi morsetti (ved. fig. 17) si chiama *pila*.

Con la coppia metallica Cu e Zn in H_2SO_4 diluito, si realizza una f.e.m. di circa 1 V.

Per il principio sopra enunciato si possono costruire pile con altre coppie metalliche. Ad es. Cu (+) e Fe (—) oppure Pb (+) e Fe (—), ecc. ma queste coppie danno valori minori di f.e.m. di quelle ottenibili dalla coppia Cu (+) e Zn (—).

(Immergendo nella soluzione due piastre dello stesso metallo, non si generano f.e.m.).

La *capacità* ⁽¹⁾ di una pila è piccola: circa 2 Ah con normali correnti di erogazione.

Con la scoperta della pila (avvenuta nel 1799), dovuta al Volta ⁽²⁾ ebbe inizio l'imponente sviluppo dell'elettrotecnica. Volta comunicò la sua scoperta alla Società Reale di Londra con lettera del 20 marzo 1800.

⁽¹⁾ Chiamasi *capacità* di una pila il prodotto della corrente erogata (A) per il numero delle ore (h) durante le quali tale erogazione si esaurisce.

⁽²⁾ Alessandro Volta, nato a Como il 18 febbraio 1745, ed ivi morto il 6 marzo 1827.

ACCUMULATORI

Se si collegano due lastre di piombo, separate da una soluzione di acido solforico diluito in acqua distillata, ai poli di un generatore di corrente continua (ved. fig. 39) l'elettrolisi modifica la natura chimica delle piastre che diventano rispettivamente perossido di piombo (PbO_2) di colore rosso-bruno (anodo) piastra positiva (+) e piombo puro spugnoso di colore grigio (catodo) piastra negativa (-).

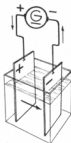


Fig. 39 - Carica di un accumulatore.

Con l'elettrolisi si sono ottenute, dunque, due piastre chimicamente diverse tra le quali, per il principio sopra enunciato, si genera una f.e.m. come in una pila. Un siffatto apparecchio, vero serbatoio di energia elettrica, si chiama *accumulatore*.

L'energia elettrica somministrata all'accumulatore è servita fondamentalmente a rendere diverse quelle due piastre (elettrodi) che prima della carica erano invece metallicamente uguali.

È questo il procedimento seguito da Planté (fisico francese 1834-1889) che fabbricò il primo accumulatore nel 1860.

L'accumulatore è dunque una pila che trasforma, nell'operazione di carica, l'energia elettrica in energia chimica, la immagazzina restituendola quando si voglia ricavare energia elettrica dall'accumulatore.

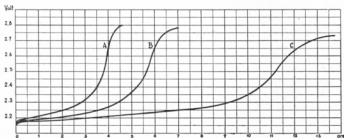


Fig. 40 - Curve di carica di un accumulatore al piombo.

Curva A: carica ad intensità normale I .

Curva B: carica a $\frac{2}{3}$ di I .

Curva C: carica ad $\frac{1}{3}$ di I .

In tutti gli accumulatori al piombo, durante la carica, non si deve oltrepassare l'intensità della corrente massima di carica indicata sulla targa di ogni accumulatore; si può, invece, ridurre queste intensità di corrente massima di carica purchè si prolunghi la durata in proporzione, (ved. fig. 40; curve di carica di un accumulatore al piombo).

Il progredire della carica si riconosce:

1. Dall'aumento del peso specifico dell'elettrolito che ad accumulatore al piombo scarico è di 1,15, ad accumulatore carico per metà della sua capacità è 1,18 e caricato completamente è di 1,21.

2. Dal crescere della tensione ai poli dell'accumulatore (ved. diagramma di carica) che a fine carica è di 2,75 V circa.

Raggiunte queste condizioni, si nota un vivo sviluppo di bollicine gassose sugli elettrodi e precisamente: sulla piastra positiva (PbO_2) in comunicazione con il polo + della sorgente di elettricità, si ha sviluppo di ossigeno mentre sulla piastra negativa (Pb) in comunicazione con il polo - della sorgente di elettricità, si ha sviluppo di idrogeno. Ciò indica che essi elettrodi non sono più in grado di combinarsi con i prodotti della dissociazione elettrolitica.

Appena si nota questo sviluppo di gas, si riduca a circa un terzo la corrente di carica e si continui la carica per ancora un'ora circa.

Realizzati i sintomi di fine carica e cioè la costanza (durante qualche ora) della tensione ai morsetti dell'accumulatore e della densità dell'elettrolito (oltre che dello sviluppo gassoso), si stacchi l'apparecchio dalla sorgente di elettricità perchè razionalmente caricato.

Dopo il distacco si stabilisce ai morsetti dell'accumulatore una *tensione di riposo* di circa 2 V ⁽¹⁾.

Quando l'accumulatore viene utilizzato (scaricato) con il collegarlo ad un circuito esterno (ved. fig. 41), la sua tensione discende dapprima rapidamente ad 1,95 V e poi più o meno lentamente a valori inferiori a seconda dell'intensità di scarica (ved. fig. 42: curve di scarica).

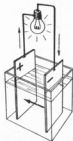


Fig. 41 - Scarica di un accumulatore.

(1) La tensione di riposo V (a circuiti aperto) si identifica con il valore della f.e.m. E dell'accumulatore.

Durante la carica, la tensione ai morsetti varia in funzione dell'intensità di corrente di carica e della resistenza interna R dell'accumulatore: $V = E + RI$ dove E dipende dalla densità dell'elettrolito ed R varia in funzione dello stato di carica e del tipo di accumulatore.

Durante la scarica, la tensione disponibile a morsetti è: $V = E - RI$.

Nella scarica si ha un passaggio di corrente (corrente di scarica) di senso opposto alla corrente di carica, dunque le polarità + e - dell'accumulatore rimangono invariate. La scarica si deve interrompere quando la tensione dell'accumulatore scende a circa 1,75 V. Se continuassimo ad utilizzare l'accumulatore oltre questi limiti, si produrrebbe la « solfatazione » delle piastre. La solfatazione delle piastre al piombo è dovuta alla formazione su esse di uno strato di solfato di piombo cristallino, poco conduttore, poco solubile, il quale aumenta la resistenza interna e diminuisce l'attività dell'elemento. Le piastre solfatizzate si riconoscono perchè assumono un colore biancastro.

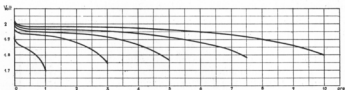


Fig. 42 - Curve di scarica, di diversi regimi, di un accumulatore al piombo.

L'accumulatore carico, ma lasciato inoperoso per lungo tempo, si esaurisce lentamente (per ogni giorno di inoperosità perde circa il 2% della carica). In questo caso bisogna ricaricare l'accumulatore almeno una volta al mese altrimenti si verifica la dannosa solfatazione delle piastre: l'accumulatore si danneggia sempre se la scarica viene spinta ad una tensione inferiore alla minima ammessa (ved. curve di scarica) oppure se gli elementi vengono lasciati in riposo dopo essere stati completamente scaricati. L'accumulatore non subisce danni per i regimi non molto elevati di scarica. (Il regime di scarica in 1 ora è da considerarsi come massimo). Da tener presente che uno dei mezzi più efficaci per ottenere una buona conservazione degli accumulatori è quello di caricarli senza indugio dopo la scarica.

Per il fatto che la resistenza interna di un accumulatore è molto piccola perchè le piastre hanno ampie superfici affacciate e perchè è breve la loro distanza (la resistenza interna varia da qualche decimillesimo di ohm negli accumulatori di grandi dimensioni fino a decimi di ohm negli accumulatori di minime dimensioni) si ha che un accidentale corto circuito risulta pregiudizievole perchè nell'accumulatore in corto circuito circola un'intensissima dannosa corrente

(Nelle pile la resistenza interna è invece molto grande, di conseguenza

le pile non restano danneggiate da un momentaneo corto circuito ai loro morsetti).

Vengono preferiti gli accumulatori con più piccola resistenza interna perchè alla carica risulterà più bassa la tensione necessaria per la loro ricarica mentre alla scarica risulterà più elevata la tensione disponibile ai morsetti.

Accumulatori al piombo.

Al fine di ottenere la massima capacità, a pari peso di piombo:

a) Le piastre positive (di adatto spessore, ved. fig. 43) vengono munite di numerose sottili alette ottenute da fusione. Le alette aumentano considerevolmente la superficie attiva. (Queste piastre vengono denominate *piastre Planté*).



Fig. 43 - Piastra positiva a grande superficie.

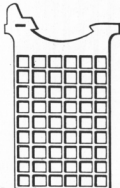


Fig. 44 - Piastra negativa a griglia.

b) Le piastre negative (ved. fig. 44) vengono munite di nervature (griglie) intersecantesi. Le intersezioni di queste nervature formano « le celle » che vengono riempite con pastiglie di ossido di piombo (materia attiva) suscettibile di una più rapida e completa trasformazione al passaggio della corrente di carica. (Questo procedimento deriva dal processo di formazione delle piastre ideato da Faure nel 1880).

Le piastre positive e rispettivamente negative di ogni accumulatore al piombo sono unite in parallelo mediante un regolo orizzontale di piombo.

Il gruppo positivo e quello negativo di ogni accumulatore, tra loro isolati, sono posti in una cassetta di ebanite e sostenuti dal supporto di fondo (ved. fig. 45).

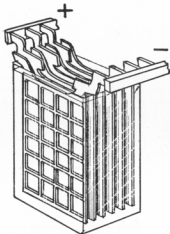


Fig. 45 - Accumulatore al piombo.

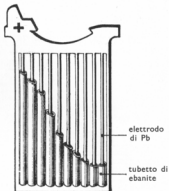


Fig. 46 - Piastra positiva dell'accumulatore Ironclad.

Accumulatori Ironclad.

Il tipo speciale di accumulatore chiamato « Ironclad » (che significa corazzato) e che si dimostra adatto per veicoli leggeri (es. elettrocarrelli) si differenzia dal precedente tipo al piombo soprattutto per la struttura delle piastre positive.

In questo tipo Ironclad le piastre positive (ved. fig. 46) sono costituite da una serie di piccoli elettrodi cilindrici di piombo antimoniale (riunite alle estremità) e circondati da tubetti di ebanite, muniti di sottilissime fessure nel senso trasversale, contenenti una speciale materia attiva.

Le piastre negative (ved. sezione dell'accumulatore Ironclad, fig. 47), di notevole spessore, sono del tipo a « griglia impastata ».

L'insieme delle piastre positive e negative, solidamente connesse, forma un complesso indeformabile e compatto contenuto entro cassette di ebanite riempite dall'elettrolito (soluzione di H_2SO_4 purissimo del peso specifico di 1,26).

In tutti gli accumulatori il livello dell'elettrolito deve sempre superare di circa 10 mm l'orlo superiore delle piastre.

Se durante il servizio questo livello diminuisce per le naturali evaporazioni, si compensa questo abbassamento di livello dell'elettrolito con l'aggiunta di acqua distillata chimicamente pura.

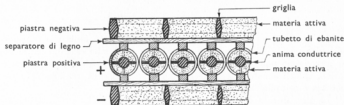


Fig. 47 - Sezione di un accumulatore tipo Ironclad.

L'aggiunta va fatta prima della carica allo scopo di assicurare la perfetta mescolanza con l'acido. Non si deve mai aggiungere acido se non per compensare quello che fosse eventualmente perduto per fuoriuscita dagli accumulatori, ad es. trasportato fuori dalle bollicine di gas che si può verificare durante una carica terminata con un'intensità troppo elevata.

Accumulatori al nichel.

Gli accumulatori al nichel sono composti da un elettrodo positivo costituito da un supporto di acciaio nichelato a forma di griglia nelle cui cavità sono compresse delle pastiglie di ossidi di nichel e da un elettrodo negativo formato da un supporto simile che contiene degli ossidi di:

ferro (accumulatore al *ferro-nichel* o « accumulatore Edison »)

cadmio (accumulatore al *cadmio-nichel*)

L'elettrolito è una soluzione acquosa di idrato potassico (KOH). La densità della soluzione è del 20%.

Durante la carica dell'accumulatore l'elettrodo positivo si superossida passando allo stato di sesquiossido di nichel (Ni_2O_3) mentre:

a) nell'accumulatore Edison l'ossido di ferro si riduce a ferro spugnoso;

b) nell'accumulatore al cadmio-nichel l'ossido di cadmio si riduce a cadmio.

Durante la scarica avvengono le reazioni inverse che rigenerano le primitive sostanze.

Ogni elemento è racchiuso in una robusta cassetta in lamierino di acciaio nichelato. La f.e.m. degli accumulatori alcalini al nichel all'inizio scarica è:

al ferro-nichel $1,45 \div 1,50$ V

al cadmio-nichel $1,35 \div 1,40$ V

La f.e.m. di un accumulatore alcalino è misurata dalla sua tensione a circuito aperto ed il suo valore è una funzione delle reazioni chimiche che avvengono nelle sue materie attive durante le operazioni di carica e scarica. Questi accumulatori presentano il vantaggio di una singolare robustezza e semplicità di costruzione.

La loro durata è illimitata (dipende soltanto dalla loro distruzione meccanica) perchè l'elettrolito non prende parte alle reazioni chimiche cioè agisce solo da veicolo agli ioni senza combinarsi o disciogliersi i metalli o gli ossidi, perchè mentre viene decomposto ad un polo si ricostituisce contemporaneamente all'altro (l'elettrolito rimane dunque un elemento costante). Per questa sua perfetta reversibilità nelle reazioni elettrolitiche, l'elettrolito preserva, anzichè corrodere, le parti con le quali è a contatto.

Gli accumulatori al nichel, la cui manutenzione è trascurabile, possono venir sovraccaricati o scaricati a qualunque regime fino a completo esaurimento, possono essere lasciati inattivi senza inconvenienti per lunghi periodi, si possono invertire le loro polarità o mettere in corto circuito gli elettrodi senza che si abbiano a presentare i lamentati inconvenienti degli accumulatori al piombo, inoltre lo stato di carica si conserva durante lunghissimi periodi.

Questi accumulatori alcalini presentano maggiore elasticità e sicurezza di funzionamento, sono indicatissimi come accumulatori di trazione.

Il campo di applicazione degli accumulatori al nichel è però limitato per:

a) il loro alto costo (circa triplo rispetto all'accumulatore al piombo di pari capacità);

b) il loro basso rendimento;

c) il decrescente valore della tensione ai loro morsetti che continuamente diminuisce durante la scarica. La variazione della tensione è

di circa del 30% tra l'inizio e la fine scarica (invece negli accumulatori al piombo la tensione si mantiene praticamente costante per circa $\frac{2}{3}$ del periodo di scarica).

Risultano dunque, gli accumulatori alcalini, tecnicamente inferiori agli accumulatori al piombo.

Capacità degli accumulatori.

La capacità, comunemente indicata in amperora (Ah) è la quantità di elettricità ($Q = I t$) che l'accumulatore è in grado di erogare durante la scarica dopo aver ricevuto una carica completa.

La capacità variabile secondo il tipo di accumulatore (da 3 a 12 Ah per ogni kg di piastra) dipende dall'intensità della corrente di scarica: a scariche più lente corrispondono capacità maggiori.

Generalmente le Case costruttrici danno la capacità per una durata di scarica di 5 ore.

Se la scarica ha una durata diversa delle normali 5 ore varia, di conseguenza, la capacità dell'accumulatore. I nuovi valori della capacità in Ah ai vari regimi di scarica si ottengono, con buona approssimazione, moltiplicando la capacità di targa dell'accumulatore al piombo per i seguenti coefficienti:

regime: 1 ora	3 ore	5 ore	10 ore	20 ore
0,65	0,90	1	1,15	1,25

Rendimento degli accumulatori.

L'accumulatore, mentre viene caricato, trasforma l'energia elettrica in energia chimica e durante la scarica ritrasforma l'energia chimica in energia elettrica. Naturalmente le due trasformazioni implicano una perdita di energia dovuta all'effetto termico conseguente alla circolazione della corrente nell'elettrolito.

Il rapporto $\frac{\text{Ah erogati alla scarica}}{\text{Ah assorbiti alla carica}}$ si chiama: *rendimento in quantità*.

90% ÷ 95%	negli accumulatori al piombo
65% ÷ 70%	* * * cadmio-nichel
60% ÷ 65%	* * * ferro-nichel

Il rapporto $\frac{\text{Wh erogati alla scarica}}{\text{Wh assorbiti alla carica}}$ si chiama: *rendimento in energia*.

75 % ÷ 80 %	negli accumulatori al piombo
55 % ÷ 60 %	» » » cadmio-nichel
50 % ÷ 55 %	» » » ferro-nichel

Il costo dell'energia elettrica fornita da un accumulatore è evidentemente superiore al costo dell'energia fornita dal generatore primo che lo ha caricato.

Si ricorre, pertanto, all'uso degli accumulatori per alimentare circuiti elettrici ai quali si richiede sicurezza di funzionamento e cioè: l'illuminazione delle vetture tranviarie e ferroviarie, l'avviamento e l'illuminazione degli autoveicoli, per azionare i motori elettrici dei sommergibili in immersione, come batterie di emergenza per assicurare un'illuminazione di riserva nei teatri, nei cinematografi, nelle banche, nelle sale operatorie degli ospedali, come sorgente di energia nelle centrali telefoniche, per azionare i comandi elettrici nelle stazioni ferroviarie, ecc.

Collegamento dei generatori elettrici (accumulatori, ecc.).

a) **Collegamento in serie.** — Si chiama collegamento in serie di più accumulatori la catena formata collegando il polo positivo del primo accumulatore con il polo negativo del secondo, quello positivo del secondo con il negativo del terzo e così via in modo che restino liberi il negativo del primo ed il positivo dell'ultimo a costituire i poli della serie (chiamata « batteria in serie » nel caso degli accumulatori, ved. fig. 48).

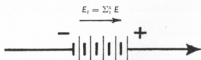


Fig. 48 - Collegamento in serie.

Si ricorre al collegamento in serie quando necessiti una f.e.m. più elevata di quella che può generare un solo elemento.

Le f.e.m. generate nei singoli accumulatori (E) sono così tutte dirette nello stesso verso e quindi la f.e.m. totale (E_t) è somma delle singole f.e.m.

$$E_t = \sum_1^n E$$

(n = numero degli accumulatori in serie)

La corrente erogata dalla batteria coincide con quella che può fornire un solo accumulatore. (Con accumulatori uguali la capacità della batteria è quella di un suo elemento).

b) Collegamento in parallelo. — Si ottiene il collegamento in parallelo di più accumulatori (che generino la stessa f.e.m.) se si collegano tra loro i poli omonimi i quali sono anche i poli del sistema (ved. fig. 49).

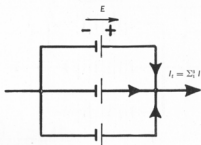


Fig. 49 - Collegamento in parallelo.

Si ricorre al collegamento in parallelo quando necessiti una corrente (I_t) maggiore di quella che può erogare un solo accumulatore (I).

$$I_t = \sum I$$

(Più accumulatori in parallelo costituiscono un solo elemento avente una superficie di piastra somma delle superfici delle piastre dei singoli accumulatori).

Con il collegamento in parallelo di più accumulatori uguali, la f.e.m. del sistema è la f.e.m. di un elemento e la capacità della batteria risulta uguale alla somma delle capacità dei singoli elementi (¹).

(¹) Nel collegamento in serie, i diversi generatori possono avere f.e.m. anche differenti tra loro ma è indispensabile che ognuno sia atto a sopportare la comune corrente che percorre l'intera serie mentre nel collegamento in parallelo i generatori possono erogare correnti anche diverse tra loro ma devono essere uguali le loro f.e.m.

Se le f.e.m. dei generatori collegati in parallelo non fossero uguali verrebbero a circolare, a circuito esterno aperto, delle dannose correnti interne fonti di inutile consumo di energia e di sviluppo di calore.

Infatti gli accumulatori collegati in parallelo formano tra loro, a coppie,

c) **Collegamento misto** (in serie-parallelo ved. fig. 50). — Si ottiene una f.e.m. uguale a quella di uno dei gruppi in serie (ogni gruppo deve essere costituito da un uguale numero di elementi in serie fra loro uguali) ed un'intensità di corrente somma delle intensità erogate dai gruppi in parallelo.

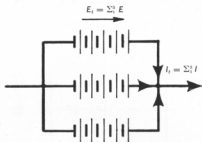


Fig. 50 - Collegamento serie-parallelo.

Esercizio. Una batteria di accumulatori al piombo (ved. fig. 51) deve alimentare, per sei ore, una linea alla tensione di 125 V che assorbe un'intensità di corrente di 20 A.

Determinare il numero degli elementi necessari e la loro capacità.

Al principio della scarica la tensione di un elemento si considera di 2 V ⁽¹⁾. Il numero degli elementi sufficienti all'inizio della scarica risulta:

$$125 : 2 = 63 \text{ circa}$$

Tensione finale di scarica: 1,8 V per elemento (se la scarica avviene a regime lento ⁽²⁾). Corrispondentemente il numero degli elementi in serie è:

$$125 : 1,8 = \div 70$$

tanti circuiti chiusi nei quali le f.e.m. sono in opposizione: agirà in questi la differenza delle loro f.e.m.

Invece a circuito esterno chiuso si vengono, a sovraccaricare i generatori di f.e.m. maggiore (nel considerato collegamento in parallelo quando vi agiscono f.e.m. disuguali).

⁽¹⁾ Le Norme C.E.I. assegnano in 2 V il valore della *tensione convenzionale* di un accumulatore al piombo.

⁽²⁾ Quando invece la batteria viene scaricata a regime rapido, ad es. in 1 ora, la tensione finale di scarica è di 1,7 V per elemento.

Un opportuno « inseritore » (apparecchio costituito da una serie di contatti di rame disposti generalmente ad arco di cerchio, isolati tra loro, ognuno dei quali è in comunicazione, mediante adatto conduttore, con l'elettrodo positivo di un accumulatore) permette di escludere, all'inizio della scarica, gli elementi esube-

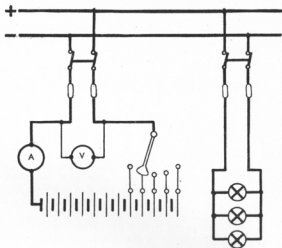


Fig. 51.

ranti 70 — 63 = 7 per poi includerli progressivamente durante la scarica affinché la tensione in linea resti costante.

Capacità di ogni accumulatore $20 \times 6 = 120$ Ah.

Determinata la capacità in base all'intensità di scarica ed alla durata di questa, si sceglie il tipo adatto di accumulatore consultando i listini delle Ditte fabbricanti.



CAPITOLO IV

ELETTROSTATICA E CONDENSATORI

Nozioni di elettrostatica.

Ci è noto che se applichiamo una tensione agli estremi di un conduttore, questo viene percorso da una corrente. Sezioniamo verso la metà questo conduttore in tensione, con ciò interrompiamo il circuito: non circherà più corrente. Notiamo che fra gli estremi affacciati del conduttore in tensione si manifestano delle azioni speciali: il dielettrico aria interposto è sede di *forze elettriche* emananti dalle cariche elettriche separate positive e negative addensatesi sulle superfici affacciate dei due spezzoni.

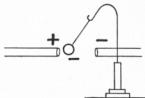


Fig. 52 - Forze elettriche.

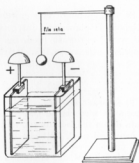


Fig. 53 - Campana elettrica.

Accertiamo ciò con una esperienza. Esploriamo questo spazio con una sferetta conduttrice (ved. fig. 52) isolata e carica di elettricità (si può caricarla facendola toccare per un istante con uno degli spezzoni in tensione sui quali si sono addensate le cariche elettriche), essa verrà at-

tratta dallo spezzone elettrizzato carico di elettricità di nome contrario e respinta dal corpo elettrizzato carico di elettricità dello stesso segno ⁽¹⁾.

La legge che regola le attrazioni e le repulsioni elettriche tra cariche elettriche venne scoperta da Coulomb nel 1785 in seguito a numerose esperienze da lui eseguite per mezzo della nota « bilancia di torsione ».

Indichiamo con q_1 e q_2 due quantità di elettricità (coulomb) supposte puntiformi e distanti d (metri) tra loro. La forza f (newton) con la quale le cariche elettriche si attirano (se q_1 e q_2 sono di segno contrario) o si respingono (se q_1 e q_2 sono dello stesso segno) è data dall'espressione:

$$F = \pm K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Il coefficiente K dipende dal mezzo.

La regione dello spazio in ogni punto del quale si risente la forza elettrica esplicata sull'unità di carica, si chiama *campo elettrico*.

Rigidità dielettrica.

Se aumentiamo oltre misura la tensione applicata ai due spezconi (elettrodi), l'isolante aria interposto fra gli estremi affacciati dei due elettrodi, verrà perforato (ved. fig. 54). Avremo dunque la scarica (*scarica disruptiva*) attraverso il dielettrico aria.

Si chiama *rigidità dielettrica* di un determinato materiale isolante

⁽¹⁾ **Campana elettrica.** Su questo principio si basa il funzionamento della campana elettrica che ad Oxford (Inghilterra) funziona da oltre un secolo. Sostenuta da un filo isolante (es. un filo di seta), si sospenda una sferetta metallica, con funzione di battaglio, fra due campanelle che per essere collegate ai poli di una pila (ved. fig. 53) risultano l'una carica di elettricità positiva e l'altra negativa. Se accostiamo la sferetta ad una campanella, il battaglio si caricherà di elettricità dello stesso nome della campanella toccata, verrà perciò da essa respinto ma attratto dalla campanella affacciata perchè carica di elettricità di nome contrario. Risultato: il battaglio colpirà questa seconda campana. Con l'essere venuto a contatto con la seconda campana, il battaglio si caricherà adesso di elettricità dello stesso segno di questa. Si ripeterà così il fenomeno su descritto fino all'esaurimento della pila.

La scarica della pila è oltremodo lenta nel tempo purchè però sia il tutto perfettamente isolato.

quel valore della tensione, per un determinato spessore, al quale ha inizio la scarica che è diversa da coibente a coibente ⁽¹⁾.

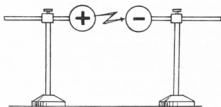


Fig. 54 - Scarica disruptiva.

Questo valore è anche funzione della forma degli elettrodi, della temperatura (la rigidità dielettrica decresce rapidamente con l'aumentare della temperatura) e della durata di azione delle forze elettriche.



Fig. 55 - Effetti elettrici causati da una nube temporalesca carica di elettricità.

Valori medi della rigidità dielettrica di alcuni isolanti: aria secca 2 ÷ 3 kV/mm, carta (di cellulosa) 40 kV/mm circa, ecc.

Condensatori

Un condensatore è costituito da due corpi conduttori (es. due lamine metalliche) affacciati ed isolati fra loro da un dielettrico (aria o qualunque sostanza isolante solida o liquida); i due corpi conduttori sono chiamati *armature del condensatore*.

⁽¹⁾ Similmente si può avere una scarica tra una nube carica di elettricità e la terra. La nube richiama dal suolo cariche elettriche di nome contrario (ved. fig. 55) che si addensano su punti più prossimi alla nube (cime di alberi, sommità di torri, ecc.). Queste cariche elettriche separate creano una d.d.p. che, raggiunto un determinato valore, provoca una scarica (fulmine).

Con l'applicare una d.d.p. alle armature del condensatore vengono a sottrarsi degli elettroni da una armatura, questi elettroni si trasferiscono (in eccesso) sull'altra armatura. Nell'armatura collegata al polo + del generatore si distribuirà una carica positiva ed in quella collegata al polo - una uguale carica negativa (ved. fig. 56).

Queste cariche elettriche + e - che si stabiliscono sulle armature, costituiscono la *carica Q del condensatore* origine del campo elettrico che si viene a manifestare nel dielettrico interposto fra le armature. La carica *Q* di un condensatore è la quantità di elettricità (coulomb o amperesecondi) che si stabilisce in ciascuna delle due armature, quantità uguale l'una all'altra e di segno contrario.

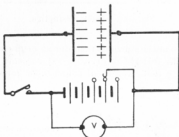


Fig. 56 - Carica di un condensatore.

Le armature del condensatore conservano carica e tensione anche dopo aperto il circuito di alimentazione.

Applichiamo successivamente diversi valori di tensione alle armature, l'esperienza ci insegna che ad ogni valore della tensione applicata corrisponde una carica *Q* ben determinata e che rimangono sempre costanti (per ogni condensatore) i rispettivi rapporti *Q : V* fra carica e tensione.

Questo rapporto $\frac{\text{coulomb}}{\text{volt}}$ viene assunto a definire la *capacità C* del condensatore:

$$C = \frac{Q}{V}$$

L'unità di misura della capacità si chiama *farad* (in memoria del fisico Faraday) e si indica con il simbolo F.

Questa unità si ottiene dalla sua stessa definizione: 1 farad = $\frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$.

« Un condensatore ha la capacità di 1 farad quando, applicando la tensione di 1 V alle sue armature, esse assumono la carica di 1 coulomb ».

In pratica un simile condensatore è irrealizzabile.

Dunque l'unità F è troppo grande; si usano i suoi sottomultipli.

Microfarad ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$); millimicrofarad ($1 \text{ m}\mu\text{F} = 10^{-9} \text{ F}$).

In radiotecnica si usa il *picofarad* ($1 \text{ p}\mu\text{F} = 10^{-12} \text{ F}$).

Costante dielettrica.

L'esperienza insegna che la capacità di un condensatore ad armature piane è:

1) direttamente proporzionale alla superficie affacciata delle armature (S);

2) inversamente proporzionale alla loro distanza (d);

3) dipende dal dielettrico interposto fra le armature.

Indicando con ε (epsilon) questa sua dipendenza, concluderemo:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Poniamo nella suddetta formula $S = 1 \text{ m}^2$, $d = 1 \text{ m}$, deduciamo che ε rappresenta la capacità di un condensatore a superfici piane affacciate dove $S = 1 \text{ m}^2$, $d = 1 \text{ m}$.

ε è chiamata *costante dielettrica*. La sua unità di misura si ricava dalla formula dimensionale, $\varepsilon = \frac{\text{farad}}{\text{metro}}$

La costante dielettrica per il vuoto è:

$$\varepsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

(valore praticamente uguale anche per l'aria).

Per tutti gli altri dielettrici, solidi o liquidi, il corrispondente valore di ε è maggiore di ε_0 . I manuali danno i valori della *costante dielettrica relativa* (ε_r), definita dal rapporto:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Es. Mica $\varepsilon_r = 8$; carta bakelizzata $\varepsilon_r = 5$; olio per trasformatori $\varepsilon_r = 2$.

Collegamento dei condensatori.

In serie.

In una batteria di condensatori collegati in serie ⁽¹⁾, si verifica:

a) ogni condensatore assume la stessa carica Q ⁽²⁾;

b) la tensione totale V risulta uguale alla somma delle singole tensioni parziali $V_1, V_2, V_3 \dots V_n$ che si manifestano alle armature di ogni condensatore. Dunque:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

(se con n indichiamo il numero dei condensatori costituenti la batteria).

Si abbiano tre condensatori di capacità C_1, C_2, C_3 , rispettivamente (ved. fig. 57).

Per la a) si ottengono le tre uguaglianze:

$$Q = C_1 V_1 \text{ da cui } V_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$Q = C_2 V_2 \text{ » » } V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$Q = C_3 V_3 \text{ » » } V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

che sommate membro a membro ci danno:

$$V_1 + V_2 + V_3 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

Fig. 57 - Condensatori collegati in serie.

Per la b) si ha pure:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V$$

⁽¹⁾ Due o più condensatori si dicono *collegati in serie* quando un'armatura del primo è collegata ad un'armatura del secondo, la restante armatura del secondo è collegata ad un'armatura del terzo e così di seguito.

Le due armature estreme del sistema costituiscono i due poli della batteria ai quali viene applicata la tensione di carica.

⁽²⁾ Tutti i condensatori della serie assumono sulle rispettive armature, la stessa carica Q indipendentemente dai valori delle capacità $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$ dei corrispondenti condensatori.

cioè:

$$V = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

da cui:

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Se al posto di tre condensatori sostituiamo un unico condensatore di capacità C_b equivalente ai tre in serie (che dunque assuma la stessa carica Q se sottoposto alla stessa tensione V) si ottiene:

$$\frac{Q}{V} = C_b$$

Dal confronto dei secondi membri delle due equazioni ricaviamo:

$$C_b = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad \text{ed in generale} \quad C_b = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

« La capacità del condensatore equivalente di più condensatori in serie è uguale al reciproco della somma dei reciproci delle capacità dei singoli condensatori ».

Inoltre i valori delle tensioni applicate ai morsetti dei singoli condensatori risultano inversamente proporzionali alle loro rispettive capacità.

Si verifica, dunque, che il condensatore di minor capacità è sottoposto alla tensione più elevata.

Se i condensatori costituenti la batteria hanno uguale capacità C , risulta:

$$C_b = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots + \frac{1}{C}} = \frac{1}{n}$$

cioè:

$$C_b = \frac{C}{n}$$

Dunque, nel caso che i condensatori abbiano tutti uguale capacità:

a) la capacità totale si calcola dividendo la capacità di un singolo condensatore per il numero dei condensatori costituenti la batteria;

b) le tensioni parziali ai morsetti dei singoli condensatori, risultano uguali fra loro.

In parallelo.

Si abbiano tre condensatori di rispettive capacità C_1 , C_2 , C_3 collegati in parallelo (ved. fig. 58).

Essi, sottoposti alla medesima tensione V , assumono ordinatamente le cariche:

$$Q_1 = C_1 V; \quad Q_2 = C_2 V; \quad Q_3 = C_3 V$$

Sommando membro a membro queste uguaglianze, si ottiene:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) V$$

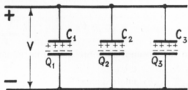


Fig. 58 - Condensatori collegati in parallelo.

Se al sistema dei tre condensatori in parallelo sostituiamo un unico condensatore di capacità C_b equivalente al sistema (che perciò deve assumere la carica $Q_b = Q_1 + Q_2 + Q_3$ se sottoposto alla stessa tensione), si ottiene:

$$Q_b = C_b V$$

Dal confronto dei secondi membri si ha:

$$C_b = C_1 + C_2 + C_3$$

ed in generale:

$$C_b = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Se abbiamo una batteria costituita da condensatori tutti di uguale capacità, risulta:

$$C_b = n C$$

CAPITOLO V

MAGNETISMO ED ELETTROMAGNETISMO

Poli delle calamite.

È noto che le *calamite* o *magneti permanenti* si ottengono dal minerale *magnetite* (Fe_3O_4 , ossido di ferro cristallizzato) e che dal contatto di un pezzo di acciaio con uno di questi magneti, pure il pezzo di acciaio diventa una calamita.

Le calamite d'acciaio sono chiamate *calamite artificiali* per distinguerle da quelle costituite con il minerale Fe_3O_4 chiamate *calamite naturali*.

Le calamite (comunemente foggiate sia a prisma, ved. fig. 59, sia a ferro di cavallo, ved. fig. 60) manifestano ai loro estremi la proprietà di attirare dei piccoli oggetti ferrosi e della limatura di ferro.

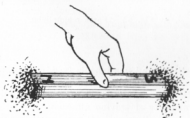


Fig. 59 - Calamita prismatica.

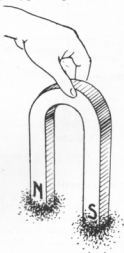


Fig. 60 - Calamita a ferro di cavallo.

Queste due estremità dalle quali maggiormente emana l'azione attrattiva, si chiamano *poli* della calamita.

Sospendiamo orizzontalmente una sbarretta calamitata ad un filo di seta, noteremo che uno dei poli della calamita si orienta costantemente verso il nord geografico per l'azione orientatrice che la terra esercita sulle calamite (ved. fig. 61).

Per convenzione si chiama *polo nord* l'estremità della calamita che si volge costantemente verso il nord geografico e *polo sud* l'opposto, rivolto verso il sud geografico.

La retta che passa per i centri dei due poli magnetici si chiama *asse magnetico* della calamita ed il piano verticale che passa per l'asse magnetico (quando la calamita è in equilibrio sotto l'azione orientatrice della terra) si chiama *meridiano magnetico*.

È noto che l'asse magnetico dell'ago di una bussola non si dirige esattamente dal sud al nord geografico.

L'angolo che il meridiano magnetico forma con il meridiano geografico, variabile da luogo a luogo, si chiama *declinazione magnetica* (a Roma è di circa 4° verso occidente e diminuisce di alcuni primi ogni anno).

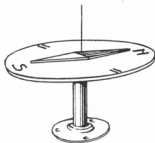


Fig. 61 - Principio della bussola.

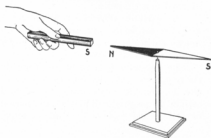


Fig. 62 - Forze magnetiche.

Forze magnetiche.

Avviciniamo un magnete rettilineo ad una bussola (ved. fig. 62), noteremo che l'ago della bussola devia: il suo asse magnetico tende a disporsi sulla direttrice dell'asse del magnete e nel senso che i poli di nome contrario dell'uno e dell'altro magnete si trovino affacciati.

Dunque « poli magnetici di nome diverso si attirano e poli magnetici dello stesso nome si respingono ».

Deduciamo che una massa magnetica esercita delle azioni a distanza,

emana delle forze che vengono chiamate « forze magnetiche » perchè agiscono fra corpi magnetizzati ⁽¹⁾.

La regione dello spazio sede di queste forze magnetiche si chiama: *campo magnetico*.

Campo magnetico.

Per rivelare l'orientamento, per materializzare il tracciato di queste forze magnetiche nello spazio, adagiamo un foglio di carta oppure una lastra di vetro sopra due magneti foggianti l'uno a prisma e l'altro a ferro di cavallo e spargiamo su questa della limatura di ferro (ved. fig. 63 a). Dopo aver coperto tutta la lastra con un velo di limatura, picchiamoci sopra leggermente: si ottengono gli *spettri magnetici* (ved. fig. 63 b) ove la limatura di ferro riproduce i diversi tracciati delle linee di forza magnetica. Togliamo la lastra di vetro ed esploriamo il campo prodotto dal magnete ad asse rettilineo per mezzo dell'ago di una bussola (ved. fig. 64). Quest'ago magnetico si orienterà nella direzione delle linee di forza del campo e nel senso convenzionale che queste linee di forza magnetica entrano per il polo sud dell'ago magnetico ed escono dal suo polo nord.

Dunque, per convenzione: « le linee di forza magnetica escono dal « polo nord di un magnete e rientrano per il polo sud ».

Da notare che queste configurazioni si ottengono, come già si è detto, picchiando leggermente sul vetro. Perchè dobbiamo picchiare? Per dare una certa mobilità alle pagliuzze di ferro vincendo così l'attrito che impedirebbe il loro spostamento. Negli spettri magnetici la limatura materializza queste linee per cui le vediamo separate le une dalle altre. Non bisogna con ciò concludere che negli spazi fra l'una e l'altra linea tracciata dalla limatura non ci siano linee di forza magnetica, ma anzi, tutto lo spazio che noi osserviamo è coperto da linee di forza che si riveleranno qualora picchissimo ulteriormente, permettendo così alla limatura di spostarsi nuovamente.

In generale, per rappresentare linee di forza magnetica servendosi del disegno, è sufficiente tracciare solo alcune di queste linee di forza.

⁽¹⁾ L'intensità della forza magnetica F con la quale due poli di massa magnetica m_1 ed m_2 rispettivamente si attirano o si respingono se posti alla distanza d (metri) è data dalla legge di Coulomb (ved. pag. 64).

$$F = K \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

Il valore del coefficiente K dipende dal mezzo nel quale le masse magnetiche sono poste.

Perchè mai le pagliuzze di ferro (limatura) si orientano nella direzione delle linee di forza magnetica?

Il fenomeno si spiega con il fatto che il ferro, sotto l'azione del campo magnetico generato dal magnete (magnete induttore) si magnetizza per

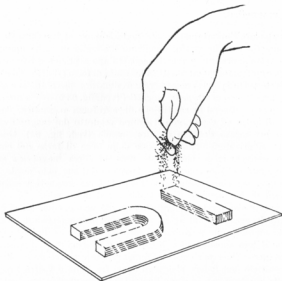


Fig. 63 a - Per ottenere spettri magnetici.

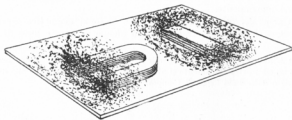


Fig. 63 b - Spettri magnetici.

influenza (*induzione magnetica*). Di conseguenza le pagliuzze diventano esse pure dei magnetini che soggiacciono perciò alle azioni attrattive tra polarità di nome diverso.

Ciò spiega perchè tutti i corpi che hanno le proprietà di magnetizzarsi per induzione (corpi che si chiamano *materiali magnetici*) subiscono l'attrazione dei corpi magnetizzati, magnetizzandosi a loro volta per induzione magnetica.

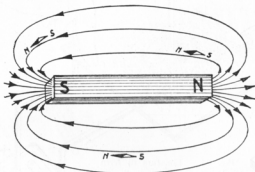


Fig. 64 - Tracciato delle linee di forza magnetiche.

Campi magnetici generati da corrente.

Il fisico danese Oersted constatò, nel 1820, che un ago magnetico posto in vicinanza di un conduttore percorso da corrente, devia e tende a disporsi normalmente al conduttore (ved. fig. 19) e che se si inverte il senso della corrente pure si inverte la deviazione dell'ago magnetico.

Dunque la corrente elettrica crea un campo magnetico nello spazio ad esso circostante.

Le linee di forza magnetica generate dalla corrente vengono rivelate dallo spettro magnetico che si ottiene cospargendo di limatura di ferro una lastra di materiale coibente (es. una lastra di vetro) munita di foro centrale ed attraversato dal conduttore ad essa normale (ved. fig. 65).

Si osserva che la limatura si dispone in filetti circolari concentrici al conduttore (al passaggio di un'intensa corrente e dopo aver picchiato leggermente sul vetro) perchè le pagliuzze di ferro, magnetizzandosi per induzione, diventano dei magnetini che si orientano nella direzione delle linee di forza rivelandone il tracciato.

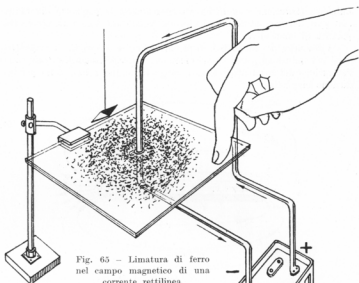


Fig. 65 - Limatura di ferro nel campo magnetico di una corrente rettilinea.



Fig. 66 - Regola del cavaturaccioli per determinare il senso delle linee di forza.

Il senso di queste linee di forza magnetica è legato al verso della corrente.

Per stabilire, nello spazio, il senso delle linee di forza magnetica dovute ad una corrente elettrica, avviciniamo al conduttore percorso da corrente l'ago di una bussola: l'ago stesso si orienterà nella direzione delle tangenti ai cerchi concentrici al conduttore, tracciati nei piani ad esso normali e nel senso definito dalla regola di « Maxwell » (ved. fig. 66) o « del cavaturaccioli »:

« Il senso delle linee di forza magnetica circolari che contornano un conduttore percorso da corrente è quello

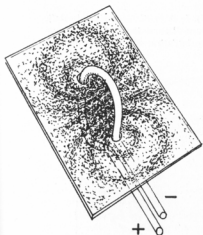


Fig. 67 - Spettro magnetico di una spira.

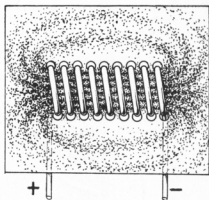


Fig. 68 - Spettro magnetico di un solenoide.

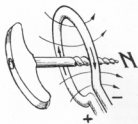


Fig. 69 - Determinazione del senso delle linee di forza di una spira.

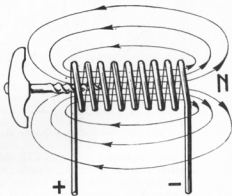


Fig. 70 - Determinazione delle polarità di un solenoide.

« secondo cui ruota un cavaturaccioli coassiale al conduttore che
« avanza nel verso della corrente ».

Se inviamo corrente in una spira ⁽¹⁾, le linee di forza rivelate dallo spettro magnetico (ved. fig. 67) contornano il conduttore ed escono condordi da una delle sue facce rientrando dall'altra. Si generano due polarità magnetiche.

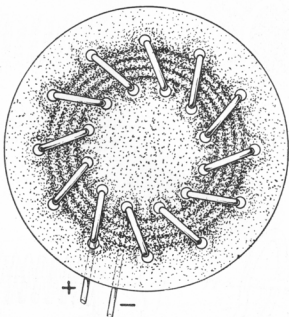


Fig. 71 - Spettro magnetico di un solenoide toroidale.

Se avvolgiamo a guisa d'elica cilindrica un conduttore otteniamo un *solenoido* o *bobina* (costituita, dunque, da più spire in serie).

Nell'interno del solenoide le linee di forza generate dalla corrente e rivelate dallo spettro magnetico (ved. fig. 68), si sommano, hanno direzione assiale e manifestano due polarità magnetiche alle estremità del solenoide.

⁽¹⁾ Spira: conduttore piegato ad U.

Il senso delle linee di forza entro la spira (ved. fig. 69), od entro il solenoide (ved. fig. 70), è indicato dal senso secondo cui avanza un caturaccioli coassiale e rotante nel verso della circolazione della corrente.

Per convenzione si chiama *polo nord* l'estremità dalla quale escono le linee di forza magnetica e *polo sud* l'estremità opposta nella quale le linee di forza rientrano chiudendosi su se stesse.

Avvolgiamo con continuità un filo metallico su una corona circolare. Otterremo un solenoide toroidale sede di campi magnetici molto intensi al passaggio di una corrente (ved. lo spettro magnetico di fig. 71).

Lo spazio circostante al toro è praticamente privo di linee di forza magnetica. Il solenoide toroidale è un solenoide senza poli, esso costituisce un circuito magnetico chiuso.

Dunque si possono creare, per mezzo di spire o di solenoidi percorsi da correnti, campi magnetici identici a quelli creati da magneti permanenti. Basta sostituire alla spira l'equivalente *lamina magnetica* (avente uguale spessore del conduttore formante la spira ed uguale suo contorno) o sostituire al magnete di acciaio un conveniente solenoide.

Anzi, inviando adatte correnti nel solenoide, otterremo campi magnetici ben più intensi di quelli ottenibili per mezzo di magneti permanenti.

L'elettrone orbitale.

Si consideri una carica elettrica applicata alla periferia di un disco costituito da materiale coibente (ad es. vetro ved. fig. 72).

Tale carica *statica* genera un campo elettrico le cui linee di forza si dipartono, da essa, radialmente. Se invece si imprime al disco una veloce rotazione (vedi fig. 73) ne consegue che la massa elettrica applicata al bordo del disco acquista una elevata velocità.

Sappiamo che cariche elettriche in movimento costituiscono una corrente elettrica e siccome questa massa elettrica percorre, nel suo movimento, una circonferenza, si ha che la sua azione magnetica è assimi-

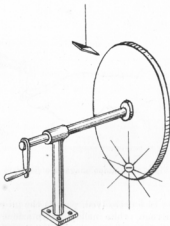


Fig. 72 - Linee di forza di una carica elettrica « statica ».

labile a quella di una spira percorsa da corrente ⁽¹⁾ (effetto Rowland che per rendere più evidente il fenomeno considera sede di cariche elettriche l'intero bordo del disco).

Per sincerarsene poniamo in prossimità della carica elettrica l'ago magnetizzato di una bussola: in assenza di movimento della carica l'ago non devia dalla sua normale posizione (ved. fig. 72) determinata dal campo magnetico terrestre mentre, al rotare del disco l'ago devia (ved. fig. 73), perchè all'azione del campo magnetico terrestre si somma l'azione del campo magnetico generato dalla carica elettrica in movimento ⁽²⁾.

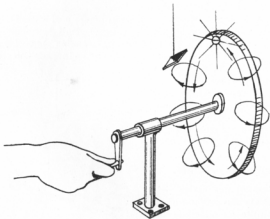


Fig. 73 - Campo magnetico generato da cariche elettriche in movimento.

Si è detto (ved. pag. 1) che gli elettroni periferici di ogni atomo descrivono orbite nella loro rotazione attorno al nucleo.

Possiamo, dunque, sostituire al concetto dell'elettrone orbitale la

⁽¹⁾ L'intensità della corrente in amperes determinata dallo spostamento di una carica elettrica Q (coulomb) applicata alla periferia del disco, è $Q \times n$ ove n indica il numero dei giri al secondo del disco.

⁽²⁾ La carica elettrica in movimento oltre che contornarsi di linee magnetiche, porta con sé il proprio campo elettrico.

corrente elettronica ⁽¹⁾ originata dall'elettrone in moto ed equivalente, agli effetti magnetici, ad una spira chiusa (ved. fig. 74) percorsa dalla corrente elettronica ed avente il contorno dell'orbita.

Il momento magnetico della spira ⁽²⁾ equivale al momento della lamina magnetica ⁽³⁾ od a quella di un corrispondente magnete elementare ⁽⁴⁾, ved. fig. 75.

Dunque, come rimarcò Ampère, non esiste differenza tra una corrente elettronica ed un magnete elementare.

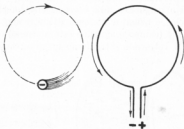


Fig. 74 - Elettrone orbitale e spira equivalente.

L'esistenza di correnti elettroniche nell'atomo, fa intendere il comportamento magnetico della materia: è l'elettrone orbitale la causa intima del magnetismo nei corpi.

⁽¹⁾ L'intensità della corrente elettronica è la quantità di elettricità che attraversa una sezione del circuito orbitale in un minuto/secondo.

Sia e la carica elettrica elementare dell'elettrone (espressa in coulomb) che compie n giri/secondo.

L'intensità i della corrente elettronica è data dal prodotto:

$$i = e \times n$$

⁽²⁾ La corrente elettronica i abbracciante un'area nucleare S determina un momento magnetico elementare M di valore $i \times S$.

⁽³⁾ Per momento magnetico di un magnete si intende il prodotto della sua massa magnetica polare per la lunghezza del magnete.

Perciò la lamina magnetica elementare di masse magnetiche $+m$ e $-m$, distanti d tra loro, ha per momento magnetico il prodotto $m \times d$.

⁽⁴⁾ Il momento magnetico, come detto, è un prodotto di una massa per una lunghezza.

È perciò indifferente considerare la lamina magnetica od un magnete elementare di diverse dimensioni purchè entrambi di uguale momento magnetico

A conclusione possiamo affermare che i fenomeni magnetici traggono origine da elettroni in movimento, cioè da correnti: correnti elettriche nei conduttori, correnti elettroniche nell'atomo.

Si è accennato (ved. pag. 1) che le orbite degli elettroni giacciono in piani diversi tutti passanti per il centro dell'atomo.

È come se entro ciascun atomo esistessero, al posto degli elettroni rotanti, tanti magneti elementari, immateriali, diversamente orientati tra loro e con i rispettivi assi tutti passanti per il centro dell'atomo. Per il fatto della diversa orientazione di questi supposti magneti equivalenti, per l'effetto magnetico, alle correnti elettroniche entro l'atomo, si può verificare che le azioni a distanza di detti magneti elementari si elidano mutualmente (campo magnetico esterno nullo) oppure che queste azioni, sommandosi vettorialmente, diano luogo ad una certa risultante.

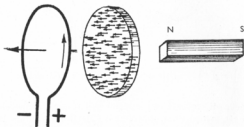


Fig. 75 - Equivalenza tra spira, lamina magnetica e magnete.

Nel primo caso i materiali (allo stato naturale) non manifestano azioni magnetiche, nel secondo caso i materiali (es. magnetite) danno luogo ad effetti magnetici.

(ad es. un magnete elementare avente lunghezza 10 volte lo spessore della lamina ma sezione un decimo, ecc.).

Accenniamo che il momento magnetico è un vettore definito in grandezza dal valore di M e che ha per argomento l'orientazione del segmento congiungente $-m$ con $+m$.

Accenniamo pure che l'elettrone, od il gruppo di elettroni di un determinato livello interatomico, hanno un momento magnetico funzione del livello energetico che occupano e dell'atomo di cui fanno parte e che i loro momenti magnetici si esprimono con quantità multiple di una grandezza elementare presa come unità di misura alla quale fu dato il nome di «magnete di Bohr».

Corpi magnetici e diamagnetici.

Si abbiano più spire libere e comunque disposte nello spazio. Si investano queste spire con un intenso campo magnetico; le spire, se percorse da corrente, si orienteranno assialmente nella direzione di questo campo e nel verso per cui nel piano inserito in ogni spira risultano cospiranti le linee di forza magnetica dei due campi: il campo generato entro ogni spira dalla corrente ed il campo magnetico in cui la spira è immersa.

Ne consegue una esaltazione dell'intensità di campo nella detta porzione di piano inserito in ogni spira per la sovrapposizione, in esso, dei due campi magnetici.

Un fenomeno simile accade se introduciamo un corpo ferroso in un campo magnetico; sotto l'azione del campo magnetizzante, « campo induttore », le orbite degli elettroni rotanti, che prima giacevano in piani tra loro diversi, tendono ad orientarsi nel piano perpendicolare alla direzione del campo induttore e di queste correnti elettroniche orientate, entro il corpo, consideriamo quelle giacenti in una sezione normale al campo induttore.

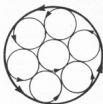


Fig. 76 - Corrente elettronica risultante.

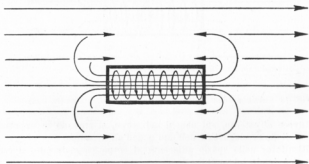


Fig. 77 - Corpo magnetico immerso in un campo magnetico.

Tutte queste correnti elementari equivalgono, agli effetti magnetici, ad un'unica corrente elementare che le abbraccia tutte, ved. fig. 76, (infatti nel suo interno le correnti elettroniche si elidono vicendevolmente, equivalgono dunque, ad un'unica corrente elettronica periferica).

Con tale ipotesi applicata a tutte le sezioni trasversali è come se il corpo fosse contornato da un sistema di spire a passo ravvicinato, percorse da correnti elettroniche, sedi di un campo magnetico orientato nella direzione del campo induttore e cospirante con esso: il corpo produce esso stesso un campo magnetico (campo indotto) che nel suo interno si sovrappone al campo induttore esaltandone l'intensità perchè il campo indotto, entro il corpo, ha senso concorde con il campo induttore (ved. fig. 77).

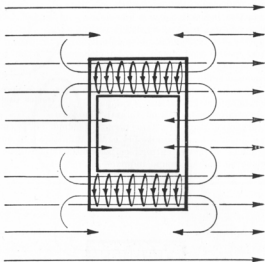


Fig. 78 - Azione schermante entro la cavità di un corpo magnetico.

Invece all'esterno, sui fianchi del corpo, si trovano in opposizione le linee di forza magnetica dell'uno e dell'altro campo.

Risultato: nello spazio adiacente al corpo magnetizzato, il campo magnetico tende ad annullarsi.

Introduciamo adesso un corpo ferroso cavo in un campo induttore (ved. fig. 78). Siccome nella cavità sono discordi le linee di forza dei due campi induttore ed indotto, non si hanno, praticamente, linee di forza magnetica nella sua cavità.

È questa la ragione per cui un materiale magnetico funziona da schermo magnetico. Correntemente si dice che detto materiale assorbe

le linee di forza del campo induttore, non le lascia passare nelle sue cavità interne.

Abbiamo pure dei corpi che non si magnetizzano perchè in essi non è possibile variare l'orientamento originario delle traiettorie elettroniche anche se sottoponiamo questi corpi all'azione di intensi campi induttori.

I primi corpi che acquistano proprietà magnetiche (ferro, acciaio, ghisa ed in misura minore il nichel ed il cobalto) si chiamano *corpi magnetici* ⁽¹⁾, i secondi *corpi diamagnetici* (rame, alluminio, vetro, carta, liquidi, ecc.).

Intensità del campo magnetico.

L'esperienza ci ha rivelato che nell'interno di bobine allungate (se si astrae dalle regioni terminali) percorse da corrente, il campo è sempre lo stesso in ogni punto ed il suo valore è legato all'eccitazione specifica, che è l'eccitazione (prodotto del numero N delle spire per l'intensità della corrente I) per unità di lunghezza della bobina.

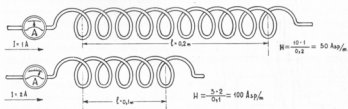


Fig. 79 - Esempi di calcolo dell'intensità di campi magnetici.

Da ciò è stato possibile e si è ritenuto conveniente misurare l'intensità del campo, che si è indicato con la lettera H , con l'eccitazione specifica che la determina:

$$H = \frac{N I}{l}$$

(l , lunghezza in metri della bobina).

⁽¹⁾ I corpi che foggianti a forma di sbarrette e sospesi in un campo magnetico si pongono paralleli alle linee di forza del campo induttore (perchè si magnetizzano) si chiamano *corpi paramagnetici* (o più semplicemente si designano con il nome di *corpi magnetici*). Fra questi hanno enorme importanza i *materiali ferromagnetici*.

Come campo unitario ($H = 1$) si è assunto il campo dato dall'eccitazione unitaria:

$$\frac{NI}{l} = 1$$

Dal fatto che l'intensità del campo H dipende dalle amperspire/metro (Asp/m), o amperspire specifiche, e non dalla sola intensità di corrente, concludiamo che si possono ottenere diversi valori di H variando sia uno o due oppure tutti e tre i fattori del secondo membro dell'equazione.

Flusso di induzione, induzione magnetica, permeabilità.

Ogni corpo sottoposto all'azione di una forza magnetica subisce una deformazione magnetica.

Tale deformazione magnetica che è una grandezza fisica che ha la stessa direzione e lo stesso verso della forza magnetica che la determina, costituisce il

flusso di induzione, flusso che si indica con la lettera Φ ⁽¹⁾ e se riferito all'unità di sezione retta (normale alle linee di induzione) assume il nome di *induzione magnetica*. L'induzione magnetica viene indicata con la lettera B .

L'esperienza ci ha rivelato che tutte le volte che variamo il flusso concatenato con un circuito si ha sempre un *impulso di tensione* ⁽²⁾.

Da ciò è stato possibile, e si è ritenuto conveniente, misurare il flusso con i valori degli impulsi di tensione determinati. All'impulso di tensione unitario ($E_m \cdot t = 1$), in onore a Weber, si è attribuito il suo nome.

Poichè il flusso si misura in weber (Wb), l'induzione magnetica si misura in Wb/m^2 .

Se ad es. con l'estrarre la spira dal campo di fig. 80 si ottiene un

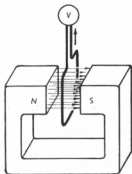


Fig. 80 - Misura della variazione del flusso concatenato mediante i valori degli impulsi di tensione.

⁽¹⁾ Φ lettera maiuscola dell'alfabeto greco. Leggasi « fi ».

⁽²⁾ L'impulso di tensione è il prodotto della f.e.m. media (E_m) che per induzione nasce nel circuito elettrico per il tempo t (secondi) durata della variazione.

impulso di tensione di 0,1 volt/secondi, si dirà che il flusso concatenato con la spira è di 0,1 Wb e se la spira ha una superficie di 0,1 m² si dirà che il campo ha un'induzione $B = 1 \text{ Wb/m}^2$.

L'esperienza inoltre ci ha rivelato che tale flusso di induzione, valutabile con la grandezza B ora definita, è funzione della forza magnetica valutabile con il campo H (forza magnetica riferita all'unità di massa magnetica) e che i valori di B per uno stesso valore di H , sono diversi da corpo a corpo.

Sussiste dunque, tra B ed H , la relazione:

$$B = \mu H$$

La grandezza magnetica μ ⁽¹⁾ (*permeabilità magnetica*) è costante per l'etere cosmico o per l'aria e per i materiali diamagnetici per i quali, perciò, la deformazione magnetica B è direttamente proporzionale alla forza magnetica H che la determina. A questa grandezza si è attribuito il simbolo μ_0 ⁽²⁾ (*permeabilità nel vuoto*).

Nei corpi paramagnetici, invece, la permeabilità μ non è costante se noi, per uniformità, ci riferiamo solamente al campo induttore H (il solo che agisce nei materiali diamagnetici). Se invece ci riferiamo al campo operante che è il campo risultante (che indicheremo con H_r), somma del campo induttore e del campo indotto dovuto all'orientamento delle correnti elettriche, campo risultante che determina B , possiamo introdurre nella formula generale ($B = \mu H$) il fattore μ_0 , ossia la permeabilità dell'etere cosmico, in luogo del fattore generico μ . E poichè il campo indotto è funzione del campo induttore a cui, grosso modo, quello è pro-

(1) μ lettera dell'alfabeto greco. Leggasi « mu ».

$$\text{La sua unità di misura si ricava dalla } \mu = \frac{B}{H} = \frac{\frac{\text{weber}}{\text{m}^2}}{\frac{\text{ampere} \cdot \text{spira}}{\text{m}}}$$

$\frac{\text{weber}}{\text{ampere}} \cdot \frac{1}{\text{metro}}$. All'unità corrispondente al rapporto $\frac{\text{weber}}{\text{ampere}}$ (come si dirà più avanti) si dà il nome di *henry*. Dunque le dimensioni della permeabilità sono: henry/metro.

(2) Dall'espressione analitica $B = \mu_0 H$ si deduce che μ_0 è l'induzione magnetica che si ha nel vuoto per il campo unitario cioè di una amperspira/metro.

Rappresenta dunque μ_0 il numero dei voltsecondi indotti in una spira di 1 m² disposta nell'aria e normalmente ad un campo dell'intensità di 1 amperspira/metro. Tale numero di voltsecondi risulta uguale a $1,256 \cdot 10^{-4}$.

porzionale, possiamo scrivere assumendo come grandezza la lettera χ ⁽¹⁾:

$$B = \mu_0 H_r = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 H (1 + \chi)$$

Confrontando questa espressione con la precedente ($B = \mu H$) si ricava:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

Chiamasi *permeabilità relativa* μ_r di un dato materiale, il rapporto tra la permeabilità assoluta del materiale considerato e μ_0 :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Curve di magnetizzazione.

Si abbia un circuito (alimentato a tensione costante) composto da un « reostato » (resistenza variabile) e da un solenoide (ved. fig. 81).

Manovrando il reostato varieremo la tensione applicata alla bobina, varierà di conseguenza il valore della corrente in essa circolante cioè, in definitiva, l'intensità H del campo magnetico induttore entro la bobina. Esploriamo il comportamento dell'aria (o di un materiale diamagnetico) nell'interno della bobina.

La funzione $B = \mu_0 H$ riferita ad un diagramma cartesiano che abbia per ascisse i valori di H e per ordinate i corrispondenti valori di B ⁽²⁾ viene rappresentata da una semiretta uscente dall'origine O e di poco inclinata sull'orizzonte (ved. fig. 82).

⁽¹⁾ χ lettera dell'alfabeto greco. Leggasi « chi ».

Al fattore χ si è attribuito il nome di *suscettività magnetica* perchè dal suo valore si desume la suscettibilità del materiale nell'orientare più o meno facilmente le orbite delle sue correnti elettroniche sotto l'azione del campo induttore H .

χ è in definitiva, il campo indotto per il campo induttore unitario.

⁽²⁾ Come si può misurare B ?

Sia dall'accennato impulso di tensione sia dalla variazione di resistenza che si verifica in una spirulina di bismuto se immersa in un campo di induzione B .

Infatti se introduciamo la spirulina di bismuto (la cui resistenza elettrica è dell'ordine di $10 \div 20$ ohm) in un campo di intensa induzione (di almeno $0,3$ Wb/m²), si nota che la resistività del conduttore di bismuto puro costituente la spirulina, aumenta del 5% circa per ogni decimo di aumento di B .

Basandosi su questo fatto vengono ricavate sperimentalmente le curve di taratura della spirulina, dalle quali si ricavano i valori di B in funzione dell'aumento relativo della resistività che si verifica nel conduttore di bismuto quando immergiamo la spirulina nel campo magnetico da esplorare.

Introduciamo un corpo ferroso nel solenoide.

Al campo magnetico dovuto alla corrente elettrica che percorre il solenoide si somma il coespiciente campo dovuto alle correnti elettriche determinando nel corpo l'induzione B .

A bassi valori di H le correnti elettriche entro il corpo ferro-magnetico iniziano ad orientarsi assialmente nella direzione del campo induttore e questo movimento di rotazione viene completato da valori più o meno modesti del campo H , a seconda cioè della natura del materiale ferro-magnetico impiegato nell'esperimento. Raggiunto il totale orientamento delle correnti elettriche, il campo indotto

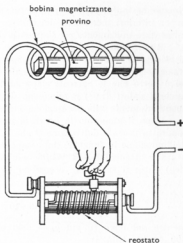


Fig. 81 - Magnetizzazione di un corpo ferromagnetico.

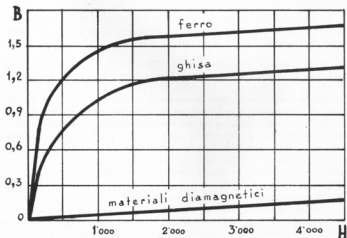


Fig. 82 - Curve di magnetizzazione.

rimane costante: si è raggiunta la *saturation magnetica* del materiale e per ulteriori incrementi del campo induttore, l'induzione B viene ad aumentare unicamente per l'aumento del campo induttore H .

Riportando la legge di variazione $B = \mu H$ sul diagramma di fig. 82 si ottengono le diverse *curve di magnetizzazione* relative ai materiali ferromagnetici in esame, curve che dopo un tratto di forte inclinazione (si è detto che le correnti elettroniche incominciano ad orientarsi con modesti valori di H) raggiungono dopo breve tratto il *ginocchio* (corrispondentemente alla saturazione magnetica).

Dopo il ginocchio la curva si raccorda ad una retta parallela alla semiretta uscente dall'origine O che ci rappresenta la legge di variazione dell'induzione in funzione del campo H nei materiali diamagnetici.

Per ottenere $B = 1 \text{ Wb/m}^2$ nell'aria (od in un materiale diamagnetico) entro il solenoide, occorrono circa 800 000 Asp/m:

$$\left(H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 796 \ 171 \text{ Asp/m} \right)$$

mentre nel ferro (il cui $\mu_r = 2000$ circa per $B = 1 \text{ Wb/m}^2$) bastano 400 Asp/m. Infatti:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{1}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = \div 400 \text{ Asp/m}$$

Si noti l'enorme importanza pratica dell'impiego dei materiali magnetici nell'industria elettrotecnica: si ottengono campi risultanti di gran lunga più intensi dello stesso campo induttore.

Isteresi magnetica.

Sottoponiamo un provino di materiale magnetico ad un campo crescente H e ricaviamo la sua curva di magnetizzazione $O A$ (ved. fig. 83).

Se dopo aver raggiunto un determinato valore del campo lo diminuiamo gradualmente, rileviamo che i valori dell'induzione (indicati dalla curva $A M$) sono superiori a quelli prima ottenuti a pari intensità di campo sicchè il provino, all'estinzione del campo, permane ancora magnetizzato: l'induzione residua conserva ancora un certo valore rappresentato dal segmento $O M$.

Questo valore si chiama *induzione residua*.

Il fenomeno dell'induzione residua, nella magnetizzazione dei corpi magnetici, si spiega con il fatto che le correnti elettroniche non ritornano a circolare esattamente nei piani preesistenti alla magnetizzazione, ma

conservano ancora una certa orientazione anche in assenza del campo induttore.

Il materiale rimane perciò più o meno magnetizzato (magneti artificiali) a seconda dell'orientazione residua.

Invertiamo il senso della corrente, cioè diamo valori negativi al campo; diminuisce di conseguenza B fino ad annullarsi in corrispondenza dell'ascissa ON .

Il campo inverso, rappresentato dal segmento ON necessario per annullare completamente l'induzione residua, si chiama: *forza coercitiva*.

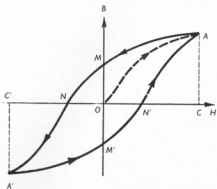


Fig. 83 - Ciclo di isteresi.

Concludiamo che per riportare ciascun elettrone a rotare nel piano ad esso spettante (nel corrispondente piano preesistente alla magnetizzazione) si rende indispensabile applicare un campo di determinata intensità, contrario al precedente. Aumentiamo ancora il campo $-H$ fino al valore OC' uguale ed opposto ad OC .

Si rileva che il provino acquista un'induzione di valore $C'A'$ uguale numericamente a CA .

Raggiunto questo valore $C'A'$ diminuiamo gradualmente il valore assoluto del campo H .

Percorreremo una curva $A'M'$ che ci indica come i valori assoluti dell'induzione magnetica siano superiori a quelli riscontrati nel tratto della curva MNA' mentre noteremo che all'estinzione del campo (in M') permane un'induzione residua dello stesso senso del campo che si è annullato e che per neutralizzarla è necessario un campo contrario, positivo e dello stesso valore assoluto della forza coercitiva prima richiesta.

Continuiamo ad aumentare il valore del campo H fino al primitivo valore OC , percorreremo la curva $N'A$.

Le due curve $AMNA'$ ed $A'M'N'A$ sono simmetriche rispetto agli assi e la curva OA , chiamata di « magnetizzazione iniziale », indica i valori che assume B in un provino di un determinato materiale magnetico, completamente smagnetizzato, se sottoposto per la prima volta ad un campo gradualmente crescente.

Se si continua a variare il campo magnetizzante dal valore OC all'eguale ed opposto OC' , si ripete con continuità lo stesso ciclo (chiamato *ciclo di isteresi*) ad ogni periodo di oscillazione del campo.

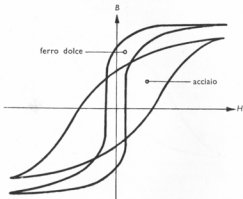


Fig. 84 - Cicli di isteresi di materiali diversi.

La parola *isteresi* deriva dal greco e significa ritardo. Infatti dall'esame del diagramma si constata che la magnetizzazione segue con un certo ritardo le variazioni del campo magnetizzante, ciò denota la tendenza dei corpi magnetici a conservare lo stato magnetico acquisito, cioè le correnti elettriche tendono a conservare l'orientamento che il campo induttore ha fatto loro acquistare ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Se sottoponiamo un materiale magnetico a cicli di ampiezza gradualmente decrescente cioè a cicli sempre più ristretti ed i cui estremi giacciono tutti sulla curva normale di magnetizzazione, veniamo, alla fine, ad annullare il magnetismo residuo.

Con questo procedimento si può « smagnetizzare » qualunque materiale ma-

I cicli di isteresi differiscono da materiale a materiale.

Nella fig. 84 sono stati comparati i cicli di isteresi relativi al ferro dolce ed all'acciaio ottenuti sperimentalmente facendo variare il campo fra gli stessi limiti.

Il ferro dolce ha un ciclo di isteresi più slanciato di quello dell'acciaio.

Si constata che il ferro dolce, a parità di intensità di campo, rimane più magnetizzato dell'acciaio all'estinguersi del campo magnetizzante ma l'induzione residua del ferro dolce scompare ben presto e facilmente per il basso valore della sua forza coercitiva.

Energia perduta per isteresi magnetica.

Sottoponiamo un materiale ferromagnetico ad una successione di magnetizzazioni cicliche facendo variare il campo agente da $+H_{max}$ a $-H_{max}$. In pratica ciò si verifica nei materiali ferromagnetici che costituiscono i circuiti magnetici delle macchine elettriche sottoposti a flussi « alternati ».

Queste inversioni periodiche del campo induttore fanno continuamente rotare i piani delle orbite elettroniche passanti per il centro del nucleo dell'atomo, orientandoli prima in un senso e poi nell'altro.

Per ottenere questa rotazione, per vincere l'attrito che di conseguenza si manifesta nell'edificio atomico, occorre spendere una certa energia che si ritrova sempre sotto forma di calore cui consegue un riscaldamento del materiale. I joule spesi per compiere un intero ciclo corrispondono esattamente all'area del ciclo di isteresi.

Lo Steinmetz ⁽¹⁾, da ricerche sperimentali, ha dedotto che con buona approssimazione si può calcolare più speditamente il lavoro W (joule/m³) dissipato per *ogni ciclo* di isteresi e per ogni m³ di materiale, sottoposto a valori $\pm B$ dell'induzione, mediante la formula: $W = K B_{max}^{1,6}$

(K = coefficiente che dipende dalla natura del materiale usato. Es. ghisa $K = 3000$; acciaio $K = 1000$; lamierini ferro dolce $K = 500$).

Formula valevole per induzioni non alte e cioè fino a circa $B = 1$ Wb/m².

gnetico, ad es. un orologio magnetizzatosi per essere stato inavvertitamente introdotto in un intenso campo magnetico (e per questo abbia cessato di funzionare).

Più semplicemente, a tale scopo, si introduca l'orologio in una bobina magnetizzante che faccia percorrere al materiale un determinato ciclo di isteresi e poi venga allontanato lentamente in senso assiale alla bobina, dunque in zone ove gradualmente il campo si annulla.

⁽¹⁾ Charles Steinmetz, nato in Germania e vissuto nel N. America, (1865-1923). L'Ing. Steinmetz fu direttore della General Electric Co.

Attualmente la generalità dei materiali magnetici viene sottoposta a valori di induzione superiori ad 1 Wb/m^2 . (Es. circuiti magnetici dei trasformatori, $B = 1,45 \text{ Wb/m}^2$) In questi casi le perdite per isteresi per ogni ciclo, sono funzioni quadratiche del valore massimo dell'induzione:

$$W = K B^2$$

Per ridurre al minimo le perdite per isteresi, l'industria siderurgica fornisce lamiere (lamierini) *al silicio* (in esse le perdite per isteresi, a parità di altre condizioni, risultano circa metà di quelle che si avrebbero se impiegassimo lamiere di ferro dolce) e lamiere *a cristalli orientati* che riducono ulteriormente le perdite a metà circa rispetto alle lamiere al silicio.

Circuiti magnetici.

Si chiama *circuito magnetico* un percorso chiuso nel quale agisce il campo magnetico.

Detto circuito può essere costituito da aria o, come preferibile⁽¹⁾, da materiali ferromagnetici.

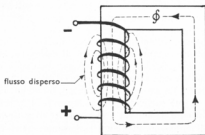


Fig. 85 - Esempio di un circuito magnetico chiuso.

Consideriamo un circuito magnetico sviluppantesi interamente nel ferro (ved. fig. 85).

Attorno ai nuclei magnetici componenti la struttura magnetica, o su una loro parte, si avvolgono delle spire che se percorse da corrente determinano nel materiale il flusso di induzione Φ .

⁽¹⁾ Quando il circuito è costituito da materiali ferromagnetici si hanno determinati flussi con eccitazioni molto ma molto più piccole di quelle che occorrebbero per avere lo stesso flusso nei circuiti, magnetici costituiti da materiali diamagnetici o dall'aria.

Non tutte le linee di forza si svolgono nel ferro ma alcune di esse si chiudono nell'aria. Queste linee costituiscono il *flusso disperso*.

Nella supposizione che non si verifichino dispersioni di flusso, che cioè non esistano linee di forza all'esterno del materiale magnetico, questo

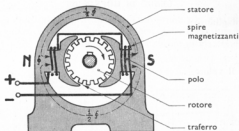


Fig. 85 a - Esempio di un circuito magnetico con traferro (rappresentazione schematica di una macchina a corrente continua).

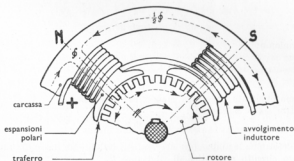


Fig. 86 b - Sezione (incompleta) di una macchina multipolare a corrente continua.

costituisce un *circuito magnetico perfetto*. In questo circuito magnetico (supposto formato da nuclei di uguale sezione) sarà costante l'induzione

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

in ogni suo punto. Se invece i nuclei componenti non hanno uguale sezione, essendo Φ costante, varierà in ognuno di essi l'induzione in modo inversamente proporzionale al valore di S , ($B \cdot S = \text{costante}$).

La struttura magnetica può presentare una discontinuità, uno spazio d'aria. Questa breve interruzione dei nuclei magnetici entro la quale il campo si svolge nell'aria, si chiama *traferro* (es. ved. fig. 86 a ed 86 b).

LEGGE DI HOPKINSON

Nell'uguaglianza:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

sostituiamo il valore

$$B = \mu H = \mu \frac{NI}{l}$$

Otteniamo:

$$\mu \frac{NI}{l} = \frac{\Phi}{S}$$

cioè:

$$NI = \Phi \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$$

Poniamo:

$$\frac{1}{\mu} \frac{l}{S} = \mathfrak{R}$$

(\mathfrak{R} viene chiamata resistenza magnetica o *riluttanza*).

Otterremo l'espressione:

$$NI = \Phi \mathfrak{R}$$

che ci determina le amperspire necessarie a stabilire un flusso di induzione Φ in un circuito magnetico di riluttanza \mathfrak{R} .

Questa equazione esprime la *legge di Hopkinson* ⁽¹⁾, chiamata anche « legge di Ohm magnetica » per la sua similitudine con la legge di Ohm per i circuiti elettrici dove al posto della f.e.m. abbiamo le amperspire di eccitazione NI o *forza magnetomotrice* (f.m.m.), al posto della I il flusso di induzione Φ ed al posto della resistenza R la riluttanza \mathfrak{R} , (f.m.m. = flusso magnetico \times riluttanza).

(¹) John Hopkinson, fisico inglese (1849-1898). Unitamente al fratello Edward definì la legge per i circuiti magnetici nel 1886.

Nella formula si indica con l (metri) lo sviluppo medio delle linee di forza magnetica (effettivamente le linee di forza relative alla periferia esterna del circuito magnetico hanno maggiore sviluppo, mentre le linee della periferia interna ne hanno uno minore) ossia si considera lo sviluppo della linea di forza luogo dei punti che sono i centri di ogni sezione normale al circuito magnetico.

La legge di Hopkinson fornisce la base prima per la progettazione dei circuiti magnetici delle macchine elettriche, nelle quali interessa ottenere un alto valore del flusso Φ con il minimo impiego di materiali e di amperspire.

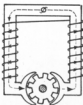


Fig. 87 a



Fig. 87 b

Primitive strutture di dinamo.

I primi costruttori di dinamo (1878-85) usavano nuclei induttori lunghi e sottili (ved. fig. 87 a) che non servivano affatto ad aumentare il flusso induttore: il materiale era male utilizzato; risultavano macchine pesanti e di poca potenzialità.

Edison ⁽¹⁾, dopo la divulgazione della legge dei fratelli Hopkinson, modificò di conseguenza il circuito magnetico delle sue dinamo (ved. fig. 87 b) al fine di ridurre il valore della riluttanza (l minimo ed S massimo). Ottenne dinamo molto più potenti, a parità di peso, comparate alle sue anteriori costruzioni.

Applicazioni dell'effetto magnetico della corrente.

Funzionamento del campanello.

A fianco dell'elettromagnete (ved. fig. 88) riposa un'ancora di ferro dolce solidale ad un'asticciola elastica. Se chiudiamo il circuito elettrico

⁽¹⁾ Thomas Edison, fisico ed inventore N. Americano (1847-1931).

preme il pulsante (ved. schema fig. 89), la corrente che circola nell'avvolgimento magnetizza l'elettromagnete che attira vivamente l'ancora: il battacchio colpisce la campana.

Ma questo spostamento dell'ancora interrompe il circuito elettrico, di conseguenza si smagnetizza il magnete: l'ancora, non più attratta, viene riportata alla sua posizione iniziale dall'asticciola elastica.

Si ripristina il contatto, il circuito elettrico si

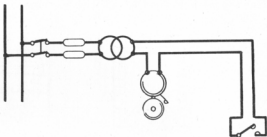
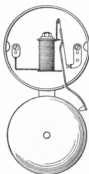


Fig. 88 - Campanello. Fig. 89 - Schema d'impianto di un campanello elettrico.

richiude, l'ancora è nuovamente attratta, il battacchio ricolpisce la campana e così di seguito fino a quando si preme il pulsante.

Telefono.

Il circuito telefonico che converte le onde sonore in impulsi di corrente elettrica e viceversa, consente la conversazione tra persone situate ad enormi distanze.

L'apparecchio telefonico consta di un organo di trasmissione (*microfono*) e di un *ricevitore telefonico* (chiamato semplicemente *telefono*), il tutto riunito in un'unica impugnatura chiamata « microtelefono ».

Il microfono (ved. fig. 90) è composto essenzialmente da una sottile membrana di carbone di storta che poggia su uno strato di granuli di carbone.

Quando parliamo di fronte alla membrana del microfono (ved. fig. 91) questa si mette a vibrare perchè colpita dalle « onde sonore ». Il numero delle vibrazioni, od oscillazioni, che la membrana può compiere al secondo, varia da circa 300 a 3400 dalle note basse alle alte.

La membrana, con le sue frequenti vibrazioni, preme più o meno fortemente i granuli di carbone contenuti nella capsula microfonica (ved.

fig. 92). Questa variabile pressione modificherà le superfici di contatto dei granuli tra loro. Ma se vengono variate queste superfici di contatto otterremo una proporzionale variazione della resistenza elettrica che lo strato di carbone oppone al passaggio delle deboli correnti microfoniche che sono dell'ordine di qualche decina di milliampere. (La resistenza ohmica di una capsula microfonica varia da circa 50 a 200 ohm).

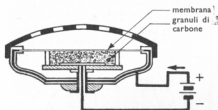


Fig. 90 - Microfono. Percorso delle correnti microfoniche attraverso la membrana ed i granuli di carbone.

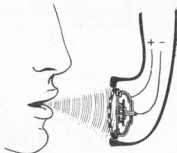


Fig. 91 - Onde sonore che colpiscono la membrana del microfono.

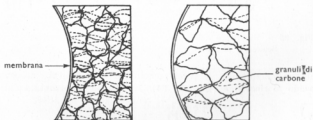


Fig. 92 - Posizioni estreme della membrana microfonica, e conseguente variazione dell'intensità della corrente (indicata tratteggiata in figura) che attraversa lo strato di carbone.

Inseriamo il microfono in un circuito elettrico alimentato a tensione costante da pile od accumulatori. L'intensità della corrente nel circuito varierà, mentre si parla di fronte al microfono, con la stessa frequenza di quella fonica causa la dipendente e variabile conducibilità dello strato

di carbone contenuto nella capsula microfonica. Questa variabile intensità di corrente percorre anche il

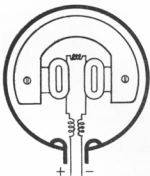
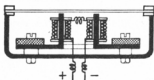


Fig. 93 - Ricevitore telefonico.
Sezione e pianta.

ricevitore telefonico costituito da una elettrocalamita con nuclei formati da magneti permanenti ai cui poli si affaccia una sottile membrana di ferro dolce (ved. fig. 93).

Le dette variabili correnti, nel percorrere l'avvolgimento dell'elettrocalamita, attrarranno più o meno fortemente la membrana del ricevitore e con la stessa frequenza fonica per modo da riprodurre fedelmente le vibrazioni acustiche della

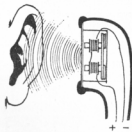


Fig. 94 - Ricezione.

membrana microfonica. È perciò possibile riudire la voce accostando l'orecchio al ricevitore (ved. fig. 94). Il telefono fu inventato dal fiorentino Meucci nel 1849.

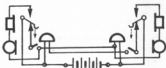


Fig. 95 - Schema d'impianto di un circuito citofonico a due posti.

Circuito citofonico.

Schema d'impianto di due telefoni interni (citofoni) alimentati da una batteria di pile da 4 V (ved. fig. 95). Nella posizione di riposo il contatto mobile a gravità di ciascun microtelefono è abbassato; se dunque si preme uno dei pulsanti suonerà il campanello del microtelefono chiamato. In posizione di conversazione i due contatti mobili

sono invece rialzati e chiudono il circuito pile-microtelefoni che così, messi in serie, permettono la reciproca conversazione.

Esercizio. Si alimenti con una tensione $V = 20$ V il circuito di fig. 96. Si domanda il valore del campo H entro la bobina costituita da 100 spire, lunga cm 50 e della resistenza $R_0 = 1$ ohm.

Troviamo il valore dell'intensità di corrente che percorre il circuito. Osserviamo che le tre resistenze R_1 , R_2 , R_3 , ciascuna del valore di 12 ohm, sono tutte e tre alimentate dalla tensione di linea, sono cioè in derivazione sul circuito. Possiamo dunque rappresentare il sopraindicato circuito come in fig. 97.

Valore della resistenza R_e equivalente alle tre resistenze in parallelo:

$$R_e = \frac{R}{n} = \frac{12}{3} = 4 \Omega$$

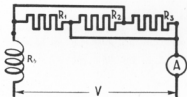


Fig. 96.

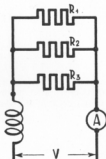


Fig. 97.

Resistenza complessiva del circuito:

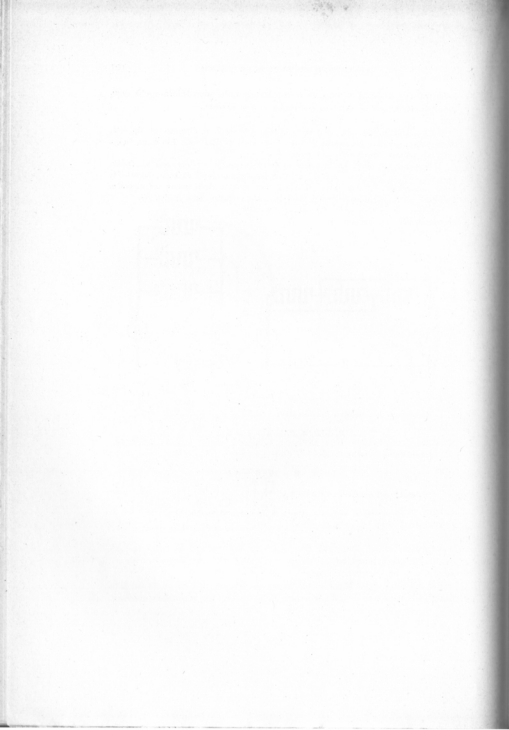
$$R_t = R_0 + R_e = 4 + 1 = 5 \Omega$$

Intensità di corrente:

$$I = V : R = 20 : 5 = 4 \text{ A}$$

Intensità del campo:

$$H = N I : l = 100 \times 4 : 0,5 = 800 \text{ Asp/m}$$



CAPITOLO VI

INDUZIONE ELETTRIMAGNETICA

Leggi dell'induzione elettromagnetica.

Si abbia un solenoide percorso da corrente costante ed entro il solenoide una bobinetta di superficie S che chiameremo « bobinetta indotta », collegata ad un opportuno galvanometro oppure ad un voltmetro (ved.

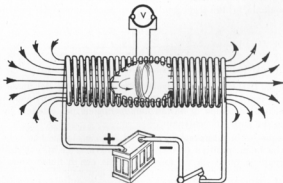


Fig. 98 - Dimostrazione della legge dell'induzione elettromagnetica.

fig. 98). Notiamo che fino a quando la bobinetta rimane immobile nel campo uniforme ($H = \frac{NI}{l}$) di induzione B ($B = \mu H$), non otteniamo nessuna deviazione all'indice del voltmetro.

Portiamo rapidamente fuori del campo la bobinetta: noteremo una deviazione dell'indice del voltmetro che però dura solamente nel breve tempo dello spostamento e cessa appena il movimento della bobinetta si arresta. Riportiamo rapidamente la bobinetta entro il solenoide: noteremo che l'indice del voltmetro devia ancora ma in senso inverso e solamente nel breve tempo dello spostamento.

Concludiamo: ogni variazione di flusso entro la bobinetta genera in essa una f.e.m. indotta che persiste solo nel tempo che dura la variazione mentre il senso della f.e.m. è diverso a seconda che il flusso concatenato con la bobinetta aumenta o diminuisce.

Sono due le leggi che governano il fenomeno:

a) **LEGGE DI FARADAY** ⁽¹⁾ (o dell'induzione elettromagnetica).

La f.e.m. indotta è direttamente proporzionale alla velocità di variazione del flusso concatenato.

b) **LEGGE DI LENZ** ⁽²⁾.

Il verso della f.e.m. indotta è sempre di segno tale da contrastare, con la corrente che essa determina, la causa che l'ha fatta nascere cioè la variazione del flusso concatenato.

Esponiamo le due leggi con una semplice espressione matematica:

$$E_m = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

ove E_m (volt) indica il valore *medio* della f.e.m. indotta;

Φ_1 e Φ_2 (weber) indicano rispettivamente il valore del flusso concatenato con la bobinetta indotta prima e dopo il movimento;
 t (secondi) il tempo di durata dell'operazione per ottenere la variazione del flusso concatenato.

Il segno — ci interpreta la legge di Lenz e ci dice che nella bobinetta si ha f.e.m. positiva (si considera positiva la f.e.m. che determina una corrente la quale dà un flusso concorde con il flusso concatenato)

quando il numeratore della $E_m = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$ è negativo (quando, dunque, diminuisce il flusso induttore concatenato) e viceversa E_m negativa quando la variazione $\Phi_2 - \Phi_1$ è positiva (aumenta, il flusso induttore concatenato).

⁽¹⁾ Michael Faraday, fisico inglese (1791-1867). La legge è del 1831.

⁽²⁾ Emil Lenz, fisico estone (1804-1865). La legge è del 1833.

Nell'un caso e nell'altro, siccome sono equiverse la f.e.m. e la corrente che essa determina, si ha che il flusso proprio generato dalla bobinetta contrasta la *variazione* del flusso con essa concatenato, origine della f.e.m.

La variazione del flusso concatenato con la bobina si può ottenere, oltre che variando la posizione del circuito elettrico rispetto alle linee di flusso del campo induttore, aprendo l'interruttore del circuito elettrico (corrente zero, campo zero, flusso zero) e poi richiudendolo (corrente di regime, flusso di regime) o, meglio ancora, con il far rotare la spira attorno ad un'asse diametrale di una sua sezione retta, asse normale alle linee di forza.

Verso delle f.e.m. indotte.

Ricaviamo il valore della f.e.m. indotta in un conduttore rettilineo di lunghezza l (m) che si muove con velocità costante v (m/sec) normalmente a se stesso ed alle linee di forza di un campo uniforme che determina l'induzione B (ved. fig. 99).

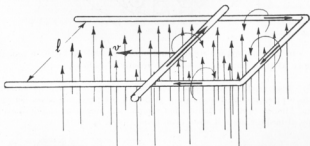


Fig. 99 - Verso della f.e.m. indotta in un conduttore rettilineo che si sposta normalmente alle linee di forza.

Dopo un secondo l'area abbracciata dalla spira di cui fa parte il conduttore mobile di lunghezza l aumenterà, come ovvio, del valore $v l$, quindi la variazione del flusso concatenato nel tempo di un secondo, ossia la velocità di variazione del flusso concatenato, risulterà $B (l v)$ e la f.e.m. indotta:

$$E = B l v$$

Il senso di questa f.e.m. indotta ha verso tale da contrastare, con la corrente che essa determina, la variazione del flusso concatenato (legge

di Lenz) dunque, nel caso considerato, il senso indicato in fig. 99 al fine di contrastare l'aumento del flusso concatenato.

Per una facile individuazione del verso delle f.e.m. si può ricorrere alla regola della *mano destra di Fleming* ⁽¹⁾, o meglio, e ciò nel caso pratico dei generatori elettromeccanici (dinamo, ecc.) nei quali i conduttori indotti sono sempre normali alle linee di forza del campo, avvalersi della seguente regola mnemonica se la rotazione dell'indotto (rotore) avviene nel senso orario cioè (ved. fig. 100):

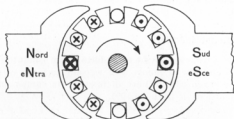


Fig. 100.

« in un conduttore rotante nel senso orario, la f.e.m. è entrante di fronte al polo nord ed uscente di fronte al polo sud » ⁽²⁾.

⁽¹⁾ « Disponendo tre dita della mano destra in modo da formare un angolo « triedro e precisamente disponendo il pollice (il più forte) nel senso del movimento, l'indice (con esso indichiamo sempre una direzione) la direzione del « campo, il medio ci darà il senso della f.e.m. » (ved. fig. 101).



Fig. 101.

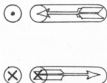


Fig. 102 - Regola della « freccia ».

⁽²⁾ Per indicare il senso di una grandezza elettrica (es. corrente, f.e.m., ecc.) avente direzione normale al foglio, useremo la *regola della freccia* (ved. fig. 102): un punto (•) indica che la grandezza è diretta verso noi ed una crocetta (X) indica che la grandezza si allontana da noi come si allontanerebbe da noi una freccia in movimento se vedessimo la sua penna.

Esercizio. Si abbia una bobina a forma quadrata di m 10 di lato costituita da 100 spire di filo di rame, sostenuta da un alberello verticale (ved. fig. 103). Gli estremi della bobina siano collegati a due anelli di rame, isolati sia tra loro sia dall'alberello sul quale sono calettati. Su questi due anelli appoggiamo due spazzole dalle quali si deriverà il circuito esterno. Si faccia rotare detta bobina nello spazio cioè immersa nel campo magnetico terrestre del valore: $H = \frac{NI}{l} = 20$ Asp/m circa (componente orizzontale) e compia 50 giri al secondo. Determinare il valore della f.e.m. media indotta.

Troviamo il valore di:

$$B = \mu_0 H = 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 2,512 \cdot 10^{-5}$$

$$\Phi = BS = 2,512 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 2,512 \cdot 10^{-3}$$

Constatiamo che ad ogni giro della bobina il flusso concatenato varia di 4Φ . Il valore medio della f.e.m. indotta, per spira, è dunque:

$$E_m = \frac{4\Phi}{1/50} = 200 \cdot \Phi = 200 \cdot 2,512 \cdot 10^{-3} = 0,5024 \text{ V}$$

La bobina è composta da 100 spire.

Per il fatto che le spire sono in serie otterremo, agli estremi della bobina, una f.e.m. di valore medio E_m che è somma dei valori medi delle f.e.m. generate nelle singole spire:

$$E_m = 0,5024 \cdot 100 = 50,24 \text{ V}$$

Mutua induzione.

Si abbiano due bobine di N_1 ed N_2 spire rispettivamente (ved. fig. 104) immerse nell'aria; sia percorsa la prima, che costituisce il circuito induttore, dalla corrente I .

La parte di flusso da essa prodotto che si concatena con la seconda (circuito indotto) si può esprimere per mezzo della relazione:

$$\Phi_e = MI$$

Il fattore M così definito, funzione delle dimensioni, forma e posizione relativa dei due circuiti nonché del mezzo in cui si svolgono le linee di forza, viene chiamato *coefficiente di mutua induzione*.

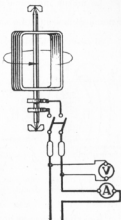
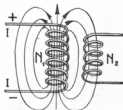


Fig. 103.

Ponendo $I = 1$ risulta $\Phi_c = M$; rappresenta dunque M il flusso concatenato con il circuito indotto quando nel circuito induttore circola la corrente unitaria.

La mutua induzione si misura con una unità a cui è stato attribuito il nome di *henry* ⁽¹⁾. Le sue dimensioni sono date dal rapporto $\frac{\text{weber}}{\text{ampere}}$.

Si osserva che se nel circuito induttore si varia l'intensità della corrente dal valore I_1 al valore I_2 , si viene a variare conseguentemente il flusso concatenato $\Phi_1 = M I_1$ e $\Phi_2 = M I_2$ nel circuito indotto. Questa variazione di flusso avvenuta nel tempo t , vi induce una f.e.m. media:



$$E_m = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t} = - M \frac{I_2 - I_1}{t}$$

Fig. 104 - Mutuo concatenamento tra due circuiti.

« Due circuiti hanno il coefficiente di « mutua induzione di 1 henry quando, al « variare dell'intensità di corrente di 1 am- « pere al secondo nell'un circuito, si induce « nell'altro la f.e.m. di 1 volt ».

Ricaviamo l'espressione analitica di M .

Il flusso prodotto dalla bobina induttrice percorsa dalla corrente I è per la legge di Hopkinson, uguale a $\frac{N_1 I}{\mathfrak{R}}$ dove \mathfrak{R} è la riluttanza complessiva del circuito magnetico in cui si svolgono tutte le linee di forza, e quindi di induzione, prodotte dall'eccitazione $N_1 I$.

Di questo flusso una parte α (coefficiente compreso tra zero ed uno) ⁽²⁾ si concatena con il circuito indotto; quindi $\alpha \frac{N_1 I}{\mathfrak{R}}$ è quell'aliquota del flusso prodotto della bobina 1 che si concatena col circuito 2 quando circola in quella la corrente I ed $\alpha \frac{N_1}{\mathfrak{R}}$ è l'analogo flusso per $I = 1$.

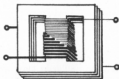


Fig. 105.

Quest'ultimo flusso si concatena N_2 volte con la bobina indotta.

⁽¹⁾ Joseph Henry, fisico americano (1797-1878).

⁽²⁾ Si ottiene, praticamente, $\alpha = 1$ da due circuiti strettamente aderenti l'uno all'altro per tutto il loro sviluppo si da formare un *concatenamento perfetto* come ad es. in fig. 105.

Dunque $\alpha \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}}$, flusso che si concatena con la bobina indotta quando nell'induttrice circola la corrente unitaria, è l'espressione di M .

Detta espressione, essendo α funzione delle dimensioni, forma e posizione relativa dei due circuiti, è sempre la stessa anche invertendo la funzione dei circuiti induttore ed indotto, da ciò la sua denominazione di mutua induzione.

Autoinduzione.

Si abbia una bobina di N spire (ved. fig. 106), immersa nell'aria, percorsa dalla corrente I .

Il flusso prodotto da detta corrente che si concatena con la bobina è proporzionale ad I :

$$\Phi = LI$$

Il fattore L così definito, funzione degli elementi geometrici del circuito elettrico e della permeabilità del mezzo, si chiama *induttanza* o *coefficiente di autoinduzione* o *selfinduzione*.

Per $I = 1$ risulta $\Phi = L$; rappresenta dunque L il flusso proprio concatenato con il circuito quando questo è percorso dalla corrente unitaria.

L'induttanza ha le stesse dimensioni di M ($\frac{\text{weber}}{\text{ampere}}$), la sua unità di misura è l'henry.

La f.e.m. che si autoinduce nel circuito al variare del flusso, cioè della corrente, è data:

$$E_m = -L \frac{I_2 - I_1}{t}$$

dedotta dall'espressione generale $E_m = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$ in cui $\Phi_2 - \Phi_1 = L(I_2 - I_1)$ ed $I_2 - I_1$ la variazione dei valori della corrente nel tempo t .

« Un circuito ha l'induttanza di 1 henry quando, al variare in esso della corrente di 1 ampere al secondo, si autoinduce la f.e.m. di 1 volt ».

Per determinare l'espressione analitica di L basta considerare che il flusso prodotto dalla bobina quando in essa circola la corrente unitaria è, per la legge di Hopkinson, $\frac{N}{\mathfrak{R}}$. E poiché questo flusso si concatena N volte con la bobina in quanto N sono le sue spire, si ha che il flusso concatenato con essa (se si



Fig. 106 - Bobina induttiva.

trascura il flusso disperso come è lecito quando la bobina è costituita da spire a passo piccolissimo) è $\frac{N}{\mathcal{R}} \cdot N = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$.

L'induttanza è piccola per un filo rettilineo (ved. fig. 107) immerso nell'aria (grande riluttanza), aumenta se avvolto a solenoide (l'induttanza che è data da $\frac{N^2}{\mathcal{R}}$ aumenta col quadrato del numero delle spire), aumenta ancora, e notevolmente, se la bobina è avvolta su materiale ferromagnetico (diminuisce notevolmente la riluttanza perchè aumenta di molto la permeabilità media μ del circuito magnetico), è massima se il nucleo ferroso lo chiudiamo su se stesso. In questo ultimo caso le linee di forza si sviluppano nel ferro.

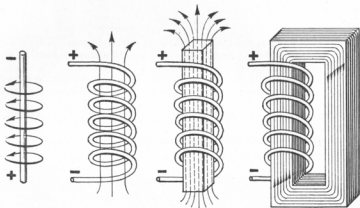


Fig. 107 - Circuiti diversamente induttivi.

Correnti parassite o di Foucault.

In conformità alle leggi dell'induzione elettromagnetica, se sottoponiamo un qualsiasi corpo metallico all'azione di un campo variabile si genereranno in esso delle f.e.m. indotte che daranno luogo, nella massa conduttrice, a delle correnti circolari, correnti che riscaldano dannosamente il pezzo metallico con conseguente dissipazione di energia.

Sono queste le correnti parassite o di Foucault ⁽¹⁾ dal nome del fisico che per primo le studiò.

⁽¹⁾ Jean Foucault, fisico francese (1819-1868).

I circuiti magnetici delle macchine elettriche sono costituiti essenzialmente da materiali ferromagnetici al fine di ottenere una minima riluttanza.

Per impedire che nelle parti metalliche di una macchina elettrica

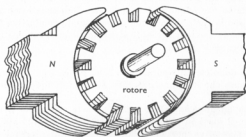


Fig. 108 - Rotore e poli lamellati di una macchina a corrente continua.

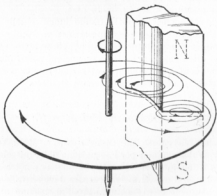


Fig. 109 - Azione frenante delle correnti parassite.

soggette a flussi variabili (ad es. il cilindro ferroso rotante tra le due espansioni polari come in fig. 108) si generino correnti parassite esagerate e di conseguenza riscaldamenti eccessivi che potrebbero danneggiare seriamente gli avvolgimenti, si costruiscono questi circuiti magnetici con

l'impaccare più lamierini spessore 0,5 mm per parti rotanti (soggette, perciò, a sforzi meccanici) e spessore 0,35 mm per parti statiche (ved. fig. 105). Si ottiene un circuito magnetico lamellato in cui i lamierini componenti giacciono nel piano delle linee di forza del campo magnetico (le correnti indotte circolano in piani normali al flusso).

Per il fatto che i lamierini vengono tra loro isolati con vernici (un tempo usavano la carta velina) non c'è continuità conduttiva tra lamiera e lamiera, così le correnti parassite si rinchiodano in circuiti limitati dal sottile spessore delle lamiere.

Il senso delle correnti parassite è tale, per la legge di Lenz, da opporsi alle cause che le hanno generate, servono dunque anche da freno, come ora vedremo.

Si abbia un disco metallico rotante tra le espansioni polari di una calamita (es. il disco in alluminio dei contatori, ved. fig. 109) e si considerino le successive porzioni di questo che attraversano lo spazio polare.

Causa il movimento, ogni singola porzione del disco viene sottoposta a flussi variabili: da zero al valore massimo quando entra sotto le espansioni polari, da massimo a zero quando esce.

Le conseguenti correnti indotte danno luogo a delle polarità sulle due facce opposte del disco soggette a questi flussi variabili e precisamente: polarità dello stesso nome di quelle del magnete induttore nella porzione di superficie del disco entrante sotto le espansioni polari (azione di repulsione) e di nome contrario (azione di attrazione) nella porzione uscente.

Le due azioni concordano nel frenare il disco.

Rocchetto di Ruhmkorff.

L'apparecchio, inventato da Daniele Enrico Ruhmkorff nel 1851 trova applicazione nei magneti per l'accensione della miscela nei motori a scoppio. Sfrutta il fenomeno della mutua induzione per trasformare basse tensioni in alte tensioni capaci di far scoccare delle scintille fra due punte affacciate e conseguentemente comunicare l'accensione alla miscela esplosiva entro i cilindri.

Consta di un nucleo a sezione circolare costituito da un fascio di fili di ferro dolce fra loro isolati (per attenuare le intensità delle correnti parassite) che porta due avvolgimenti: il primario formato da poche spire di filo di rame di forte sezione (e perciò di piccola resistenza) $\varnothing = 1-2$ mm ed il secondario con più migliaia di spire di filo sottilissimo ($\varnothing =$ da 1/10 a 2/10 di mm) di rame.

Una batteria di accumulatori (tensione una decina di volt) alimenta la bobina primaria per mezzo di un dispositivo che apra e chiuda il circuito con una frequenza elevata ed uniforme come, ad es., il tipo ad àncora oscillante dei laboratori di fisica (ved. fig. 110). Il passaggio della corrente nella bobina primaria magnetizza il nucleo che così attrae l'àncora ed interrompe il circuito primario.

Di conseguenza si smagnetizza il nucleo; l'àncora, non più attratta, ritorna alla posizione iniziale chiudendo il circuito. Di nuovo si magnetizza il nucleo e si ripete il fenomeno con elevata frequenza.

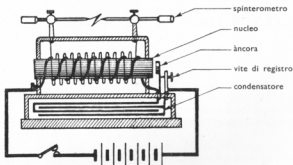
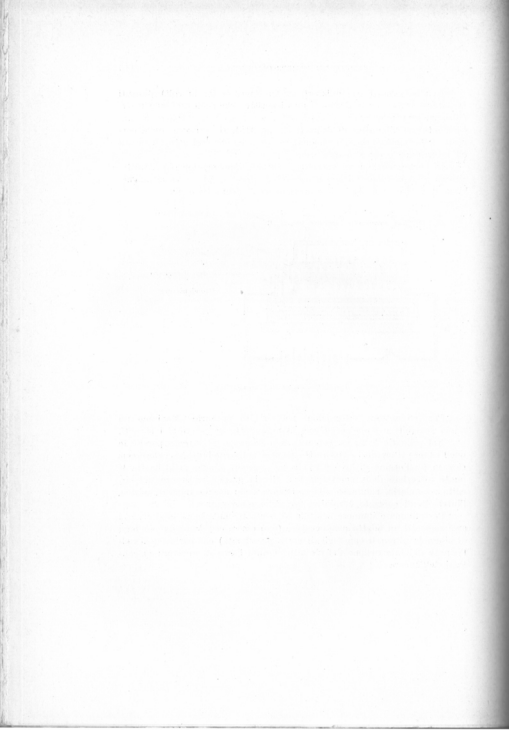


Fig. 110 - Rocchetto di Ruhmkorff.

Per le continue interruzioni nel circuito primario otteniamo un flusso variabile nel nucleo ed una f.e.m. indotta in entrambi i circuiti.

Nel primario la f.e.m. generata non dà luogo a corrente perchè in quell'istante il circuito è interrotto mentre nel secondario ha valore così elevato (dell'ordine di 10 000 V) da far scoccare lunghe scintille fra le punte affacciate dello spinterometro. Per la grande resistenza del circuito secondario, sommato alla resistenza dello spazio spinterometrico, l'intensità di corrente è minima (qualche microampere).

Per eliminare dannose scintille ai contatti dell'àncora, si deriva ai suoi morsetti un adatto condensatore (può essere costituito da più fogli di stagnola alternati con fogli di carta paraffinata) che caricandosi nell'istante dell'interruzione del circuito elimina l'arco di apertura ai contatti dell'àncora.



CAPITOLO VII

AZIONI MECCANICHE TRA CAMPI E CORRENTI

Forze elettromagnetiche ed elettrodinamiche.

1. Si chiamano *elettromagnetiche* le forze che derivano dalle mutue azioni che si esercitano tra un flusso ed un conduttore percorso da corrente.

Per la legge di Lenz il movimento del conduttore di fig. 99 è contrastato dalla forza elettromagnetica. L'esistenza di questa forza ci denuncia l'assorbimento di una potenza meccanica.

Per la legge della conservazione dell'energia, detta potenza meccanica, pari a $f v$ di cui il fattore f è la forza elettromagnetica che contrasta il movimento e v la velocità del movimento stesso, deve essere uguale, a parte il segno, alla potenza elettrica generata $E I$; dunque $f v = E I$. Sostituendo ($E = B l v$) si ha $f v = B l v I$ da cui:

$$f = B I l$$

2. Si chiamano *elettrodinamiche* le forze che si esercitano tra due conduttori percorsi da correnti ⁽¹⁾ (conseguenze dall'azione di una delle correnti nel campo prodotto dall'altra).

Per determinare la forza elettrodinamica che si esercita tra due conduttori paralleli, distanti r l'uno dall'altro, percorsi rispettivamente dalle correnti I_1 ed I_2 , basta considerare uno dei conduttori (es. il secondo) immerso nel campo di induzione B prodotto dal primo.

Tale campo di andamento circolare e che per ragioni di simmetria ha la stessa intensità in tutti i punti della circonferenza di sviluppo $2 \pi r$ (sviluppo delle linee di forza del campo che interessano, investendolo, il

⁽¹⁾ Le azioni delle correnti sulle correnti vennero scoperte da Ampère (fisico francese, 1775-1836) nel 1820.

secondo conduttore) ha il valore $H_1 = \frac{I_1}{2\pi r}$ ⁽¹⁾ e l'induzione (nell'aria) $B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r}$.

Quindi la forza con la quale il conduttore 2 di lunghezza l viene sollecitato dal campo prodotto dal conduttore 1 è:

$$f = B_1 I_2 l = \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1 I_2 l$$

Determinazione del verso delle forze.

Il verso della forza f è sempre diretto in senso opposto allo spostamento che si deve imprimere ad un conduttore immerso in un campo per generarvi una f.e.m. indotta dello stesso senso della corrente che lo percorre.

Per una facile individuazione del verso della f , noti i versi del campo e della corrente, si ricorre alla regola del « Rotolamento del cavaturaccioli »:

« Un cavaturaccioli rotante nel senso della corrente venga appoggiato sul polo nord: il conduttore considerato si sposterà nel senso del « rotolamento del cavaturaccioli » (ved. fig. 111 a, b).

Normalmente, dunque, alle linee di forza magnetica ed alla direzione della corrente.

Nel caso di due conduttori paralleli percorsi da correnti non mutano le deduzioni su esposte se consideriamo uno dei conduttori (es. il secondo) immerso nel campo di induzione B prodotto dal primo o, ciò è lo stesso, nel campo creato da un equivalente magnete.

Al secondo conduttore immerso in questo campo ed appoggiato sul polo nord dell'equivalente ipotetico magnete, si applichi la regola del rotolamento del cavaturaccioli; constateremo:

« due conduttori paralleli si attraggono se percorsi da correnti nello stesso senso (ved. fig. 111 c), si respingono se percorsi da correnti dirette in senso contrario » (ved. fig. 111 d).

(1) Il campo di una linea di azione circolare è $H = \frac{NI}{l}$ che per $N = 1$

diventa $H = \frac{I}{l}$ dove I è la corrente concatenata con la linea di forza, corrente concatenata che nel caso nostro è la corrente che circola nel conduttore 1 ed l lo sviluppo della linea di forza che essendo circolare avrà una lunghezza uguale a $2\pi r$, dove r è la distanza della linea di forza dall'asse del conduttore 1 ossia il raggio della circonferenza che costituisce la linea di forza.

Sempre per il principio che le forze elettrodinamiche tendono a spostare i conduttori nel verso cui corrisponde un aumento del flusso concatenato si ha che:

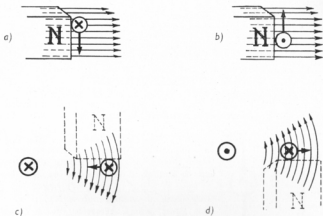


Fig. 111 - Regola del «rotolamento del cavaturaccioli».

« due conduttori comunque disposti nello spazio, se percorsi da correnti, si spostano e si sovrappongono in maniera tale da avere le correnti «equiverse».

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
50 EAST LEXINGTON AVENUE
NEW YORK, N. Y. 10017

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
50 EAST LEXINGTON AVENUE
NEW YORK, N. Y. 10017

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
50 EAST LEXINGTON AVENUE
NEW YORK, N. Y. 10017

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
50 EAST LEXINGTON AVENUE
NEW YORK, N. Y. 10017

CAPITOLO VIII
MISURE ELETTRICHE

Sistema di misura « Giorgi ».

Il sistema di misura del Prof. Giorgi ⁽¹⁾ si fonda sull'uso di quattro unità di misura:

Tre di natura meccanica: *metro, chilogrammo-massa, secondo*, più la quarta di natura elettrica: *l'ampere*.

Le tre prime determinano le unità derivate di natura meccanica (joule, watt, ecc., ved. pag. 33) mentre dall'ampere si ottengono le unità derivate di natura elettrica (volt, ohm, ecc.).

Unità di intensità: ampere.

« È l'intensità di corrente costante che percorrendo due conduttori paralleli, rettilinei, di lunghezza infinita e sezione circolare trascurabile, posti alla distanza di un metro (ved. fig. 112), nel vuoto, vi determina una forza di attrazione (o repulsione) per ogni metro di lunghezza dei conduttori: ⁽²⁾

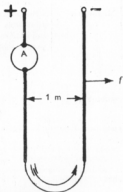


Fig. 112.

$$f = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Nw}$$

⁽¹⁾ Giovanni Giorgi, fisico italiano (1871-1950). Il sistema di misure che porta il suo nome (da lui proposto nel 1901) venne internazionalmente adottato nel 1935.

⁽²⁾ Per $I_1 = I_2 = 1$ ampere e se i due conduttori distano di 1 metro, si ha (ved. pag. 116) $f = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot 1} 1 \cdot 1 \cdot l$. Posto $l = 1$ metro: $f = \frac{\mu_0}{2\pi} = \frac{1,256 \cdot 10^{-6}}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Nw}$.

Unità derivate

Grandezze		Denominazione delle unità
Elettriche	corrente	ampere (A)
	carica	coulomb (C) = ampersecondi
	tensione	volt (V) = watt/ampere
	resistenza	ohm (R) = volt/ampere
	forza elettrica	— = volt/metro
	capacità	farad (F) = coulomb/volt
costante dielettrica	— (ϵ) = farad/metro	
Magnetiche	flusso	weber (Wb) = voltsecondo/spira
	induzione	— (B) = weber/m ²
	forza magnetomotrice	— (f.m.m.) = amperspira
	forza magnetica	— (H) = amperspira/metro
	riluttanza	— (R) = amperspira/weber
	induttanza	henry (L) = voltsecondi/ampere
	permeabilità	— (μ) = henry/metro

Definizioni

- coulomb** ($Q = I \cdot t$) è la quantità di elettricità trasportata da un ampere nel tempo di un secondo (ampersecondo);
- volt** $\left(V = \frac{P}{I} \right)$ è la differenza di potenziale esistente tra due sezioni di un conduttore percorso dalla corrente costante di un ampere quando la potenza dissipata nel conduttore compreso tra queste due sezioni è di un watt.
- ohm** $\left(R = \frac{V}{I} \right)$ è la resistenza elettrica che esiste tra due sezioni di un conduttore quando applicando la differenza di potenziale di un volt tra le due sezioni considerate, vi circola la corrente di un ampere.
- farad** $\left(C = \frac{Q}{V} \right)$ è la capacità di un condensatore che assume la carica di un coulomb quando si applica la tensione di un volt tra le sue armature;
- weber** $\left(\frac{\text{voltsecondo}}{\text{spira}} \right)$ è il flusso magnetico concatenato con una spira che al suo annullarsi in un secondo vi induce la f.e.m. di un volt;
- henry** $\left(\frac{\text{voltsecondo}}{\text{ampere}} \right)$ è l'induttanza di un circuito in cui si produce la f.e.m. di un volt quando la velocità di variazione della corrente che vi circola è di un ampere al secondo.

Apparecchi di misura.

Strumento magnetoelettrico

L'equipaggio che porta l'indice è costituito da una bobina mobile formata da molte spire di filo sottilissimo avvolte su un leggero telaio rettangolare che può rotare nel traferro compreso fra le espansioni polari di un robusto magnete permanente e di un cilindro cavo di ferro dolce (ved. fig. 113) coassiale con la superficie delle espansioni polari.

Il cilindro rafforza e rende radiale il campo magnetico nel traferro. Con il campo radiale si ottengono scale uniformi (scale con divisioni tutte uguali fra loro) perchè le forze elettromagnetiche ($f = -Bil$, vedi pag. 115) che si generano dalla reazione tra il campo ma-

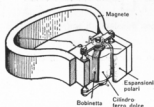


Fig. 113 - Strumento di misura « magnetoelettrico » oppure a « bobina mobile » (per e. c.).

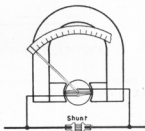


Fig. 114 - Schema d'inserzione di un amperometro magnetoelettrico munito di shunt.

gnatico fisso e quello creato dalla corrente che percorre la bobina mobile e che provocano lo spostamento angolare dell'equipaggio, sono dirette sempre nella direzione dello spostamento e così il braccio è costante. Il senso della deviazione dell'indice dipende dal senso secondo il quale la corrente circola nelle spire della bobinetta in quanto ogni spira, percorsa da corrente ed immersa in un campo magnetico, si orienta nel verso cui corrisponde un aumento del flusso concatenato con questa spira. Due molle a spirale piatta fissate all'asse dell'indice, forniscono la coppia antagonista e servono anche da adduttori della corrente.

La massima intensità di corrente che può percorrere il sottile filo della bobinetta è dell'ordine di qualche milliamperere. Da ciò il nome di « milliamperometro » dato agli strumenti magnetoelettrici.

Quando la corrente da misurare supera tali valori, si dispone, in parallelo con l'apparecchio, una adatta resistenza tarata detta « shunt » (ved. fig. 114) attraverso la quale viene deviata una quota parte della corrente: nella bobinetta ne circolerà così solo una esigua frazione dell'ordine, come detto, di qualche milliampere.

Indichiamo con R_a la resistenza dell'amperometro, con R_s la resistenza dello shunt, con I la corrente in linea e con I_a ed I_s le due correnti derivate: $I = I_a + I_s$ (ved. schema fig. 115).

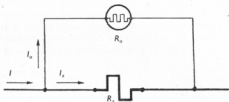


Fig. 115 - Strumento con funzione di amperometro.

Osserviamo che lo strumento e lo shunt sono inseriti in rami paralleli di circuito, dunque:

$$R_a I_a = R_s I_s$$

cioè:

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{R_a}{R_s}$$

Componendo si ottiene:

$$\frac{I_s + I_a}{I_a} = \frac{R_a + R_s}{R_s}$$

cioè:

$$\frac{I}{I_a} = 1 + \frac{R_a}{R_s}$$

Poniamo $\frac{I}{I_a} = m$ (potere moltiplicatore dello shunt).

Affinchè risulti $m = 10, 100, 1000$, ecc. e di conseguenza l'amperometro venga attraversato da una frazione decimale dell'intensità di corrente I circolante in linea, cioè risulti I_a uguale ad $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}$, ecc.

di I , deve il valore della R_s essere $\frac{1}{9} \frac{1}{99} \frac{1}{999}$, ecc. del valore di R_a .

Con questi apparecchi si possono misurare anche tensioni. Infatti nota la R_a dello strumento si ottiene: $V = R_a I_a$ volt. Basterà quindi moltiplicare per R_a le indicazioni dell'amperometro, derivato sul circuito di misura, per ottenere il valore della tensione ad esso applicata.

Se la scala dello strumento è graduata direttamente in volt lo strumento si chiama « voltmetro ».

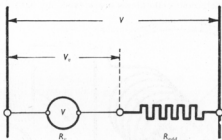


Fig. 116 - Strumento con funzione di voltmetro.

Nei voltmetri al fine di limitare a pochi milliampere l'intensità di corrente che percorre la bobina mobile, si dispongono in serie all'avvolgimento dell'apparecchio di resistenza R_s , dei « resistori addizionali » di resistenza R_{add} di adeguato valore (ved. fig. 116).

$$\frac{R_s + R_{add}}{R_s} = \frac{V}{V_e}$$

cioè:

$$\frac{V}{V_e} = 1 + \frac{R_{add}}{R_s}$$

e ponendo il rapporto $\frac{V}{V_e} = m$ (potere moltiplicatore della R_{add}) si arriva alle stesse conclusioni già esposte.

Strumento elettromagnetico

L'equipaggio mobile è costituito da un settore di ferro dolce collegato ad un asse di acciaio temperato imperniato su pietre dure e girivole insieme con l'indice.

Le spire magnetizzanti, amperometriche o voltmetriche, vengono avvolte sopra un rocchetto fisso che racchiude l'equipaggio mobile e porta nella superficie interna un altro settore di ferro dolce parallelo al primo. (ved. fig. 117). Quando circola corrente nelle spire del rocchetto, i due settori si magnetizzano nello stesso senso (ved. fig. 118) e quindi si re-

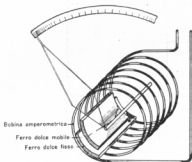


Fig. 117 - Strumento di misura « elettromagnetico » oppure « a ferro dolce » (per c.c. e c.a.).

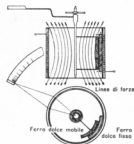


Fig. 118 - Vista schematica in elevazione e pianta di uno strumento elettromagnetico.

spingono ⁽¹⁾ dando luogo ad uno spostamento angolare del settore mobile ed alla conseguente deviazione dell'indice funzione della grandezza da misurare. Il senso delle indicazioni non dipende dal segno della corrente, o tensione, per cui lo strumento serve per misure sia in c.c. che in c.a.

La scala è del tipo quadratico perchè la coppia dipende dal prodotto delle induzioni dei due ferri dolci affacciati. Ma le induzioni dei due ferri dipendono dalla corrente e perciò la coppia è funzione del quadrato della corrente per cui la scala tende ad essere ristretta nel primo tratto ed allargata al fondo. I costruttori, sagomando in modo speciale i due ferri

⁽¹⁾ L'indice di questo strumento ha dunque un solo senso di spostamento a differenza di quello degli strumenti magnetoelettrici ed elettrodinamici che li hanno ambedue.

dolei, riescono ad ottenere scale quasi uniformi a partire da 1/5 della portata nominale. La coppia antagonista è fornita da molle a spirale.

Nelle misure in c. alternata questi strumenti danno precisioni, nelle indicazioni, del $\pm 1,5\%$. Se usato come amperometro si possono misurare direttamente delle intensità di corrente dell'ordine di qualche centinaio di ampere (anche fino a 400 A).

Come detto sopra, questi strumenti servono pure per misure in circuiti a corrente continua. Occorre però tener presente che a causa del fenomeno dell'isteresi magnetica del ferro non si possono in tal caso ottenere precisioni, nelle indicazioni, superiori al $\pm 2,5\%$ del valore nominale; pertanto per le misure in corrente continua sono consigliabili strumenti magnetoelettrici (cioè a bobina mobile e magneti permanenti).

Strumento elettrodinamico.

Gli strumenti elettrodinamici sono apparecchi di misura precisi ma delicati e costosi, vengono usati per misure di potenza (wattmetri).

Questi strumenti sono costituiti da una o due bobine fisse amperometriche di piccolissima resistenza (nel disegno di fig. 119 figurano due

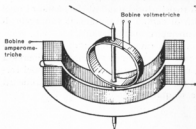


Fig. 119 - Strumento di misura « elettrodinamico » (per c.c. e c.a.).

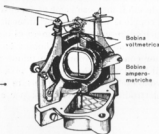


Fig. 120 - Vista d'insieme di uno strumento elettrodinamico.

bobine collegate in serie fra loro) e da una bobina mobile, la voltmetrica, interna alle fisse, di grande resistenza cioè costituita da molte spire di filo sottile; le due amperometriche si collegano in serie alla linea, la voltmetrica in derivazione. Quando circola corrente nelle bobine nasce una azione elettrodinamica tra esse (le due bobine fisse e la mobile) che provoca la rotazione dell'equipaggio mobile e tende a rendere complanare

la bobina mobile con le amperometriche fisse (il verso dell'azione elettrodinamica è sempre quello cui corrisponde un aumento del flusso concatenato con la bobina mobile).

Costruttivamente lo strumento elettrodinamico si può immaginare derivato dallo strumento magnetoelettrico al quale sia stato sostituito il campo costante creato dal magnete con il campo variabile (funzione della corrente) creato da una o due bobine fisse amperometriche: risulta la coppia motrice che agisce sulla bobina mobile solidale con l'indice dello strumento direttamente proporzionale al prodotto della corrente per la tensione cioè alla potenza: $W = V I$ (per la corrente alternata la formula della potenza risulta modificata, come vedremo in seguito). La coppia antagonista è fornita da due molle a spirale avvolte in senso contrario (così avvolte danno maggiore stabilità nella posizione dello zero). Questi strumenti si chiamano anche « strumenti elettrodinamici senza ferro » in contrapposto a quelli « con ferro » chiamati *ferrodinamici*.

La differenza consiste nel fatto che gli strumenti ferrodinamici presentano un circuito in ferro lamellato, di forma opportuna, ed eccitato dagli avvolgimenti fissi che creano il campo entro cui ruota la bobina mobile (voltmetrica). In tal modo, a pari amperspire magnetizzanti, rispetto allo strumento « senza ferro », si possono ottenere forti intensità di campo (da ciò il loro uso come strumenti registratori i quali abbisognano di forti « coppie ») oppure, a pari intensità di campo, presentano il vantaggio di richiedere un minor numero di amperspire magnetizzanti.

Di conseguenza le bobine hanno un ridotto numero di spire, un minor consumo proprio, un minor peso e nel complesso maggior sicurezza di funzionamento. Da tener presente che gli strumenti ferrodinamici servono esclusivamente per misure in corrente alternata mentre gli strumenti elettrodinamici servono sia per c. c. quanto per c. a.

CAPITOLO IX

CORRENTE ALTERNATA

Generalità sulle grandezze alternate.

Sono state considerate, finora, correnti continue, cioè correnti costanti in intensità, direzione e verso.

Le correnti di maggiori applicazioni industriali sono correnti che si propagano lungo i conduttori ora in un senso ora in senso opposto con legge alternativa nel tempo.

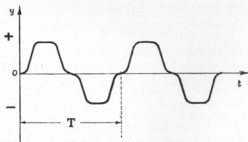


Fig. 121 - Rappresentazione in coordinate cartesiane di una grandezza alternata.
Ascisse t (tempi); ordinate y (valori istantanei della grandezza).

Queste correnti alternate si concepiscono, appunto, come un movimento oscillatorio degli elettroni lungo i conduttori.

Una grandezza si definisce *alternata*:

- 1) quando è periodica.

Questa prima condizione stabilisce che la grandezza deve assumere tutti i suoi possibili valori in un determinato intervallo di tempo che si chiama *periodo*, valori che ordinatamente devono susseguirsi negli uguali intervalli di tempo successivi (ved. fig. 121).

2) quando la media dei valori nel periodo è nulla;

Quest'altra condizione implica la divisione del periodo in due metà, o semiperiodi, in ciascuno dei quali il valore medio è uguale ma di segno contrario. Ovviamente, a tale cambiamento di segno nel periodo corrisponde un'inversione di senso della grandezza alternata.

Il periodo si esprime in secondi e si indica con la lettera T .

Il reciproco del periodo, $\frac{1}{T}$, definisce il numero dei periodi al secondo cioè la *frequenza*, f , ossia il numero delle volte in cui la grandezza assume tutti i suoi valori in un secondo.

La frequenza si misura con l'unità sec^{-1} denominata *hertz* ⁽¹⁾.

Grandezze alternate sinusoidali.

Si definisce *sinusoidale* la grandezza alternata variabile secondo il seno di un angolo uniformemente crescente come l'angolo descritto da un segmento che ruota attorno all'origine con velocità angolare uniforme ω ⁽²⁾:

$$y = Y_M \text{sen } \omega t$$

Studieremo solamente grandezze alternate di questo tipo e per ciascuna di esse indicheremo con lettera minuscola (es. y) i valori istantanei successivi della grandezza e con lettera maiuscola munita dell'indice M (es. Y_M) il suo valore massimo o *ampiezza*.

L'espressione $\omega t = \alpha$ ci dà la misura dell'angolo, espresso in radianti, percorso dal raggio nel tempo t .

La considerazione del segmento rotante permette una facile costruzione della curva rappresentativa della funzione $y = Y_M \text{sen } \omega t$ (ved. fig. 122).

Si descriva una circonferenza di raggio uguale all'ampiezza Y_M e si tracci un sistema di assi cartesiani le cui ascisse rappresentino i tempi

⁽¹⁾ Heinrich Hertz, fisico tedesco (1857-1894).

⁽²⁾ ω lettera minuscola dell'alfabeto greco. Si legge omèga. La velocità angolare ω , misurata in radianti/secondo è $\omega = 2\pi n$ ove n è il numero dei giri ogni secondo.

e le ordinate i valori istantanei successivi che la grandezza assume in funzione dei tempi.

Si suddivida in parti uguali (es. 12 nella figura) tanto la circonferenza quanto un segmento che nell'ascissa ci rappresenti, nella scala scelta, il periodo T . Dai vari punti della circonferenza si traccino le orizzontali limitandole con le corrispondenti verticali innalzate dai punti dell'ascissa, i punti d'intersezione determinano il diagramma ricercato.

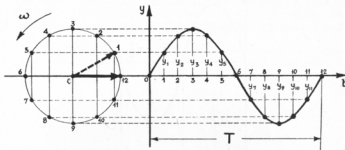


Fig. 122 - Costruzione di una curva sinusoidale.

Infatti ci è noto dalla trigonometria che le ordinate dei vari punti della circonferenza rappresentano i successivi valori istantanei, es.:

$$y_1 = \overline{C12} \widehat{\text{sen } 1 C12} = Y_M \widehat{\text{sen } \omega t_1}; \quad y_2 = \overline{C12} \widehat{\text{sen } 2 C12} = y_M \widehat{\text{sen } \omega t_2}, \text{ ecc.}$$

Oltre ai valori istantanei ed al valore massimo, altri elementi caratterizzano la grandezza alternata: il *valor efficace*, il *valor medio*, il *fattore di forma*.

Valor efficace.

Si definisce *valor efficace* di una grandezza alternata la radice quadrata della media dei quadrati dei valori istantanei assunti dalla grandezza nel periodo ⁽¹⁾.

(¹) Per il fatto che una c.a. ed una c.c. di valore uguale a quello efficace della c.a. producono entrambe la stessa quantità di calore in una stessa resistenza durante tempi uguali, si può dare, del valore efficace, la seguente definizione fisica

« L'intensità efficace di una c.a. corrisponde a quel valore costante che dovrebbe avere per produrre nello stesso tempo gli stessi effetti termici ».

Si indica con la sola lettera maiuscola (es. V , I). Il valor efficace di una grandezza sinusoidale è (ved. fig. 123):

$$Y = \frac{Y_M}{\sqrt{2}} = \frac{Y_M}{1,4} = 0,707 Y_M$$

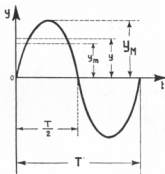


Fig. 123 - Valori caratteristici di una grandezza sinusoidale.

Valor medio.

Il *valor medio* di una grandezza alternata corrisponde all'ordinata media di una semionda (media aritmetica dei valori istantanei che la grandezza assume in ciascuno dei due semiperiodi in cui ha sempre lo stesso verso). Si indica con la lettera maiuscola ed indice m (es. V_m , I_m). Il valor medio di una grandezza sinusoidale è:

$$Y_m = \frac{2}{\pi} Y_M = 0,636 Y_M$$

Fattore di forma.

Il rapporto tra il valore efficace ed il valore medio si chiama *fattore di forma*. Il valore del fattore di forma per le grandezze sinusoidali è:

$$\frac{Y}{Y_m} = 1,11$$

Rappresentazione vettoriale.

Le grandezze sinusoidali si possono rappresentare o in coordinate cartesiane nelle quali si riportano i valori istantanei come ordinate riferite alle ascisse (tempi) o, meglio ancora, mediante *vettori* ⁽¹⁾.

Un vettore ci può rappresentare una grandezza sinusoidale se questo ha una ampiezza uguale al valore massimo della grandezza e se lo immaginiamo rotante (per convenzione si suppone rotante a sinistra) con velocità angolare costante ω uguale alla *pulsazione* ($2\pi f$) della stessa ⁽²⁾ (vedere fig. 124).

La proiezione del vettore sull'asse $o y$, chiamato *asse dei valori istantanei* rotato di 90° a sinistra rispetto all'*asse dei tempi* o *asse polare* o $o x$

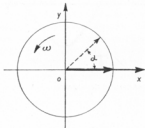


Fig. 124 - Rappresentazione vettoriale.

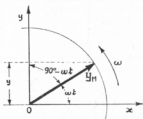


Fig. 125 - Valori istantanei.

a partire dal quale vanno valutati gli angoli, ci proporziona in qualunque istante i valori istantanei $y = Y_M \sin \omega t = Y_M \cos (90 - \omega t)$ della grandezza (ved. fig. 125).

(1) Un vettore (ved. fig. 126) è un segmento munito di freccia che con la sua ampiezza (*modulo*) ci rappresenta, in una determinata scala, il valore di una grandezza e con la sua direzione e verso la direzione e verso della grandezza considerata.

Un vettore si indica, comunemente, mediante una lettera maiuscola sormontata da una sbarretta orizzontale (es. \vec{A}).

(2) La pulsazione corrisponde al prodotto di 2π per la frequenza f , essa risulta misurata in *radianti al secondo*.



Fig. 126 - Vettore.

Concetto di « fase ».

Nella trattazione finora fatta, noi abbiamo supposto di incominciare a contare i tempi nell'istante in cui la grandezza sinusoidale è zero e sta per iniziare un semiperiodo positivo. In tal caso la sinusoide rappresentativa della funzione $y = Y_M \sin \omega t$, assume, rispetto agli assi cartesiani, la posizione di fig. 127.

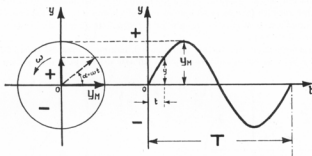


Fig. 127 - Grandezza sinusoidale di fase zero.

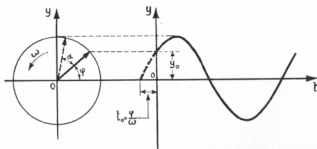


Fig. 128 - Grandezza sinusoidale di fase angolare φ .

Se invece il vettore rappresentativo, nell'istante in cui si incominciano a contare i tempi, ha oltrepassato l'asse di riferimento di un angolo φ ⁽¹⁾, *angolo di fase*, come in fig. 128, si ha che in detto istante iniziale ($t = 0$) la grandezza ha raggiunto il valore $y_0 = Y_M \sin \varphi$.

(1) φ lettera minuscola dell'alfabeto greco. Leggasi « fi ».

Di conseguenza dopo trascorso il tempo t , il vettore che ha descritto in più l'angolo ωt viene a formare l'angolo $\varphi + \omega t$: il suo corrispondente valore istantaneo è dunque:

$$y = Y_M \text{sen} (\varphi + \omega t)$$

Questa grandezza inizia e termina ogni suo periodo con un costante anticipo di tempo ⁽¹⁾ rispetto alla grandezza isofrequenziale di fig. 127 la quale si dice di *fase zero* perchè nell'istante in cui si inizia il computo dei tempi essa, provenendo dai valori negativi, ha valore nullo.

Dunque le due grandezze sinusoidali considerate differiscono angularmente di φ : si parla di *differenza di fase* o *sfasamento delle due grandezze*.

In particolare due grandezze sinusoidali, isofrequenziali, si dicono tra loro *in fase* quando è zero la differenza di fase delle due grandezze (passano per i valori massimi positivi e per quelli massimi negativi nello stesso istante), si dicono in *quadratura* se hanno uno sfasamento di un quarto di periodo ed in conseguenza i vettori rappresentativi comprendono un angolo di 90° , si dicono in *opposizione* se sono sfasate l'una dall'altra di mezzo periodo ed in conseguenza i vettori rappresentativi sono l'uno in opposizione all'altro.

Somma e differenza di grandezze sinusoidali.

Nella risoluzione dei problemi sulle correnti alternate ricorre spesso la necessità di dover fare la somma o la differenza di due o più grandezze sinusoidali, isofrequenziali.

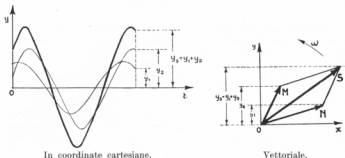
Se le grandezze sono rappresentate in coordinate cartesiane e si vogliono sommare le due grandezze $y_1 = Y_{M1} \text{sen} (\omega t + \varphi_1)$ ed $y_2 = Y_{M2} \text{sen} (\omega t + \varphi_2)$, bisognerà sommare per ogni valore dell'ascissa (tempo), le ordinate che rappresentano i valori istantanei delle grandezze addendi e riferire l'ordinata somma alla comune ascissa (ved. fig. 129).

⁽¹⁾ Per trovare il tempo t_0 trascorso dall'istante in cui la grandezza provenendo dai valori negativi è passata per lo zero, all'istante in cui si incominciano a contare i tempi basta dividere l'angolo $\varphi = \omega t_0$ per la velocità angolare $\omega = 2\pi f$:

$$t_0 = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi f} = T \frac{\varphi}{2\pi}$$

Come si vede dalla costruzione fatta, l'esecuzione di una somma è alquanto laboriosa.

Per semplificare conviene rappresentare le grandezze sinusoidali con vettori ed operare su di essi come si opera sulle grandezze vettoriali: è



In coordinate cartesiane.

Vettoriale.

Figg. 129-130 - Somme di grandezze sinusoidali.

noto che la somma delle proiezioni di un sistema qualunque di vettori su un asse prescelto è, in ogni istante, sempre uguale alla proiezione sullo stesso asse del vettore risultante, somma geometrica dei vettori addendi.

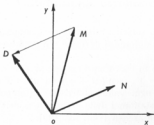


Fig. 131 - Differenza di due vettori.

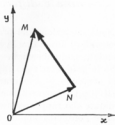


Fig. 132 - NM vettore differenza.

(Per convincerci di quanto sopra asserito basta pensare che il poligono di composizione, rotando i vettori componenti con la stessa velocità angolare ω , non si deforma durante la rotazione).

In conseguenza (ved. fig. 130) la somma algebrica delle proiezioni sull'asse dei valori istantanei Oy di due vettori OM ed ON rappresenta-

tivi di due grandezze sinusoidali, isofrequenziali, è data dalla proiezione, sullo stesso asse, della loro risultante \overline{OS} diagonale del parallelogrammo costruito sui due vettori componenti.

La differenza di due vettori $\overline{OM} - \overline{ON} = \overline{OD}$ si ottiene sommando al primo (minuendo) il contrario del secondo (sottraendo), ved. fig. 131. Più speditamente si ottiene il vettore differenza $\overline{OM} - \overline{ON} = \overline{NM}$ col tracciare il vettore (ved. fig. 132) che parte dalla fine del vettore sottraendo e va alla fine del vettore minuendo.

Derivata di una funzione sinusoidale.

Nell'istante generico t , il vettore rotante $ON = Y_M$ (ved. fig. 133) forma l'angolo $\alpha = \omega t$ con l'ascissa Ox ed assume il valore $y = Y_M \sin \omega t$.

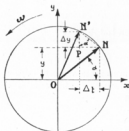


Fig. 133 - Per esprimere la derivata di una funzione sinusoidale.

Dopo un tempuscolo Δt il valore istantaneo y subisce l'incremento Δy mentre l'estremo del vettore ha descritto l'arco NN' . Si ha:

$$\frac{\text{arco } NN'}{\Delta t} = \frac{\text{circonferenza}}{\text{periodo}} = \frac{2\pi Y_M}{T} = 2\pi f Y_M = \omega Y_M$$

Dal triangolo rettangolo $NP N'$ si ricava:

$$\text{corda } NN' = \frac{N'P}{\cos \alpha} = \frac{\Delta y}{\cos \omega t}$$

Per Δt piccolissimo, si può confondere la corda NN' con l'arco (arco $NN' = \omega Y_M \cdot \Delta t$). Risultata:

$$\frac{\Delta y}{\cos \omega t} = \omega Y_M \cdot \Delta t$$

da cui:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \omega Y_M \cos \omega t$$

Al limite, per Δt tendente a zero, il rapporto $\frac{\Delta y}{\Delta t}$ definisce la *derivata* della funzione considerata, derivata che si indica con $\frac{dy}{dt}$:

$$\frac{dy}{dt} = \omega Y_M \cos \omega t$$

Dato che il coseno di un angolo è uguale al seno dell'angolo che è più grande di $\frac{\pi}{2}$, si ha anche:

$$\frac{dy}{dt} = \omega Y_M \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

espressione la quale dice:

« La derivata di una funzione sinusoidale rispetto alla variabile t è una funzione sinusoidale, isofrequenziale, di ampiezza ω volte maggiore, sfasata in quadratura anticipo ».

Generazione di f.e.m. sinusoidali.

Si consideri la bobinetta di fig. 98, supposta costituita da una sola spira immersa nel campo uniforme di induzione B ; sia Φ_M il flusso concatenato con la spira nella posizione in cui il piano della spira è normale alle linee di flusso (*posizione di riferimento*).

Se si fa rotare la spira con velocità angolare uniforme ω attorno ad un asse giacente nel piano della spira, normale alle linee di flusso e passante per il suo centro di figura, sarà $\alpha = \omega t$ l'angolo di cui ha rotato la spira rispetto alla posizione di riferimento nell'istante generico t e:

$$\Phi_{ic} = \Phi_M \cos \omega t = \Phi_M \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

il valore del flusso che in quell'istante risulta concatenato con la spira.

Questa espressione ci dice che se la spira ruota con velocità angolare costante ω , il flusso con essa concatenato varierà con legge sinusoidale.

Sia $\Delta\Phi$ la variazione ($\Phi_2 - \Phi_1$) del flusso concatenato nel tempuscolo Δt , il valore della f.e.m. media indotta nella spira nell'intervallo di tempo Δt avrà l'espressione generale:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - E_m$$

Al limite, per Δt tendente a zero il rapporto diventa la derivata del flusso rispetto al tempo:

$$\frac{d\Phi}{dt} = - e = - \frac{d \left[\Phi_M \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right]}{dt}$$

Sappiamo che la derivata di una funzione sinusoidale è una funzione sinusoidale, isofrequenziale, di ampiezza ω volte maggiore, sfasata in quadratura anticipo. E poiché la f.e.m. indotta è la contraria della derivata, risulta la e ad essa in opposizione, cioè in definitiva, in quadratura ritardo:

$$e = - \omega \Phi_M \sin(\omega t + \pi) = \omega \Phi_M \sin \omega t \text{ (}^1\text{)}$$

Dunque: e la f.e.m. indotta è in quadratura *ritardo* rispetto al flusso che la determina *.

Per $\sin \omega t = 1$ si ottiene il valore massimo della f.e.m. indotta:

$$E_M = \omega \Phi_M$$

che sostituito nella precedente espressione si ricava:

$$e = E_M \sin \omega t$$

La f.e.m. così ottenuta viene completamente rappresentata da un vettore di ampiezza E_M rotante con velocità angolare ω . Il periodo T corrisponde al tempo impiegato dalla spira a compiere un giro completo.

Risulta ovvio che si ottengono identici effetti se invece di far rotare la spira (es. dinamo) si fa rotare il campo induttore (es. alternatore).

Il principio è stato schematizzato nella macchina elettrica di fig. 134 (schema dell'alternatore monofase) costituita da un *rotore*, calettato sull'albero, che porta due espansioni polari nord e sud rispettivamente, e da uno *statore*: anello di materiale magnetico che sostiene, entro apposite *cave* l'avvolgimento indotto. Per semplicità è stata indicata una sola

(¹) Si ha che: $-\sin(\omega t + \pi) = +\sin \omega t$.

spira indotta entrante in P (principio della spira) ed uscente in F (fine della spira).

Ogni nucleo polare porta le spire eccitrici (avvolgimento induttore alimentato da una sorgente di c.c.) atte a produrre il flusso Φ , che esce, per convenzione, dal polo nord, attraversa il *traferro* e convogliato dal circuito magnetico statorico rientra per il polo sud.

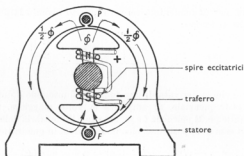


Fig. 134 - Schema di un alternatore monofase.

Evidentemente al rotare dell'induttore, il flusso concatenato con la spira indotta varia con legge alternativa nel tempo: ad ogni giro corrisponde un periodo e la frequenza al numero dei giri rotorici per secondo.

CIRCUITI PERCORSI DA CORRENTI ALTERNATE

La corrente continua, nel percorrere i circuiti, incontra un solo ostacolo: la resistenza ohmica.

La corrente alternata, invece, deve tener conto di più effetti nel propagarsi lungo i circuiti. Questi effetti sono dovuti a:

- a) la resistenza,
- b) l'induttanza,
- c) la capacità.

Circuiti con sola resistenza.

Si alimenti un circuito costituito da una resistenza R ⁽¹⁾, ved. fig. 135, mediante una tensione sinusoidale di valori istantanei v , di ampiezza V_M e pulsazione $2\pi f = \omega$. I suoi valori, nel tempo, variano con la legge espressa dalla formula:

$$v = V_M \text{sen } \omega t$$

In ogni istante il valore dell'intensità i della corrente circolante è regolata dalla legge di Ohm:

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_M \text{sen } \omega t}{R} = \\ = \frac{V_M}{R} \text{sen } \omega t = I_M \text{sen } \omega t$$

Questa espressione ci dice che in un circuito puramente ohmico la corrente varia con legge sinusoidale, ha la stessa pulsazione e la stessa fase della tensione che la determina (ved. diagramma fig. 136), ha valore massimo $I_M = \frac{V_M}{R}$ da cui (dividendo ambo i membri per $\sqrt{2}$) si ottiene il valore efficace $I = \frac{V}{R}$.

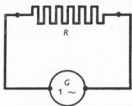


Fig. 135 - Circuito puramente ohmico.

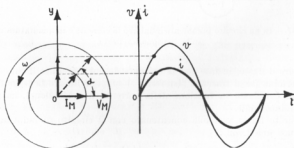


Fig. 136 - In un circuito puramente ohmico, tensione e corrente sono in fase tra loro.

⁽¹⁾ Si considera il caso ideale di un circuito di induttanza nulla o trascurabile o, come si dice, di un circuito di « pura resistenza ».

Conseguentemente si ha $R = \frac{V}{I}$ e $V = R I$, espressione, questa ultima, uguale a quella della corrente continua ove ai valori costanti della tensione e della corrente si sostituiscono i valori efficaci che si hanno nelle grandezze alternate.

Il prodotto $R I$ misura la *caduta ohmica* di tensione.

Circuiti con sola induttanza.

Si alimenti il circuito induttivo L (costituito da una bobina di resistenza trascurabile, ved. schema fig. 137) con una corrente sinusoidale di valore efficace I , sarà $\Phi = L I$ il flusso concatenato con il circuito.

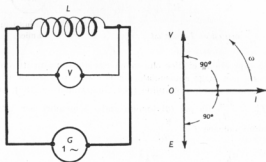


Fig. 137 - In un circuito puramente induttivo la corrente è in quadratura ritardo sulla tensione applicata.

Pure il flusso, in fase con la corrente da cui è eccitato il campo che lo determina (se si trascura l'isteresi e si suppone lineare la legge di variazione del flusso in funzione della corrente di eccitazione), ha andamento sinusoidale.

Questo flusso variabile concatenato con il circuito di induttanza L vi induce una f.e.m.:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(LI)}{dt} = - L \frac{di}{dt}$$

ossia la f.e.m. indotta istantanea è data dal contrario del prodotto dell'induttanza per la derivata della corrente rispetto al tempo, quindi,

essendo $i = I_M \text{ sen } \omega t$ si ha, ricordando l'espressione della derivata di una funzione sinusoidale (ved. pag. 135):

$$e = -L \frac{d(I_M \text{ sen } \omega t)}{dt} = -\omega L I_M \text{ sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

che risulta, causa il segno $-$, in quadratura ritardo sulla corrente (ved. diagramma fig. 137).

Affinchè possa sussistere questa f.e.m. autoindotta è necessario, per equilibrarla, applicare al circuito una tensione v in opposizione ad essa ($v + e = 0$ cioè $v = -e$), dunque in valore:

$$v = \omega L I_M \text{ sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

ed in quadratura anticipo sulla corrente che detta tensione determina.

In definitiva:

« In un circuito puramente induttivo, la corrente è in quadratura *e ritardo* sulla tensione applicata ».

Da quest'ultima espressione si ricava: $V_M = \omega L I_M$; dividendo entrambi i membri per $\sqrt{2}$ otteniamo i valori efficaci: $V = \omega L I$. Ponendo $\omega L = X_L$, risulta:

$$V = X_L I$$

Il fattore X_L , che sostituisce R , prende il nome di *reattanza induttiva*, si misura in ohm perchè ha le stesse dimensioni della resistenza.

Il prodotto $X_L I$ misura la *caduta induttiva* di tensione.

Circuiti con sola capacità.

Il condensatore inserito nel circuito di fig. 138 (circuito *puramente capacitivo* perchè supponiamo di resistenza ed induttanza nulle, o trascurabili) sia alimentato da una tensione alternata sinusoidale.

Consideriamo la carica che assume il condensatore in due istanti successivi t_1 e t_2 .

Per l'equazione fondamentale dei condensatori essa è, rispettivamente, $q_1 = C v_1$ e $q_2 = C v_2$.

Quindi la variazione di carica, nel tempo $t_2 - t_1$, è $q_2 - q_1 = C (v_2 - v_1)$ ossia $\Delta q = C \Delta v$ se poniamo $q_2 - q_1 = \Delta q$ e $v_2 - v_1 = \Delta v$.

Dividendo entrambi i membri dell'espressione $\Delta q = C \Delta v$ per l'intervallo di tempo Δt , avremo:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta v}{\Delta t} = I_m$$

e per un intervallo di tempo infinitamente piccolo, $dt: C \frac{dv}{dt} = i$.

Dunque, dal prodotto della capacità del condensatore per la derivata della tensione (applicata alle armature stesse) rispetto al tempo, otteniamo il valore istantaneo della corrente che circola nel conduttore di collegamento delle due armature.

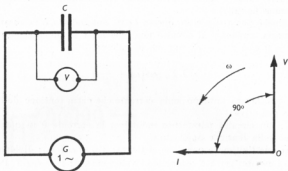


Fig. 138 - In un circuito puramente capacitivo, la corrente è in quadratura anticipo sulla tensione applicata.

Essendo $v = V_M \text{sen } \omega t$ si ha, ricordando l'espressione della derivata di una funzione sinusoidale:

$$i = C \frac{d(V_M \text{sen } \omega t)}{dt} = \omega C V_M \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Dunque:

« La corrente che circola in un circuito puramente capacitivo risulta « in quadratura *anticipo* sulla tensione applicata » (ved. diagramma fig. 138).

Da detta espressione abbiamo che $I_M = \omega C V_M$; dividendo entrambi i membri per $\sqrt{2}$ otteniamo i valori efficaci, $I = \omega C V$, da cui $V = \frac{I}{\omega C}$. Ponendo $\frac{1}{\omega C} = X_C$ risulta:

$$V = X_C I$$

Il fattore X_C che sostituisce R prende il nome di *reattanza capacitiva*, si misura in ohm perchè ha le stesse dimensioni della resistenza.

Il prodotto $X_C I$ misura la *caduta capacitiva* di tensione.

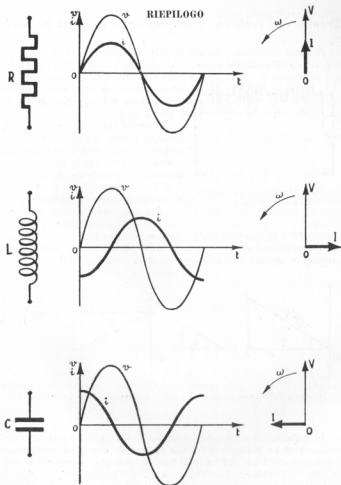


Fig. 139 - Diagrammi caratteristici di circuiti rispettivamente: puramente ohmico, induttivo, capacitivo.

Circuiti con resistenza, induttanza e capacità in serie.

Si abbia un circuito ohmico, induttivo e capacitivo come in fig. 140. In detto circuito affinché circoli la corrente di intensità I si deve applicare una tensione V che equilibri la somma vettoriale delle cadute di tensione ohmica $R I$, induttiva $X_L I$ e capacitiva $X_C I$.

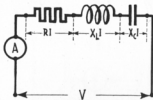


Fig. 140 - Circuito ohmico, induttivo e capacitivo.

Notiamo che il vettore $X_L I$ è opposto al vettore $X_C I$: la loro somma vettoriale viene così a risultare una somma algebrica che si traduce in una differenza aritmetica: $X_L I - X_C I = X I$ ove $X_L - X_C = X$. Il fattore X prende il nome di *reattanza*.

In ogni caso questa differenza aritmetica è in quadratura con il vettore $R I$ e precisamente in quadratura anticipo sulla corrente se prevale la reattanza induttiva (ved. fig. 141), in quadratura ritardo (sulla corrente) se prevale la reattanza capacitiva (ved. fig. 142).

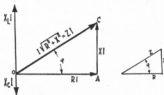


Fig. 141 - Triangolo delle tensioni e triangolo delle impedenze per $X_L > X_C$.

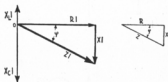


Fig. 142 - Triangolo delle tensioni e triangolo delle impedenze per $X_L < X_C$.

In definitiva il valore della tensione V da applicare alla serie sarà l'ipotenusa di un triangolo rettangolo che ha per cateti, rispettivamente, la componente $V_R = R I$ in fase con la corrente, componente della tensione che chiameremo *attiva*, e la componente $V_L = X I$, in quadratura con la corrente, componente della tensione che chiameremo *reattiva*.

È questo il *triangolo delle tensioni*.

In questo triangolo, da semplici considerazioni geometriche relative al teorema di Pitagora si ha:

$$V = I \sqrt{R^2 + X^2}$$

Alla grandezza $\sqrt{R^2 + X^2}$ si attribuisce il nome di *impedenza* e si indica con la lettera Z .

L'impedenza Z viene misurata in ohm perchè le sue dimensioni, come la resistenza e la reattanza, sono i $\frac{\text{volt}}{\text{ampere}}$.

Questa impedenza consente di esprimere il valore efficace della tensione applicata V mediante la semplice relazione:

$$V = Z I$$

Costruiamo il triangolo delle tensioni per una corrente di ampiezza unitaria, si ottiene, rispettivamente, un triangolo simile chiamato *triangolo dell'impedenza* (ved. figg. 141 e 142) che ha per ipotenusa l'impedenza Z e per cateti la resistenza R e la reattanza X .

Dall'esame dei corrispondenti triangoli delle tensioni e dell'impedenza si osserva che lo sfasamento tra la tensione e la corrente è lo stesso dello sfasamento fra l'impedenza e la resistenza:

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{X}{R} = \text{arc cos } \frac{R}{Z} = \text{arc sen } \frac{X}{Z}$$

Circuiti mancanti di R, L oppure C.

Dalla formula generale si può passare ai casi particolari (circuiti con resistenza ed induttanza in serie, ovvero resistenza e capacità in serie, oppure induttanza e capacità in serie) ponendo uguale a zero, rispettivamente, X_C , X_L od R .

Come caso particolare accenniamo ad un circuito di induttanza L variabile e di resistenza R costante, come ad es. il circuito di fig. 143, composto da una bobina costituita da più centinaia di spire con in serie una lampadina ad incandescenza. La bobina che considereremo di resistenza trascurabile contenga un nucleo mobile di ferro: lo spostamento del nucleo determina una variazione del valore dell'induttanza L della bobina.

Mediante la manovra di un opportuno commutatore si può alimentare questo circuito sia a corrente alternata che a corrente continua. Inseriamo il circuito sulla

corrente alternata. Per l'elevato valore dell'induttanza della bobina dovuta alla presenza del ferro in essa annegato che aumenta la sua reattanza (e perciò l'impedenza del circuito) a valori tali da ridurre notevolmente l'intensità di corrente nel circuito, notiamo un semplice arrossamento nel filamento della lampadina.

Si estraiga lentamente il nucleo di ferro dalla bobina: constateremo la progressiva accensione della lampada fino alla massima intensità luminosa a nucleo completamente estratto, quando cioè l'impedenza del circuito, per la forte diminuzione di L , si può considerare costituita dalla sola resistenza R della lampadina.

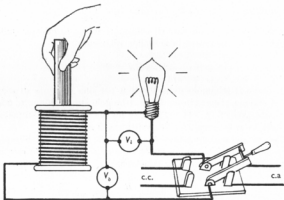


Fig. 143.

Se ripetiamo l'esperimento con corrente continua, noteremo che la brillantezza della lampada non varia sia a nucleo ferroso del tutto immerso sia se completamente estratto dalla bobina.

Infatti nei circuiti alimentati con corrente continua sono in gioco solamente resistenze e non reattanze in quanto il flusso magnetico generato dalla corrente continua si considera costante nel tempo ($\omega = 0$).

Si osservino le indicazioni dei due voltmetri che misurano le cadute di tensione, rispettivamente nella lampadina e nella bobina.

Mentre in corrente continua la somma delle loro indicazioni uguaglia il valore della tensione applicata, in corrente alternata si constata che la somma delle loro indicazioni è sempre maggiore del valore della tensione applicata al circuito in quanto quest'ultima è l'ipotenusa del triangolo rettangolo i cui cateti sono la tensione applicata alla lampadina e quella applicata all'induttanza, cateti che hanno complessivamente un'ampiezza maggiore dell'ampiezza dell'ipotenusa.

Esercizio 1. Con m 300 di filo di rame sez. 1 mm² si è costituita una bobina. Se alimentiamo la bobina con una tensione alternata sinusoidale 220 V — 50 Hz, l'amperometro indica 22 A. Calcolare l'induttanza L della bobina ed il $\cos \varphi$.

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,017 \frac{300}{1} = 5,1 \Omega \quad Z = \frac{V}{I} = \frac{220}{22} = 10 \Omega$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{10^2 - 5,1^2} = 8,6 \Omega \quad X = \omega L = 314 L$$

$$L = \frac{8,6}{314} = 0,027 \text{ H} = 27 \text{ mH} \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{5,1}{10} = 0,51$$

Esercizio 2. Una bobina ha la resistenza $R = 10$ ohm e l'induttanza $L = 32$ mH. Mediante un commutatore può essere alimentata sia da una tensione continua sia da una tensione alternata 50 Hz (ved. fig. 144). Affinchè l'amperometro elettromagnetico indichi sempre 10 A quale dev'essere il valore della tensione nei due casi?

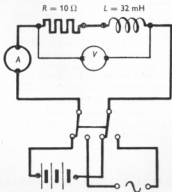


Fig. 144.

$$V_s = R I_s = 10 \cdot 10 = 100 \text{ V}$$

$$X = \omega L = 10 \Omega \quad Z = \sqrt{10^2 + 10^2} = 14,1 \Omega$$

$$V_s = Z I_s = 14,1 \cdot 10 = 141 \text{ V}$$

Circuiti in risonanza.

Nel caso speciale che nel circuito serie R, L, C , si abbia $X_L = X_C$ (ved. fig. 145) si ottiene che il secondo addendo del radicando $\sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ si annulla.

In tale ipotesi Z diventa uguale ad R e si ha: $V = RI$ cioè il circuito si comporta come se esistesse la sola resistenza ohmica (gli effetti opposti dell'induttanza e della capacità si compensano) mentre di conseguenza l'angolo φ si annulla ($\cos \varphi = 1$). In questo caso si dice che il circuito è in *risonanza* e più precisamente in *risonanza di tensione*.

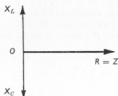


Fig. 145 - In condizioni di risonanza la caduta di tensione induttiva $X_L I$ eguaglia quella capacitiva $X_C I$.

Al verificarsi di questo fenomeno il circuito richiede ai capi una tensione pari a quella che equilibra la caduta ohmica mentre ai capi dell'induttanza e del condensatore si rendono misurabili le due tensioni $X_L I$ ed $X_C I$ uguali ed opposte. Queste due tensioni possono assumere valori notevoli pur essendo piccola la V risultante se la X_L e la X_C sono notevolmente più grandi della R .

CONDUTTANZA, SUSCETTANZA, AMMETTENZA

Avevamo supposto di scomporre la tensione V applicata ad un circuito (ved. triangolo delle tensioni) nelle sue componenti ortogonali in fase ed in quadratura con la corrente.

In modo analogo si può pensare di decomporre la corrente I che percorre il considerato circuito nelle sue componenti in fase ed in quadratura con la tensione (ved. fig. 146).

La prima, determinata dalla relazione $I_G = I \cos \varphi$ è la componente in fase con la tensione che chiameremo *corrente attiva* (come ci renderemo conto dopo aver studiato le potenze in corrente alternata), la seconda

$I_B = I \sin \varphi$ è la componente in quadratura con la tensione che chiameremo *corrente reattiva* ⁽¹⁾.

Queste due correnti fra loro in quadratura formano i cateti di un triangolo rettangolo chiamato *triangolo delle correnti* (ved. fig. 147) che

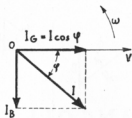


Fig. 146.

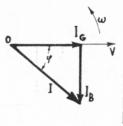


Fig. 147.



Fig. 148.

Triangoli delle correnti e dell'ammettenza.

ha per ipotenusa la corrente $I = \sqrt{I_G^2 + I_B^2}$. Se noi adesso dividiamo i lati del triangolo per il valore V della tensione, avremo un triangolo simile, chiamato *triangolo dell'ammettenza* (ved. fig. 148) i cui lati si chiamano, rispettivamente, *conduttanza*

simbolo $G = \frac{I \cos \varphi}{V} = \frac{I_G}{V}$, *suscet-*

tanza simbolo $B = \frac{I \sin \varphi}{V} = \frac{I_B}{V}$,

ammettenza simbolo $Y = \frac{I}{V}$.

Dette grandezze G, B, Y , così denominate, hanno per dimensioni $\frac{\text{ampere}}{\text{volt}}$

quindi si esprimono in ohm^{-1} la cui unità di misura è il *siemens*. Esse rappresentano fisicamente: G la corrente attiva, B la corrente reattiva,

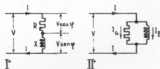


Fig. 149 - Circuiti equivalenti.

⁽¹⁾ Come, dunque, se al circuito in serie considerato (ved. fig. 149 I) sostituissero l'equivalente sistema di due lati in parallelo (ved. fig. 149 II) di cui un lato, puramente resistivo, venga percorso dalla corrente $I \cos \alpha = I_G$ e l'altro lato, puramente reattivo, venga percorso dalla corrente $I \sin \alpha = I_B$. (Un circuito si dice equivalente ad un altro quando, alimentato da identica tensione, assorbe dalla linea la stessa intensità di corrente con lo stesso fattore di potenza).

Y la corrente totale che si stabilirebbe nel circuito considerato se la tensione di alimentazione fosse di 1 V.

Il triangolo dell'ammettenza deriva dal triangolo delle correnti come il triangolo dell'impedenza deriva dal triangolo delle tensioni a cui è simile.

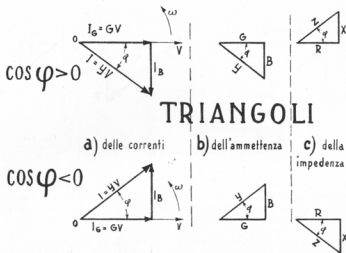


Fig. 150 - Raffronti tra i vari triangoli nei casi di carico induttivo e carico capacitivo.

In fig. 150 si sono confrontati i triangoli delle tensioni, dell'ammettenza e dell'impedenza sia nel caso di carico induttivo ($\cos \varphi > 0$) sia nel caso di carico capacitivo ($\cos \varphi < 0$). Dal confronto dei corrispondenti triangoli si nota che mentre la resistenza R e la conduttanza G vengono rappresentate con due cateti equiversi (R e G sono sempre grandezze positive), la reattanza X e la suscettanza B vengono rappresentate con due cateti opposti per uno stesso circuito (la reattanza e la suscettanza di uno stesso circuito hanno segni contrari).

Dall'espressione analitica dell'impedenza, $Z = \frac{V}{I}$, e dell'ammettenza, $Y = \frac{I}{V}$, deduciamo che l'una grandezza è il reciproco dell'altra ($Y = \frac{1}{Z}$).

Lo sfasamento della corrente sulla tensione si ha, nel triangolo delle impedenze, nell'angolo che la resistenza R forma con l'impedenza Z oppure, nel triangolo dell'ammettenza, dall'uguale angolo che forma la conduttanza G con l'ammettenza Y . Si ricava:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{G}{Y}$$

$$\text{sen } \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{B}{Y}$$

da cui si ottengono i valori di:

$$G = \frac{R}{Z} \cdot Y = \frac{R}{Z} \cdot \frac{1}{Z} = \frac{R}{Z^2} = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

$$B = \frac{X}{Z} \cdot Y = \frac{X}{Z} \cdot \frac{1}{Z} = \frac{X}{Z^2} = \frac{X}{R^2 + X^2}$$

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

come pure:

$$R = \frac{G}{Y} \cdot Z = \frac{G}{Y} \cdot \frac{1}{Y} = \frac{G}{Y^2} = \frac{G}{G^2 + B^2}$$

$$X = \frac{B}{Y} \cdot Z = \frac{B}{Y} \cdot \frac{1}{Y} = \frac{B}{Y^2} = \frac{B}{G^2 + B^2}$$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B^2}}$$

Come caso particolare, abbiamo che la conduttanza coincide con l'inverso della resistenza solo nel caso di reattanza nulla e che la suscettanza coincide con l'inverso della resistenza, cambiata di segno, solo se è nulla la resistenza.

Un qualsiasi circuito si può dunque considerare sia come un circuito formato da una resistenza R ed una reattanza X collegate in serie sia sotto la forma dell'equivalente circuito formato da una conduttanza G ed una suscettanza B collegate in parallelo. Le formule di trasformazione danno la possibilità di calcolare G, B, Y del circuito equivalente noti R, X, Z e viceversa.

Circuiti composti.

Nei circuiti formati da più impedenze collegate in serie (ved. fig. 151) che hanno perciò in comune la corrente, si ottiene la tensione risultante V applicata al circuito sommando i vettori che rappresentano le tensioni parziali esistenti ai capi delle successive impedenze.

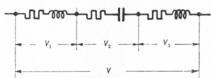


Fig. 151 - Impedenze in serie.

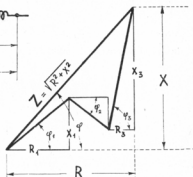


Fig. 152 - Composizione di più impedenze in serie.

La somma di questi vettori $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots$ sfasati rispettivamente dell'angolo $\varphi_1 = \arccos \frac{R_1}{Z_1}, \varphi_2 = \arccos \frac{R_2}{Z_2} \dots$ rispetto alla corrente, risulta lunga e laboriosa.

Si arriva più facilmente al risultato se prima si sommano aritmeticamente le tensioni attive $V_{r1}, V_{r2} \dots$ in fase con la corrente, poi si sommano algebricamente le tensioni reattive $V_{L1}, V_{L2} \dots$ in quadratura con I (somma algebrica perchè le tensioni reattive possono avere lo stesso segno o segno opposto): dalla loro composizione si ottiene il vettore V in grandezza e fase. Anzi se consideriamo le tensioni attive e reattive che richiede la corrente unitaria, veniamo a considerare la somma aritmetica delle resistenze ($R = R_1 + R_2 \dots$) e la somma algebrica delle reattanze ($X = X_1 + X_2 \dots$), ved. fig. 152.

Dal triangolo rettangolo di cateti R ed X si ricava l'impedenza equivalente della serie, di valore $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ il cui vettore è deviato dall'angolo $\varphi = \arccos \frac{R}{Z}$ rispetto alla R .

Nei circuiti formati da più impedenze in parallelo (ved. fig. 153) alimentati perciò dalla stessa tensione V , la corrente totale I assorbita

dal circuito risulta somma vettoriale di tutte le correnti I_1, I_2, \dots assorbite dai lati derivati, sfasate ordinatamente dell'angolo $\varphi_1 = \arctg \frac{X_1}{R_1}$,

$\varphi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2} \dots$ sulla tensione.

In luogo di una laboriosa somma vettoriale delle correnti I_1, I_2, \dots , conviene scomporre queste nelle rispettive componenti attive e reattive, eseguire la somma aritmetica delle componenti attive, $I_G = I_{G1} + I_{G2}, \dots$, poi la somma algebrica delle componenti reattive, $I_B = I_{B1} + I_{B2}, \dots$, dalla loro composizione si ottiene la corrente risultante in grandezza e fase.

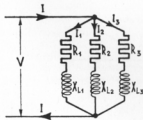


Fig. 153 - Impedenze in parallelo.

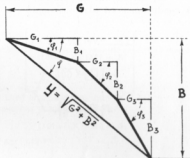


Fig. 154 - Composizione di più ammettenze in parallelo.

È più semplice considerare le conduttanze, $G = \frac{R}{R^2 + X^2}$, e le suscettanze, $B = \frac{X}{R^2 + X^2}$, (dunque le correnti attive e reattive determinate dalla tensione unitaria) dei diversi lati indi eseguire la somma aritmetica delle singole conduttanze ($G = G_1 + G_2, \dots$) poi la somma algebrica delle rispettive suscettanze ($B = B_1 + B_2, \dots$) ed ottenere l'ammettenza complessiva del circuito dal triangolo rettangolo che ha per cateti G e B (ved. fig. 154)

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Si conclude che il circuito formato da più elementi in parallelo equivale ad un circuito unico di conduttanza che risulta somma delle singole conduttanze e di suscettanza somma delle singole suscettanze.

Questo circuito equivalente ha una resistenza $R = \frac{G}{Y^2}$, una reattanza $X = \frac{B}{Y^2}$ ed una impedenza $Z = \frac{1}{Y^2}$ che forma l'angolo $\varphi = \text{arc tg } \frac{X}{R}$ con la R .

Riepilogando:

a) nei circuiti in serie si sommano aritmeticamente tra loro le resistenze ed algebricamente tra loro le reattanze;

b) nei circuiti in parallelo si sommano aritmeticamente tra loro le conduttanze ed algebricamente tra loro le suscettanze.

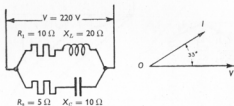


Fig. 155.

Esercizio 1. Ad un arco doppio (ved. fig. 155) formato dalle specificate resistenze e reattanze, è applicata la tensione $V = 220$ V, frequenza 50 Hz. Determinare la corrente assorbita dal circuito ed il suo sfasamento rispetto alla tensione applicata.

1° Si determinino le conduttanze e le suscettanze dei lati derivati (X e B hanno segni contrari):

$$G_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{10}{10^2 + 20^2} = 0,02 \Omega^{-1}$$

$$B_1 = -\frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = -\frac{20}{10^2 + 20^2} = -0,04 \Omega^{-1}$$

$$G_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2} = \frac{5}{5^2 + 10^2} = 0,04 \Omega^{-1}$$

$$B_2 = -\frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} = -\frac{10}{5^2 + 10^2} = 0,08 \Omega^{-1}$$

Risultano le conduttanze e suscettanze totali:

$$G = G_1 + G_2 = 0,02 + 0,04 = 0,06 \Omega^{-1}$$

$$B = B_1 + B_2 = -0,04 + 0,08 = 0,04 \Omega^{-1}$$

Ammettenza complessiva dell'arco doppio:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,06^2 + 0,04^2} = \sqrt{0,0052} = 0,0707 \Omega^{-1}$$

La corrente assorbita dal circuito si ottiene dall'espressione $I = YV$:

$$I = 0,0707 \cdot 220 = 15,55 \text{ A}$$

L'angolo di sfasamento tra corrente e tensione è: $\varphi = \arctg \frac{B}{G}$:

$$\varphi = \arctg \frac{0,04}{0,06} = \arctg 0,66 = 33^\circ$$

La corrente risulta sfasata in anticipo sulla tensione essendo positivo l'angolo (circuito capacitivo).

Esercizio 2. In serie all'arco doppio sopra considerato si abbia una impedenza formata da una resistenza $R' = 2,5 \Omega$ ed una reattanza induttiva $X'_L = 11,6 \Omega$ (ved. fig. 156) ed applichiamo al complesso la stessa tensione.

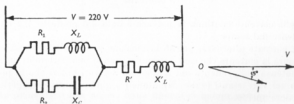


Fig. 156.

Determinare la corrente circolante nell'impedenza in serie all'arco doppio e lo sfasamento della corrente sulla tensione.

In questo caso bisogna calcolare la resistenza R_e e la reattanza X_e del circuito equivalente all'arco doppio. A questi valori trovati sommeremo aritmeticamente la $R' = 2,5 \Omega$ ed algebricamente la $X'_L = 11,6 \Omega$:

$$R_e = \frac{G}{Y^2} = \frac{0,06}{0,0052} = 11,5 \Omega$$

$$X_e = -\frac{B}{Y^2} = -\frac{0,04}{0,0052} = -7,6 \Omega$$

Otterremo:

$$R = R_x + R' = 11,5 + 2,5 = 14 \Omega$$

$$X = X_x + X'_L = -7,6 + 11,6 = 4 \Omega$$

Ricaviamo il valore dell'impedenza totale Z :

$$Z = \sqrt{14^2 + 4^2} = 14,56 \Omega$$

da cui otteniamo il valore della corrente circolante:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{14,56} = 15,1 \text{ A}$$

La corrente totale risulta sfasata in ritardo sulla tensione (X è positiva) dell'angolo determinato da:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{4}{14} = \arctg 0,28 = 15^\circ 40'$$

Potenza.

Nella corrente continua la potenza è data dal prodotto $V I$ ed è indipendente dal tempo.

In corrente alternata, poichè la tensione varia da istante ad istante e così pure la corrente che essa determina, non si può parlare di un valore della potenza indipendente dal tempo ma dei vari valori che la potenza assume nei vari istanti (valori istantanei) e quindi, ai fini energetici, del loro valore medio.

La potenza istantanea, che esprimeremo con il simbolo p , è uguale al prodotto della v e della i dell'istante generico considerato.

Quindi possiamo scrivere $p = v i$ da cui, con sviluppi analitici, si perviene alla seguente espressione:

$$p = V I \cos \varphi + V I \sin \left(2 \omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi \right)$$

Questa espressione ci dice che la potenza istantanea, p , è somma di due addendi di cui uno costante ($V I \cos \varphi$) che ha come valore medio il suo stesso valore, e l'altro, funzione sinusoidale di pulsazione 2ω , ha valore medio nullo per tutti i multipli del semiperiodo delle grandezze v ed i .

Risulta dunque che la potenza media (o *potenza reale*) è:

$$P = V I \cos \varphi$$

ed è rappresentata, graficamente, dall'ordinata media (asse di simmetria) della sinusoide $p = v i$ che dà la legge di variazione della potenza in funzione del tempo in un semiperiodo (ved. fig. 157).

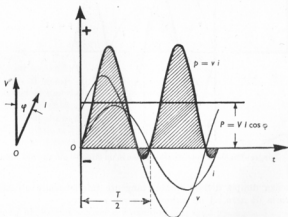


Fig. 157 - Diagramma delle potenze istantanee in un circuito ohmico-induttivo.

In generale (come ad es. dalla figura) si hanno intervalli di tempo durante i quali la potenza è positiva (prodotta dal generatore) ed intervalli di tempo durante i quali la potenza risulta negativa (restituita al generatore).

Nel caso che nel semiperiodo le due indicate potenze si equivalgano (ved. fig. 158) si ha che l'asse di simmetria della sinusoide $p = v i$ coincide con l'asse dei tempi e perciò la media di tutte le potenze istantanee diventa uguale a zero.

In questo caso la curva sinusoidale delle potenze istantanee p ci rappresenta l'uguale quantità di energia che il generatore, in un semiperiodo, prima eroga e poi assorbe.

Questo stato di regime si verifica in un circuito puramente induttivo (corrente in quadratura ritardo sulla tensione) oppure in un circuito puramente capacitivo (corrente in quadratura anticipo sulla tensione). Se

invece la corrente è in fase con la tensione, il prodotto dei due valori istantanei v ed i risulta sempre positivo: la sinusoide che lo rappresenta,

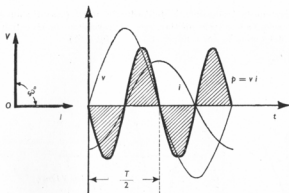


Fig. 158 - Diagramma delle potenze istantanee in un circuito puramente induttivo.

di frequenza doppia della corrente, tangente inferiormente all'asse dei tempi, varia da zero ad un valore massimo positivo.

La potenza $V I \cos \varphi$ è minore, in generale, del prodotto dei valori efficaci della tensione e della corrente, infatti il fattore $\cos \varphi$ per cui occorre moltiplicare questo prodotto non sempre raggiunge l'unità. Tale fattore che riduce la potenza quando tensione e corrente non sono in fase si chiama *fattore di potenza*.

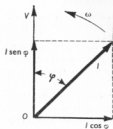


Fig. 159 - Componente attiva e reattiva di corrente.

Dall'espressione $P = V I \cos \varphi$ si desume che noi possiamo avere la stessa potenza sia se nel circuito abbiamo la effettiva corrente I sfasata sulla tensione che la determina dell'angolo φ , sia ancora se al circuito abbiamo una sua componente di valore $I \cos \varphi$ in fase con la tensione.

In conseguenza si può ritenere (ved. fig. 159) la effettiva corrente come composta dalle sue componenti: $I \cos \varphi$ in fase con la V che è quella che dà la reale potenza data dalla I sfasata dell'angolo φ e la $I \sin \varphi$ in quadratura con

la V che dà una potenza nulla come valore medio e dire che la $I \cos \varphi$ è la componente che dà lavoro (corrente attiva I_G) e la $I \sin \varphi$ la componente che non dà lavoro (corrente reattiva I_B).

Triangolo delle potenze.

Il prodotto di V per I_B definisce la potenza reattiva (Q) del circuito:

$$Q = V I \sin \varphi$$

espressione che ci rappresenta il valore di quella potenza che fluisce in un quarto di periodo dal generatore all'utilizzatore e nel quarto di periodo successivo dal ricevitore al generatore.

Perciò il valore medio della potenza reattiva è nullo per tutti i multipli del semiperiodo delle grandezze V ed I .

L'unità di misura della potenza reattiva, chiamata var (VAR), è definita dal valore unitario del prodotto della tensione per la componente reattiva della corrente.

Il prodotto di V per I si chiama *potenza apparente* (P_a):

$$P_a = V I$$

La sua unità di misura è il voltampere (VA) definita dal valore unitario del prodotto dei volt per gli ampere.

Il triangolo delle potenze (ved. fig. 160) si può ottenere o dal triangolo delle tensioni, a cui è simile, moltiplicando tutti i lati per I , oppure dal triangolo delle correnti, a cui è pure simile, moltiplicando tutti i lati per V .

Dal triangolo rettangolo delle potenze si ottengono le relazioni:

$$P = P_a \cos \varphi$$

$$Q = P_a \sin \varphi = P \operatorname{tg} \varphi$$

Dalla prima relazione si deduce il fattore di potenza:

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_a}$$

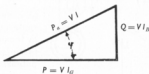


Fig. 160 - Triangolo delle potenze.

Rifasamento degli impianti.

I circuiti industriali presentano fattori di potenza inferiori all'unità perchè la corrente erogata all'impianto è sempre sfasata più o meno in ritardo sulla tensione applicata all'impianto.

Negli impianti di illuminazione ad incandescenza il carico è puramente ohmico ($\cos \varphi = 1$), ma negli impianti di illuminazione a fluorescenza il carico è fortemente induttivo ($\cos \varphi = 0,4$ circa).

I circuiti che alimentano dei motori hanno basso fattore di potenza, circa 0,8 se funzionanti a pieno carico e 0,3, circa, se funzionanti a vuoto.

Se l'impianto ha uno sfasamento φ , la potenza erogata all'impianto è funzione del valore della corrente attiva, $I \cos \varphi$, mentre le perdite in linea sono funzione del quadrato della corrente I .

Da ciò consegue che se è possibile far erogare alla linea solo la corrente attiva (con ciò la corrente circolante in linea risulterebbe in fase con la tensione applicata), le perdite in linea si ridurrebbero secondo il quadrato di detto fattore di potenza.

Per raggiungere tale scopo si fa l'operazione che si suole chiamare di *rifasamento dell'impianto*.

Detta operazione consiste nell'affidare il compito di fornire la corrente reattiva, di cui abbisognano gli utilizzatori, a condensatori collegati in parallelo a detti utilizzatori (vedere fig. 161 a).

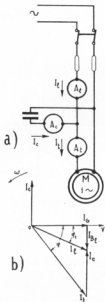


Fig. 161 - Rifasamento di un carico induttivo.

In queste condizioni il generatore che alimenta la linea fornisce la sola potenza reale $P = V I \cos \varphi$ mentre il condensatore fornisce tutta la potenza reattiva $Q = V I \sin \varphi = P \operatorname{tg} \varphi$ richiesta dagli utilizzatori. Deve perciò la potenza reattiva $Q_C = \omega C V^2$ del condensatore ⁽¹⁾, uguagliare la potenza reattiva $P \operatorname{tg} \varphi$ richiesta dall'utilizzatore:

$$\omega C V^2 = P \operatorname{tg} \varphi$$

(1) La potenza reattiva data da un condensatore è $V \cdot I \sin \varphi = B V^2$ ove B , essendo il circuito puramente reattivo, è uguale a $\frac{1}{X_C}$ uguale ad ωC .

Di conseguenza risulta la capacità del condensatore:

$$C = \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{\omega V^2}$$

Quando invece si vuole ottenere un rifasamento parziale della potenza reattiva di cui abbisogna il ricevitore, una parte di questa potenza reattiva viene fornita dalla linea e la residua parte dal condensatore.

Infatti se noi vogliamo che la linea, anzichè assumere il fattore di potenza uno (rifasamento totale), assuma un fattore di potenza maggiore di quello del ricevitore unico equivalente a tutti i ricevitori dell'impianto, veniamo implicitamente a stabilire quale aliquota della potenza reattiva essa deve fornire.

Così se $\cos \varphi_1$ è il fattore di potenza che deve assumere la linea, essa viene ad erogare al ricevitore una potenza reattiva $P \operatorname{tg} \varphi_1$ ove P è la potenza attiva che richiede il ricevitore e che la linea gli deve fornire.

In conformità il condensatore dovrà fornire una potenza reattiva pari alla differenza tra quella $P \operatorname{tg} \varphi$ che richiede il ricevitore e quella $P \operatorname{tg} \varphi_1$ che gli fornisce la linea, ossia, in definitiva, una potenza reattiva:

$$Q_c = \omega C V^2 = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1)$$

Di conseguenza risulta la capacità del condensatore:

$$C = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1)}{\omega V^2}$$

L'amperometro inserito sulla linea a monte del condensatore indicherà la I_t fornita dalla linea, composta da tutta la corrente attiva (I_a) e dalla parte della corrente reattiva (I_{B1}) che essa continua a fornire al ricevitore (ved. fig. 162 a e diagramma fig. 161 b), l'amperometro inserito sulla linea a valle del condensatore indicherà logicamente l'intensità totale, I_c , assorbita dal ricevitore e composta da tutta la corrente attiva e da tutta la corrente reattiva richiesta dal ricevitore ed infine l'amperometro inserito tra il condensatore e la linea indicherà la residua parte di corrente reattiva, I_r , che quello deve fornire al ricevitore.

Esercizio. Un impianto a corrente alternata monofase, tensione 1200 V, 50 Hz, assorbe una potenza reale $P = 150$ kW a $\cos \varphi = 0,6$.

Si vuole elevare il fattore di potenza, $\cos \varphi$, in linea al valore 0,85 mediante un condensatore (od una batteria di condensatori) in parallelo sul carico.

Determinare la potenza reattiva fornita dal condensatore e le potenze apparenti a monte ed a valle del condensatore.

Calcolare la I_c , la I_t e la I_e (ved. diagramma fig. 162 a).

Potenza reattiva fornita dal condensatore:

$$\cos \varphi = 0,6 \quad \varphi = 53^\circ \quad \operatorname{tg} \varphi = 1,33$$

$$\cos \varphi_i = 0,85 \quad \varphi_i = 32^\circ \quad \operatorname{tg} \varphi_i = 0,62$$

$$Q_c = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_i) = 150 (1,33 - 0,62) = 106,6 \text{ kVAR}$$

Calcolo delle correnti e delle relative potenze apparenti (ved. diagramma fig. 162 b):

$I_t = \frac{P}{V \cos \varphi}$ Intensità di corrente assorbita dall'impianto (a valle del condensatore). È la corrente che prima del rifasamento circolava anche in linea:

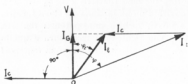


Fig. 162 a - Diagramma delle correnti (rifasamento parziale).

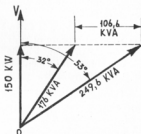


Fig. 162 b - Diagramma delle potenze (rifasamento parziale).

$$I_t = \frac{150\,000}{1200 \cdot 0,6} = 208 \text{ A} \quad P_a = 1200 \cdot 208 = 249,6 \text{ kVA}$$

$I_i = \frac{P}{V \cos \varphi_i}$ Intensità di corrente circolante in linea (a monte del condensatore) dopo il rifasamento:

$$I_i = \frac{150\,000}{1200 \cdot 0,85} = 147 \text{ A} \quad P_{a1} = 1200 \cdot 147 = 176,4 \text{ kVA.}$$

$I_c = \frac{Q_c}{V}$ Intensità di corrente fornita dal condensatore:

$$I_c = \frac{106\,500}{1200} = 88 \text{ A}$$

Capacità del condensatore ($Q_c = 2 \pi f C V^2$):

$$C = \frac{Q_c}{2 \pi f V^2} = \frac{106\,500}{452\,160\,000} = 0,000235 \text{ F} = 235 \mu\text{F}$$

METODO SIMBOLICO

Un vettore \vec{A} possiamo sempre rappresentarlo mediante le sue componenti ortogonali: una nella direzione e verso di un prefissato asse di riferimento la quale si indica con la sola grandezza scalare a , l'altra rotata di 90° a sinistra rispetto a detto asse la quale si indica col suo valore, b , preceduto dal simbolo j (ved. fig. 163).

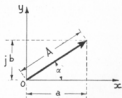


Fig. 163 - Rappresentazione simbolica del vettore \vec{A} .

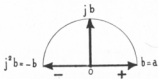


Fig. 164 - Proprietà del simbolo j .

Con queste premesse possiamo considerare il vettore \vec{A} come somma vettoriale di queste due componenti:

$$\vec{A} = a + j b$$

di modulo:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}$$

di argomento, o fase:

$$\alpha = \arctg \frac{b}{a} = \arccos \frac{a}{A} = \arcsen \frac{b}{A}$$

Possiamo anche ritenere che j sia un vettore unitario rotato di 90° a sinistra rispetto all'asse di riferimento, quindi $j b$ un vettore di modulo b nella direzione di j (mentre b ci indica un vettore di grandezza scalare b ma orientato nella direzione dell'asse di riferimento come a) e $j \cdot j b = j^2 b$ un vettore sempre di modulo b ma rotato di 90° a sinistra rispetto al vettore $j b$ ossia rotato di 180° rispetto all'asse di riferimento (ved. fig. 164).

Dunque $j^2 b = -b$ da cui dividendo entrambi i membri per b otteniamo:

$$j^2 = -1$$

cioè:

$$j = \sqrt{-1}$$

Da questo risultato deduciamo che il simbolo j prescelto ad indicare la rotazione di 90° a sinistra di un vettore si può interpretare come l'unità immaginaria, a cui in effetti equivale, e l'espressione $a + j b$ viene a risultare un numero complesso dato che esso è formato da una parte reale, a , e da una parte immaginaria, $j b$, prodotto di un numero reale b per l'unità immaginaria j .

Per il fatto che un vettore si può rappresentare con un numero complesso, si opera sui vettori come si procede per i numeri complessi mediante operazioni algebriche ordinarie tenendo sempre presente che $j^2 = -1$.

Somma.

Per sommare due vettori espressi simbolicamente da due numeri complessi $\vec{A}_1 = a_1 + j b_1$ ed $\vec{A}_2 = a_2 + j b_2$ si sommano tra loro le parti reali e tra loro le parti immaginarie (ved. fig. 165).

$$\vec{A}_1 + \vec{A}_2 = \vec{A} = (a_1 + a_2) + j (b_1 + b_2)$$



Fig. 165 - Somma di due vettori espressi in termini complessi.

« Il vettore somma di due vettori è dato da un numero complesso che ha per parte reale la somma delle parti reali e per parte immaginaria la somma delle parti immaginarie ».

Prodotto.

1) di un vettore $\vec{A} = a + j b$ per un numero reale n .

Si ottiene il vettore prodotto:

$$n \vec{A} = n (a + j b) = n a + j n b$$

di modulo:

$$n \sqrt{a^2 + b^2}$$

di argomento:

$$\alpha = \arctg \frac{n b}{n a} = \arctg \frac{b}{a}$$

« Moltiplicando un vettore per un numero reale si ottiene un vettore di modulo n volte maggiore del modulo del vettore moltiplicando e della stessa fase ».

$$2) \text{ di due vettori } \vec{A} = a + j b, \vec{A}' = a' + j b'.$$

L'operazione di moltiplicazione sui numeri complessi che rappresentano i due vettori, si effettua moltiplicando tra di loro i binomi di cui sono costituiti i numeri complessi e sostituendo a j^2 il valore -1 che gli equivale:

$$\vec{A} \cdot \vec{A}' = (a + j b) (a' + j b') = (a a' - b b') + j (a b' + a' b)$$

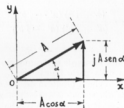
Se l'operazione di moltiplicazione viene fatta su vettori espressi nella forma simbolica trigonometrica ⁽¹⁾ si perviene, sviluppando le operazioni, alla formula:

$$\vec{A} \cdot \vec{A}' = A (\cos \alpha + j \sin \alpha) \cdot A' (\cos \alpha' + j \sin \alpha') = A \cdot A' [\cos (\alpha + \alpha') + j \sin (\alpha + \alpha')]$$

« Il prodotto di due vettori è un vettore che ha per modulo il prodotto dei moduli e per argomento la somma degli argomenti ».

⁽¹⁾ Nella forma simbolica trigonometrica il vettore componente lungo l'asse di riferimento si esprime con il valore del vettore moltiplicato per il coseno dell'angolo di cui esso è rotato rispetto a detto asse ed il vettore lungo l'asse rotato di 90° a sinistra col valore dello stesso vettore moltiplicato per il seno del ripetuto angolo preceduto, naturalmente, dal simbolo j (ved. fig. 166).

Fig. 166 - Componenti di un vettore espresso in forma trigonometrica.



In definitiva se A è il valore o modulo del vettore ed α l'angolo di cui esso è rotato rispetto all'asse di riferimento, avremo, raccogliendo A a fattore comune:

$$\vec{A} = A (\cos \alpha + j \sin \alpha).$$

Quoziente.

1) di un vettore $\bar{A} = a + j b$ diviso per un numero reale n .
Si ottiene il vettore quoziente:

$$\frac{\bar{A}}{n} = \frac{a + j b}{n} = \frac{a}{n} + j \frac{b}{n}$$

di modulo:

$$\frac{1}{n} \cdot \sqrt{a^2 + b^2}$$

di argomento:

$$\alpha = \text{arc tg } \frac{b/n}{a/n} = \text{arc tg } \frac{b}{a}$$

« Dividendo un vettore per un numero reale si ottiene un vettore
« di modulo $\frac{1}{n}$ del modulo del vettore dividendo e di fase invariata ».

2) di due vettori $\bar{A} = a + j b$, $\bar{A}' = a' + j b'$

$$\frac{\bar{A}}{\bar{A}'} = \frac{a + j b}{a' + j b'}$$

Per eseguire la divisione bisogna prima razionalizzare il divisore moltiplicando numeratore e denominatore per il coniugato ⁽¹⁾ del denominatore con ciò il divisore diventa un numero reale somma dei quadrati della parte reale e del coefficiente della parte immaginaria ⁽²⁾.

$$\frac{\bar{A}}{\bar{A}'} = \frac{(a + j b)(a' - j b')}{(a' + j b')(a' - j b')} = \frac{a a' + b b'}{a'^2 + b'^2} + j \frac{a' b - a b'}{a'^2 + b'^2}$$

⁽¹⁾ Si dice *coniugato* di un numero complesso quello che da questo differisce per il segno della parte immaginaria.

⁽²⁾ È noto che il prodotto della somma di due numeri per la loro differenza è uguale alla differenza dei quadrati degli stessi numeri. Siccome si effettua l'operazione su numeri complessi, si ha che il sottraendo viene preceduto dal simbolo j^2 : questo secondo termine diventa un addendo positivo come si vede dal seguente sviluppo:

$$(a + j b)(a - j b) = a^2 - (j^2 b^2) = a^2 - (-b^2) = a^2 + b^2$$

Se l'operazione di divisione viene fatta su vettori espressi nella forma simbolica trigonometrica si perviene, con facili passaggi, alla formula:

$$\frac{\vec{A}}{\vec{A}'} = \frac{A (\cos \alpha + j \operatorname{sen} \alpha)}{A' (\cos \alpha' + j \operatorname{sen} \alpha')} = \frac{A}{A'} [\cos (\alpha - \alpha') + j \operatorname{sen} (\alpha - \alpha')]$$

« Il quoziente di due vettori è un vettore che ha per modulo il quoziente dei moduli e per argomento la differenza degli argomenti ».

Grandezze alternate non sinusoidali.

Spesse volte, causa dei fenomeni perturbatori di origine interna, le forme d'onda delle grandezze elettriche (tensioni, correnti, flussi magnetici, ecc.) si discostano più o meno dalla forma sinusoidale.

Le grandezze alternate che non seguono l'andamento sinusoidale vengono chiamate *grandezze deformate*.

Come si dimostra, qualsiasi curva deformata risulta somma di più curve sinusoidali: una di frequenza uguale alla deformata, chiamata *onda fondamentale* o *prima armonica* e altre di frequenza rispettivamente doppia, tripla, quadrupla, ecc. denominate, ordinatamente, *seconda*, *terza*, *quarta armonica*, ecc. (Teorema di Fourier).

Le grandezze elettriche deformate che si incontrano nella pratica sono sprovviste di armoniche di ordine pari, inoltre le armoniche di ordine settimo, nono, ecc. sono di entità trascurabile perchè di ampiezze molto attenuate rispetto alla fondamentale, anzi, nei casi più comuni, è sufficiente considerare la sola terza armonica oltre la fondamentale per definire la deformata legge di variazione ricercata.

Nel diagramma di fig. 167 *a* si è tracciata l'onda deformata che si ottiene sovrapponendo all'onda fondamentale la terza armonica di ampiezza pari ad $1/5$ della fondamentale ed in fase con essa.

Nel diagramma di fig. 167 *b* si è tracciata l'onda deformata ottenuta dalla sovrapposizione delle stesse quando la terza armonica è sfasata di 180° rispetto alla fondamentale.

Si applichi una tensione deformata ad un circuito:

a) puramente ohmico: la corrente assume una forma del tutto simile a quella deformata della tensione;

b) puramente induttivo: causa la reattanza proporzionale alle diverse armoniche (se $X_L = \omega L$ è la reattanza relativa alla frequenza dell'onda fondamentale, sarà $3 X_L$ la reattanza per la terza armonica, ecc.) risultano attenuate le armoniche superiori della corrente. L'andamento della deformata della corrente tende perciò alla forma sinusoidale;

c) puramente capacitivo: causa la reattanza inversamente proporzionale alla frequenza ($X_C = \frac{1}{\omega C}$) risultano più pronunciate, in rapporto alla fondamentale, le armoniche superiori della corrente che non le armoniche superiori della tensione.

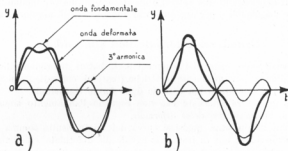


Fig. 167 - Sovrapposizione di un'onda fondamentale e di una terza armonica:
a) in fase, b) in opposizione di fase.

Nei circuiti induttivi-capacitivi queste divergenze vengono amplificate soprattutto quando la frequenza di qualche armonica coincide con la frequenza di risonanza del circuito.

I circuiti costituiti da una induttanza e da una capacità in serie offrono la minima impedenza all'armonica rispetto alla quale sono accordati (es. aria) e massima rispetto alle rimanenti, i circuiti con induttanza e capacità in parallelo si comportano in modo opposto. Su queste proprietà si fondano i *circuiti filtro* per bloccare o lasciar passare determinate armoniche.

Induttanza nel ferro.

Un circuito induttivo immerso in un mezzo di permeabilità costante (es. aria) ha induttanza costante perchè è lineare la legge di variazione del flusso concatenato Φ_C in funzione della corrente di eccitazione.

Invece un circuito avvolto su un nucleo ferromagnetico ha induttanza variabile per la non linearità di detta legge. Infatti la curva rap-

presentativa ⁽¹⁾ ha inclinazione variabile e quindi vengono ad essere variabili i valori delle tangenti trigonometriche relativi alle coordinate dei vari punti della curva (valori di L corrispondenti ai diversi valori delle i)

Concludiamo che se la corrente che percorre un circuito di induttanza variabile è sinusoidale ($i = I_M \text{ sen } \omega t$) non può essere sinusoidale il flusso come ovviamente appare dalla seguente espressione:

$$\Phi_c = L i = L I_M \text{ sen } \omega t$$

essa ci esprime: affinché il flusso concatenato sia sinusoidale è necessario che il suo valore massimo $L I_M$ (ed in ultima analisi L), sia costante.

Se dunque applichiamo una tensione sinusoidale ai capi di un circuito avvolto su materiale ferromagnetico, mentre necessariamente è sinusoidale la f.e.m. di autoinduzione che la equilibra e perciò pure sinusoidale il flusso di cui quella è la velocità di variazione, non può essere sinusoidale la corrente che lo eccita perchè quella non varia proporzionalmente a questo.

Viceversa se è sinusoidale la corrente magnetizzante non può essere sinusoidale la tensione applicata.

Ricerchiamo la legge di variazione dell'una grandezza in funzione dell'altra.

Consideriamo il caso (più comune in pratica) di un avvolgimento magnetizzante avvolto su un nucleo di ferro alimentato in derivazione da una linea (ved. fig. 169 a) mantenuta a tensione sinusoidale prefissata.

Trascuriamo la resistenza dell'avvolgimento: la tensione applicata di valori istantanei $v = V_M \text{ sen } \omega t$ è equilibrata, in ogni istante, esclusivamente dalla f.e.m. di autoinduzione la cui curva è sinusoidale perchè è sinusoidale la tensione applicata.

Di conseguenza pure il flusso concatenato Φ_c (e l'induzione B) del circuito magnetico debbono avere andamento sinusoidale.

Si consideri la curva che ci dà la legge di variazione del flusso concatenate-

⁽¹⁾ La curva anzidetta ha per ordinate il flusso concatenato (valori istantanei Φ_c), e per ascisse la corrente di eccitazione i (ved. fig. 168).

I valori delle tangenti trigonometriche $\left(\frac{\Phi_c'}{i'} = L'\right)$ relativi alle coordinate dei vari punti della curva ci danno i valori medi delle indutanze tra l'origine O ed i punti considerati.

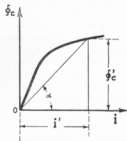


Fig. 168.

nato Φ_c in funzione della corrente i che lo eccita (curva di magnetizzazione).

Essa risulta composta di due rami simmetrici rispetto all'origine O (ved. fig. 169 b) purchè si prescindano dal fenomeno dell'isteresi cioè si suppongano coincidenti con la linea mediana del ciclo sia la curva di magnetizzazione crescente che quella decrescente.

Si tracci (ved. fig. 169 c) la curva di variazione del flusso concatenato, nel tempo, che risulta sinusoidale perchè, come detto, è sinusoidale la tensione applicata.

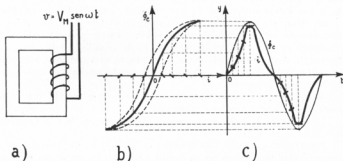


Fig. 169 - Effetto della saturazione del materiale. Onda di corrente deformata assorbita da un avvolgimento alimentato da una tensione sinusoidale.

Si divida il periodo T in parti uguali, dai punti di divisione si elevino le ordinate che ci danno i valori del flusso concatenato a cui corrispondono le correnti magnetizzanti, assorbite dall'avvolgimento, misurate sull'ascissa i (ricavabili mediante l'indicata costruzione).

Ogni valore della corrente magnetizzante i si riporti come ordinata sulla corrispondente divisione prima determinata sull'ascissa t ; si ottiene per punti la ricercata curva che ci rappresenta la legge di variazione della corrente magnetizzante in funzione del tempo: curva deformata di forma appuntita in sommità e variazione lenta verso lo zero che rivela la deformazione caratteristica dipendente da una terza armonica in opposizione di fase ⁽¹⁾. Viceversa se si eccita l'avvolgimento del

⁽¹⁾ Per semplicità, nella accennata costruzione grafica, non si è tenuto conto dell'isteresi. Effettivamente l'onda di corrente dovrebbe essere dedotta usando le due diverse curve di magnetizzazione crescente e decrescente, che provocano

circuito in esame con una corrente sinusoidale, risulta deformata la curva della tensione (di forma depressa in sommità e molto ripida verso lo zero che rivela la deformazione caratteristica dipendente da una terza armonica di fase zero) (ved. fig. 167 a).

Perdite nel ferro.

Si è accennato che i circuiti magnetici soggetti a flussi alternati sono sedi di perdite che si traducono in dannosi riscaldamenti: perdite per isteresi (funzione lineare della frequenza e del quadrato dell'induzione massima, $P_i = K_i f B^2$ ved. pag. 93) e perdite per correnti parassite (ved. pag. 110) funzioni quadratiche dello spessore Δ , espresso in mm, delle lamiere, della frequenza e dell'induzione massima: $P_p = K_p (\Delta f B)^2$, dove il coefficiente K_p dipende dalla composizione del materiale costituente le lamiere.

Per le lamiere normali $K_p = 14$ e per le lamiere al silicio $K_p = 5$ circa.

Le perdite si limitano, come detto, con l'usare lamiere al silicio oppure lamiere a cristalli orientati fra loro isolate.

Le perdite totali ($P_t = P_i + P_p$) si calcolano in watt per ogni m^2 di materiale ferroso (perdite specifiche):

$$P_t = K_i f B^2 + K_p (\Delta f B)^2$$

Però, industrialmente, le perdite totali si riferiscono ad 1 kg di materiale ferroso, per $B = 1 \text{ Wb/m}^2$ ed $f = 50 \text{ Hz}$ (cifra di perdita delle lamiere).

Es. per le lamiere normali (lamiera nera o da dinamo) la cifra di perdita è di 3,6 W/kg circa, per le lamiere al silicio la cifra di perdita minima è di 0,93 W/kg circa (con 4,4% di Si) mentre per le lamiere a cristalli orientati la cifra di perdita scende fino a 0,45 W/kg.

un'onda di corrente non simmetrica rispetto al suo valore massimo ed in ritardo di fase sul flusso, dissimmetria che si accentua ancora se teniamo conto anche delle correnti parassite nel ferro.



CAPITOLO X
SISTEMI POLIFASI

GENERALITÀ

Finora ci siamo occupati di circuiti semplici, di circuiti nei quali agisce una sola f.e.m. alternata.

Se raggruppiamo più circuiti semplici nei quali le f.e.m. abbiano la stessa frequenza ma fase diversa, costituiamo un *sistema polifase*; ogni circuito componente prende il nome di *fase* (prima, seconda, terza fase, ecc.).

Un sistema può essere costituito da fasi distinte (sistema polifase a circuiti indipendenti), sistema questo che non apporta nessun vantaggio, o può essere formato da fasi opportunamente collegate tra loro così da costituire un *sistema polifase composto*.

« Se nel sistema polifase vi agiscono f.e.m. uguali in valore ed ugualmente sfasate tra loro, il sistema si chiama *simmetrico* ».

Un sistema simmetrico composto da n fasi ha le f.e.m. sfasate ordinatamente, l'una rispetto all'altra, di una frazione di periodo pari a $\frac{1}{n}$ di T per cui i vettori di uguale modulo che rappresentano queste grandezze risultano deviati di un angolo pari a $\frac{360^\circ}{n}$.

Così abbiamo il *sistema trifase* rappresentato da tre vettori di uguale ampiezza divergenti da un centro O ed ordinatamente sfasati l'uno dall'altro di $\frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$ (ved. fig. 170 a), il *sistema esafase* rappresentato da 6 vettori uguali ordinatamente sfasati, l'uno dall'altro, di $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$ (ved. fig. 170 b), ecc.

La produzione industriale dell'energia elettrica, il suo trasporto e la distribuzione agli utenti è organizzata sull'impiego del sistema trifase, il più rispondente, col quale si realizzano quei vantaggi che volta per volta metteremo in risalto.

Per determinate applicazioni (es. alimentazione dei *raddrizzatori a vapori di mercurio*) si hanno sistemi simmetrici di ordine elevato (esafase, dodecafase) perchè, come vedremo in seguito, quanto più è elevato il

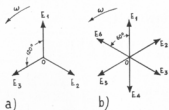


Fig. 170 - Rappresentazione vettoriale:

- a) di un sistema trifase;
b) di un sistema esafase.

numero delle fasi tanto più piccolo è lo scarto della tensione di erogazione del raddrizzatore dal suo valore medio.

L'ordine crescente della numerazione delle fasi indica, per convenzione, l'ordine dei ritardi. Siccome si suppone che i vettori rotino nel verso sinistrorso si ha quindi che l'ordine crescente della numerazione è destrorso.

Ad es. nel sistema trifase la 2ª f.e.m. è in ritardo di un terzo di periodo rispetto alla 1ª quindi il suo vettore è rotato a destra di 120° , la 3ª f.e.m. ritarda di un terzo di periodo rispetto alla 2ª, di conseguenza è essa in anticipo di un terzo di periodo rispetto alla 1ª f.e.m.

Generazione dei sistemi polifasi.

Si consideri una macchina generatrice simile all'alternatore schematizzato in fig. 134 provvista però di tante paia di cave sulla periferia interna del cilindro rotorico quante sono le n fasi del sistema polifase.

Così se lo statore fosse provvisto di 4 cave poste ad uguale distanza angolare tra loro con alloggiate in esse due spire diametrali, si otterrebbe un *alternatore bifase* di cui le due spire deviate di 90° tra loro, costituirebbero la prima e la seconda fase.

Uno statore provvisto di sei cave angularmente equidistanti con alloggiate in esse tre spire, che perciò risultano deviate di 120° tra loro (prima, seconda e terza fase), costituisce, assieme al rotore, un *alternatore trifase* ecc.

Dalla rotazione dell'induttore a velocità angolare costante nascono nei singoli distinti avvolgimenti (spire) f.e.m. sinusoidali uguali in valore, isofrequenziali, sfasate di $\frac{1}{n}$ di periodo tra loro perchè le uguali spire vengono sottoposte ciclicamente alle stesse variazioni sinusoidali di flusso con un ritardo tra quella di una spira e la seguente pari a $\frac{1}{n} T$ se, come detto, n è il numero delle fasi.

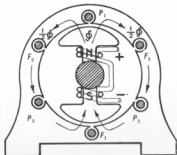


Fig. 171 - Schema di un alternatore trifase.

Sistemi trifasi.

L'alternatore trifase schematizzato in fig. 171, contiene nelle cave tre spire ⁽¹⁾ costituenti le tre fasi $P_1 F_1$, $P_2 F_2$, $P_3 F_3$ orientate in modo che i principi P_1, P_2, P_3 (e quindi anche le fini F_1, F_2, F_3) distino di 120° tra loro.

Come detto otterremo nelle tre fasi generatrici tre corrispondenti f.e.m. E_1, E_2, E_3 isofrequenziali, uguali in valore efficace, ciclicamente sfasate (nel senso dei ritardi) di un terzo di periodo tra loro cioè un « sistema trifase simmetrico ».

Possiamo così alimentare tre circuiti distinti (ved. fig. 172 a) che supponiamo costituiti dalle impedenze complessive (fase generatrice, linea,

⁽¹⁾ Per semplicità si è supposto che l'avvolgimento di ogni fase sia costituito da una sola spira entrante in P (principio della fase) ed uscente in F (fine della fase). Bastano perciò le indicate 3 paia di cave (cave distribuite ad uguale distanza angolare tra loro) per sistemarvi le 3 spire.

utilizzatore) Z_1, Z_2, Z_3 . Le correnti circolanti nei tre circuiti sono perciò:

$$I_1 = E : Z_1; \quad I_2 = E : Z_2; \quad I_3 = E : Z_3$$

Se invece consideriamo il valore delle uguali tensioni V esistenti ai morsetti dell'alternatore, dobbiamo intendere per Z l'impedenza linea più ricevitore ed in ultimo se sostituiamo nell'uguaglianza il valore della tensione applicata ai morsetti dell'utilizzatore, si intende per Z l'impedenza del solo utilizzatore.

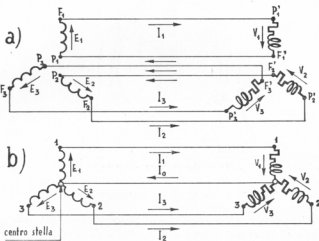


Fig. 172 - Sistema trifase: a) circuiti indipendenti, b) collegamento a stella.

Ogni corrente risulta sfasata, sulla rispettiva tensione, dall'angolo di fase $\varphi = \arccos \frac{R}{Z}$ dell'impedenza nella quale circola.

Le frecce a fianco delle fasi generatrici indicano i versi positivi delle f.e.m. e delle correnti: versi positivi se uscenti dall'alternatore (correnti di uscita), versi negativi se entranti nell'alternatore (correnti di ritorno).

Collegamento a stella.

Unendo tra loro i tre principi delle fasi generatrici e le tre fini delle fasi utilizzatrici si ha il *collegamento a stella* nel generatore e nel ricevitore (ved. fig. 172 b).

In tal caso i tre fili di ritorno vengono sostituiti, quando ciò si rende necessario, da un unico filo (collegante i due centri stella) chiamato *filo neutro*.

La tensione tra un filo di fase ed il filo neutro è, ovviamente, la tensione di una fase generatrice; la tensione disponibile tra due fasi (nel

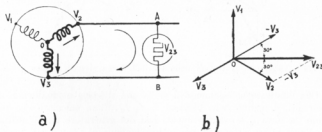


Fig. 173 - Tensioni stellate e tensioni concatenate.

sistema trifase simmetrico) è uguale a quella di fase moltiplicata per $\sqrt{3}$. Infatti nel circuito alimentato da due fasi le rispettive tensioni sono discordi, es. circuito $V_2 A B V_3$ di fig. 173 a) alimentato dalle fasi 2 e 3.

In conseguenza la tensione risultante (chiamata *tensione concatenata*) è data dalla differenza delle due f.e.m. delle fasi considerate, f.e.m. che sono sfasate di 120° .

La differenza vettoriale di dette f.e.m. $\vec{V}_2 - \vec{V}_3 = \vec{V}_{23}$ (1) sfasate di

(1) La successione degli indici ci dà il verso positivo del vettore che rappresenta la tensione concatenata.

Le tensioni concatenate $\vec{V}_{12}, \vec{V}_{23}, \vec{V}_{31}$, disponibili tra un filo ed il seguente nel senso dei ritardi, risultano in *anticipo* di 30° sul rispettivo vettore componente equiverso ed indicato dal primo indice (ved. fig. 174 a).

Le tensioni concatenate $\vec{V}_{13}, \vec{V}_{21}, \vec{V}_{32}$, disponibili tra un filo ed il precedente (nel senso degli anticipi) sono invece in *ritardo* di 30° sul vettore componente equiverso ed indicato dal primo indice (ved. fig. 174 b).

Queste tensioni concatenate sono anche rappresentate (rammentando la costruzione di fig. 132) dai lati del triangolo che ha per vertici gli estremi dei vettori, $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$. Supposto il sistema simmetrico, il triangolo risulta equilatero.

120° come appare dal diagramma di fig. 173 b), è uguale alla somma vettoriale di $\bar{V}_2 + (-\bar{V}_3)$ sfasate di 60°, somma che, nel caso i valori delle due f.e.m. siano uguali, viene a risultare pari al valore di una di esse moltiplicato per $\sqrt{3}$ (1).

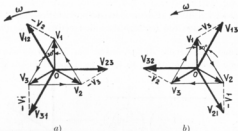


Fig. 174 - Diagrammi vettoriali delle tensioni in un sistema trifase a stella.

Con l'indicato collegamento a stella non si viene a modificare, nei tre circuiti, il regime delle correnti I_1, I_2, I_3 prima calcolate che percorrono la linea e le corrispondenti fasi del generatore e dell'utilizzatore: l'avere i tre sistemi un conduttore comune di ritorno non pregiudica la loro indipendenza.

Il filo comune che costituisce la via di ritorno alle tre correnti del sistema viene percorso da una corrente I_0 opposta alla somma vettoriale di $I_1 + I_2 + I_3$ (ved. fig. 176).

(1) Dall'analisi del triangolo isoscele (ved. fig. 175) si ottiene, tra i moduli delle tensioni concatenate V ed i moduli delle tensioni di fase V_f , la relazione:

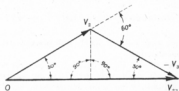


Fig. 175.

$$V_{23} = V_2 \cos 30^\circ + V_3 \cos 30^\circ \text{ dunque } V = 2 V_f \cos 30^\circ \text{ ed essendo } \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ si ha, in definitiva, } V = \sqrt{3} V_f.$$

Se le tre impedenze dell'utilizzatore sono vettorialmente uguali, risultano pure uguali in valore le tre correnti I_1, I_2, I_3 e pure uguali tra loro gli angoli $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$: le tre correnti di linea uguali in valore ed ugualmente sfasate sulle rispettive tensioni simmetriche che le determinano costituiscono una terna di vettori a 120° l'uno dall'altro, in conseguenza la loro somma vettoriale è zero (ved. fig. 177). Perciò in questo caso, cioè nel caso che le correnti di fase siano uguali ed ugualmente sfasate ossia costituiscano, come si dice, un *carico equilibrato*, non circola alcuna corrente nel filo neutro (da ciò il nome di filo neutro perchè, nel caso considerato, non ha alcuna funzione elettrica).

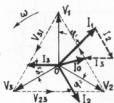


Fig. 176.

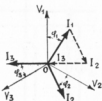


Fig. 177.

Diagrammi delle V e delle I in un sistema trifase a stella: fig. 176 simmetrico e squilibrato con filo neutro, fig. 177 simmetrico ed equilibrato.

Se in un sistema squilibrato nelle correnti si sopprime il filo neutro, noi veniamo a modificare le correnti in linea rispetto a quelle che prima si avevano con il filo neutro; conseguentemente variano anche le tensioni di fase.

Con la soppressione del filo neutro, ogni filo di fase farà da ritorno agli altri due come questi faranno da ritorno al terzo ma in linea si ha disponibile la sola tensione concatenata e non più la stellata.

Nelle lunghe « linee di trasmissione » (che trasportano l'energia dalle lontane centrali alle « stazioni di trasformazione » ubicate in prossimità dei centri di consumo) non abbisogna questa tensione stellata e perciò il filo neutro viene soppresso con grande economia di rame.

Se nella linea di trasmissione i carichi sono equilibrati si ha che i centri stella del generatore e del lontano ricevitore si trovano allo stesso potenziale. Infatti se esistesse il filo neutro congiungente i centri stella, non circolerebbe in esso alcuna corrente il che significa che a detto filo neutro non c'è applicata tensione cioè non esiste d.d.p. fra i due centri stella.

Le linee cittadine di *distribuzione*, cioè le linee a «bassa tensione» (un impianto funzionante a c.a. s'intende a bassa tensione quando la tensione del sistema è uguale o minore di 400 V efficaci) adibite al trasporto dell'energia dalle «cabine» agli utenti sono provviste di filo neutro (ved. fig. 178).

Questo collegamento presenta il vantaggio di rendere la corrente di ogni fase indipendente dalle altre e di usufruire di due valori della tensione. Questi due valori sono attualmente normalizzati a:

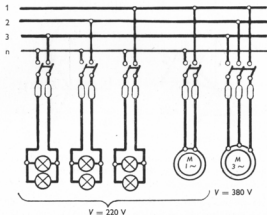


Fig. 178 - Utenze monofasi e trifasi derivate dalle normali linee di distribuzione trifase con neutro.

220 V per gli utenti luce, radio, riscaldamento e piccoli motori monofasi;

380 V per modesti utenti forza.

La sezione del filo neutro è generalmente metà della sezione di ciascun filo di fase (essendo molto ridotta la corrente I_0 rispetto a quella di fase, comunque grande sia lo squilibrio). Affinchè questa corrente I_0 tenda ad annullarsi, gli addetti agli allacciamenti distribuiscono ciclicamente le utenze luce monofasi sulle tre fasi delle reti di distribuzione.

Collegamento a triangolo.

Riportiamo in fig. 179 a) lo schema di un sistema trifase a circuiti indipendenti.

Se colleghiamo, nel generatore, la fine della fase 1 con il principio della 2, la fine della fase 2 con il principio della 3, la fine della fase 3 con il principio della 1, otterremo il *collegamento a triangolo* (ved. fig. 179 b).

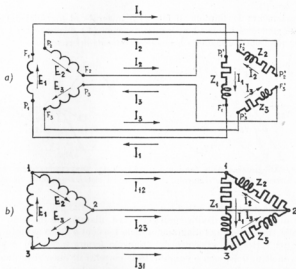


Fig. 179 - Sistema trifase: a) circuiti indipendenti, b) collegamento a triangolo.

Chiamiamo nodo 1 il nodo che unisce, nel generatore, la fine della fase 1 con il principio della 2 e chiamiamo con lo stesso numero 1 il filo di linea da detto nodo alimentato. Analogamente per gli altri nodi e fili.

Per il fatto di aver riunito in un solo filo quello di andata di una fase con il ritorno della successiva, si sovrappongono due distinte correnti di fase in ogni filo di linea mentre in ciascuna fase dell'utilizzatore, esso pure connesso a triangolo, circolerà invece solamente la corrente della corrispondente fase generatrice.

Per determinare le correnti di linea, basta applicare il primo principio di Kirchhoff ai tre nodi del generatore:

$$I_{12} = I_1 - I_2; \quad I_{23} = I_2 - I_3; \quad I_{31} = I_3 - I_1$$

ove I_1, I_2, I_3 sono le correnti di fase ed I_{12}, I_{23}, I_{31} , le risultanti correnti di linea.

Nelle uguali fasi generatrici connesse a triangolo nascono f.e.m. simmetriche la cui somma vettoriale agente nel chiuso circuito del triangolo è zero ⁽¹⁾.

Ovviamente le tensioni di fase (V_f) misurate ai morsetti delle singole fasi generatrici coincidono con le tensioni (V) misurate tra i fili di linea le quali costituiscono le *tensioni concatenate del sistema*.

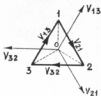


Fig. 180 - Diagramma delle tensioni in un sistema trifase a triangolo.

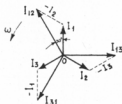


Fig. 181 - Diagramma delle correnti in un sistema trifase e triangolo.

Se, come supposto il sistema è simmetrico, il triangolo delle tensioni, riferito al generatore, risulta equilatero (ved. diagramma fig. 180).

Nella costruzione del diagramma delle tensioni è stato assunto come origine dei vettori il baricentro del triangolo (*centro ideale* del sistema).

Se, inoltre, il sistema è equilibrato le correnti di linea risultano $\sqrt{3}$ volte maggiori delle correnti di fase perchè il valore efficace delle correnti che si sovrappongono è uguale e le loro fasi differiscono di 120° tra loro ⁽²⁾, ved. diagramma fig. 181.

⁽¹⁾ Nell'ipotesi di f.e.m. dissimmetriche, la somma vettoriale di $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$ non è zero ma dà una risultante che agendo nell'avvolgimento indotto, chiuso a triangolo, costituito da impedenze di minimo valore, farebbe circolare in esso intense oziose correnti anche con una f.e.m. risultante di piccola entità.

Questa corrente dà luogo, nel funzionamento a vuoto dell'alternatore, ad una inutile produzione d'energia termica e sotto carico (sovrapponendosi vettorialmente alle correnti di linea) a pericolose sovraelevazioni di temperatura nelle fasi la cui risultante viene ad essere superiore a quella corrispondente al carico.

⁽²⁾ Come si è detto a proposito delle tensioni, la differenza vettoriale di

Nella costruzione del diagramma delle correnti è stato assunto come origine dei vettori il centro ideale del sistema.

Gli alternatori vengono sempre connessi a stella ⁽¹⁾ mentre i trasformatori, i motori trifasi, ecc., vengono connessi sia a stella che a triangolo.

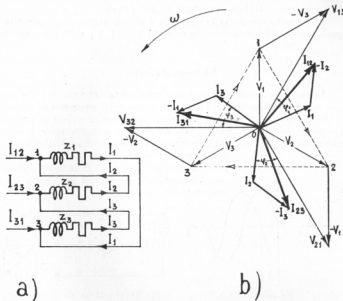


Fig. 182 - a) schema delle connessioni di un collegamento a triangolo, b) diagramma delle tensioni e delle correnti (sistema simmetrico ed equilibrato).

Questi apparecchi trifasi sono costituiti da impedenze vettorialmente uguali, di conseguenza danno luogo a carichi equilibrati dato che

due vettori uguali deviati l'uno dall'altro di 120° pari alla somma dei due vettori uguali ma deviati di 60° , ha per ampiezza la comune ampiezza moltiplicata per $\sqrt{3}$. Il vettore risultante ha uno sfasamento di 30° sul rispettivo vettore componente equiveroso.

⁽¹⁾ Consultare: BIASUTTI, *Atlante schemi impianti elettrici*, ed. Hoepli, pag. 64 (II ed.).

l'alimentazione è normalmente simmetrica: è dunque pure simmetrico il sistema di tensioni applicato ai morsetti di questi apparecchi.

In fig. 182 b) è stato tracciato il diagramma delle tensioni e delle correnti per un utilizzatore trifase supponendo il verso delle tensioni e delle correnti come indicato nell'utilizzatore trifase di fig. 179 b) il cui schema delle connessioni è stato riprodotto in fig. 182 a).

La corrente circolante in ogni fase è sfasata rispetto alle rispettive uguali tensioni di fase applicate ai morsetti 1 3, 3 2, 2 1, dell'uguale angolo

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

Sistemi bifasi.

Accenniamo ai sistemi bifasi non usati industrialmente ma che trovano ancora applicazioni nei laboratori ad uso degli strumenti di misura.

Se lo statore del nostro alternatore tipo fosse provvisto di quattro cave angolarmente equidistanti con sistemate in esse due spire deviate, dunque, di 90° tra loro, si genererebbero in esse, al rotare dell'induttore, due f.e.m. isofrequenziali, uguali in valore efficace, sfasate di un quarto di periodo, rappresentabili mediante due vettori tra loro in quadratura (ved. fig. 183).

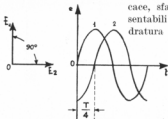


Fig. 183 - Rappresentazione vettoriale ed in coordinate cartesiane di un sistema bifase.

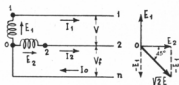


Fig. 184 - Schema dei circuiti e diagramma delle tensioni in un sistema bifase a tre fili.

Con tali due f.e.m. si possono alimentare due circuiti distinti mediante quattro fili, oppure, collegando i morsetti delle due spire generatrici come indicato in fig. 184, si può alimentare il sistema utilizzatore con soli tre fili (sistema bifase a tre fili): due di fase (prima e seconda fase) più il filo di ritorno comune (filo neutro).

Ovviamente nel sistema bifase a tre fili la tensione concatenata è $\sqrt{2}$ volte maggiore della tensione di fase perchè ipotenusata di un triangolo rettangolo isoscele di cateti E_1 ed E_2 e sfasata, nel caso della considerata connessione, di 45° in ritardo sulla E_2 (ved. diagramma fig. 184).

Se le impedenze che costituiscono l'utilizzatore sono vettorialmente uguali si ha che il valore della corrente che percorre il filo neutro è $\sqrt{2}$ volte maggiore della corrente di fase. Da considerare che il sistema bifase non è dissimmetrico come può apparire a prima vista. Infatti lo sfasamento di un quarto di periodo appartiene al sistema simmetrico composto da quattro f.e.m. tra loro in quadratura cioè al sistema *tetrafase* rappresentato da quattro vettori due a due in opposizione.

Però ognuno dei due circuiti componenti il sistema bifase si può concepire come costituito da due fasi opposte se lo stesso circuito viene considerato prima in un senso e poi nel senso opposto tale da risultare composto da quattro f.e.m. rappresentabili da 4 vettori a due a due in opposizione e così equivalere al considerato sistema *tetrafase* simmetrico.

Sistemi esafasi.

Nei sistemi esafasi simmetrici ed equilibrati tanto nel collegamento a stella (ved. fig. 185 a) quanto in quello esagonale (ved. fig. 185 b) non si hanno diversità tra i valori delle grandezze tensione e corrente di fase e di linea. In conseguenza non si ha il vantaggio di avere una doppia

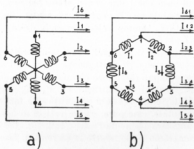


Fig. 185 - Sistema esafase: a) stella, b) esagonale.

tensione in linea, vantaggio che si ha invece nel sistema trifase collegato a stella col quale, per altro, limitando l'isolamento delle macchine a quello che richiede la tensione di fase, si dispone in linea una tensione $\sqrt{3}$ volte maggiore di quella di fase.

Nel sistema esafase a stella sfasata, la tensione in linea, di un sesto di periodo sulla equiversa delle due componenti di fase (in anticipo

od in ritardo secondo le stesse considerazioni esposte nel sistema trifase), inoltre:

a) se il sistema è squilibrato il filo neutro verrà percorso dalla corrente I_0 somma vettoriale delle correnti di linea;

b) se invece il sistema è equilibrato risulta nulla la somma vettoriale delle correnti di linea: il filo neutro non sarà percorso da corrente per cui questo può essere tolto senza alterare il sistema.

Nel collegamento ad esagono risultano sfasate, le correnti in linea, di un sesto di periodo sulla equiversa delle due corrispondenti componenti di fase.

§ SISTEMI TRIFASI SQUILIBRATI

In una distribuzione con alimentazione simmetrica se le tre fasi utilizzatrici non hanno la stessa (nel senso vettoriale) impedenza, si ha un carico squilibrato perchè le tre correnti di fase hanno valore diverso (sono uguali i valori delle tre tensioni di fase ma diversi i valori delle impedenze) e non sono ugualmente sfasate (sono diversamente sfasate dalle tensioni simmetriche che le determinano).

Supponiamo il caso che i due centri stella del generatore e dell'utilizzatore siano collegati da un filo neutro (ved. schema fig. 186 a) percorso, perciò, dalla corrente I_0 somma vettoriale delle diverse correnti di fase I_1, I_2, I_3 , ($I_1 + I_2 + I_3 = I_0$).

Malgrado lo squilibrio il filo neutro mantiene *praticamente* allo stesso potenziale i due centri stella, di conseguenza le tensioni applicate alle fasi utilizzatrici risultano uguali (ammesso che non si abbiano cadute in linea) alle corrispondenti tensioni simmetriche V_1, V_2, V_3 disponibili alle fasi generatrici, quindi dette tre tensioni applicate alle fasi utilizzatrici possono essere rappresentate, esse pure, da tre vettori di uguale ampiezza ad uguale distanza angolare l'uno dall'altro (ved. fig. 186 b).

Se noi interrompiamo il filo neutro le correnti di fase debbono necessariamente variare in modo da dare una risultante nulla in quanto non circola più la corrente I_0 che prima percorreva il filo neutro; ciò per il primo principio di Kirchhoff: « in ogni nodo (il centro stella) la somma vettoriale delle correnti è zero ».

Ma se variano le correnti di fase variano di conseguenza le cadute nelle rispettive fasi utilizzatrici e quindi le tensioni stellate ad esse applicate. Vengono dunque ad essere queste tensioni applicate, diverse da quelle delle corrispondenti fasi generatrici.

Per il fatto che la fine di ogni fase generatrice ed il principio della corrispondente fase utilizzatrice hanno lo stesso potenziale perchè colle-

gate, l'indicata diversità è possibile, perciò, solo se il potenziale del centro stella dell'utilizzatore è diverso da quello del centro stella del generatore (ved. fig. 186 c).

Determiniamo la differenza tra questi due potenziali ossia la tensione V_0 del centro stella dell'utilizzatore (*centro concreto*, O') rispetto al centro stella del generatore (*centro ideale*, O).

Quando viene a mancare il filo neutro viene a mancare in ogni fase utilizzatrice di impedenza ed ammettenza ordinatamente $Z_1 = \frac{1}{Y_1}$,

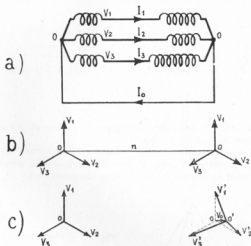


Fig. 186 - Diagrammi vettoriali delle tensioni in un sistema trifase simmetrico e squilibrato, con e senza neutro.

$Z_2 = \frac{1}{Y_2}$, $Z_3 = \frac{1}{Y_3}$, una aliquota della I_0 ; $I_1 - I'_1$ nella prima fase, $I_2 - I'_2$ nella seconda fase, $I_3 - I'_3$ nella terza fase dove I_1, I_2, I_3 sono le correnti che circolano nelle tre fasi utilizzatrici prima dell'interruzione del filo neutro ed I'_1, I'_2, I'_3 le correnti nelle stesse fasi dopo interrotto il filo neutro.

Conseguentemente vengono a mancare le cadute di tensione $Z_1 (I_1 - I'_1)$, $Z_2 (I_2 - I'_2)$, $Z_3 (I_3 - I'_3)$ relative ad ogni fase utilizzatrice e che, ovviamente, ritroviamo come tensione disponibile \bar{V}_0 .

Possiamo dunque impostare le equazioni:

$$Z_1(I_1 - I'_1) = \bar{V}_0, \quad Z_2(I_2 - I'_2) = \bar{V}_0, \quad Z_3(I_3 - I'_3) = \bar{V}_0$$

da cui:

$$I_1 - I'_1 = \frac{\bar{V}_0}{Z_1} = \bar{V}_0 \bar{Y}_1$$

$$I_2 - I'_2 = \frac{\bar{V}_0}{Z_2} = \bar{V}_0 \bar{Y}_2$$

$$I_3 - I'_3 = \frac{\bar{V}_0}{Z_3} = \bar{V}_0 \bar{Y}_3$$

che sommate membro a membro (come detto $I_1 + I_2 + I_3 = I_0$ e $I'_1 + I'_2 + I'_3 = 0$) si ottiene $I_0 = \bar{V}_0(\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3)$ cioè:

$$\bar{V}_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3}$$

Questa relazione determina il vettore \bar{V}_0 (*potenziale del centro concreto*) espresso in termini complessi.

Se noi rappresentiamo questa tensione con un vettore uscente dall'origine dei tre vettori $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$ (tensioni simmetriche disponibili alle fasi generatrici) otterremo le tre tensioni dissimmetriche $\bar{V}'_1, \bar{V}'_2, \bar{V}'_3$

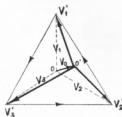


Fig. 187 - Dissimmetria causata da una stella squilibrata di impedenze.

applicate alle corrispondenti fasi utilizzatrici con il congiungere la fine del vettore \bar{V}_0 con la fine dei vettori $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$ (ved. fig. 187).

Risultano dunque le tensioni dissimmetriche, V'_1, V'_2, V'_3 applicate alle fasi utilizzatrici come differenza vettoriale tra la corrispondente tensione generatrice e la \bar{V}_0 .

$$\bar{V}'_1 = \bar{V}_1 - \bar{V}_0, \quad \bar{V}'_2 = \bar{V}_2 - \bar{V}_0, \quad \bar{V}'_3 = \bar{V}_3 - \bar{V}_0$$

Possiamo così determinare le correnti di fase (che sono anche correnti di linea):

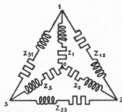
$$I'_1 = \bar{V}'_1 \bar{Y}_1, \quad I'_2 = \bar{V}'_2 \bar{Y}_2, \quad I'_3 = \bar{V}'_3 \bar{Y}_3$$

Per risolvere i vari problemi sui circuiti squilibrati, fa comodo, spesso, sostituire un ricevitore con collegamento a stella in un ricevitore con collegamento a triangolo equivalente ⁽¹⁾ e viceversa.

Trasformazione di una stella di impedenze in un triangolo equivalente.

Siano note le tre impedenze di un ricevitore collegato a stella. I valori delle tre impedenze dell'equivalente ricevitore con collegamento a triangolo, si ottengono dalle seguenti tre formule ove i simboli hanno il significato che risulta dalla fig. 188.

Fig. 188 - Trasformazione di una stella di impedenze nel triangolo equivalente e viceversa.



$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}, \quad Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1},$$

$$Z_{31} = Z_3 + Z_1 + \frac{Z_3 Z_1}{Z_2}$$

Trasformazione di un triangolo di impedenze in una stella equivalente.

Per tale trasformazione ci si serve delle seguenti tre formule ove i simboli hanno sempre lo stesso significato:

⁽¹⁾ Rammentiamo che un sistema si dice *equivalente* ad un altro quando, alimentato da identica tensione, assorbe dalla linea la stessa corrente e con lo stesso fattore di potenza.

$$Z_1 = \frac{Z_{31} Z_{12}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}, \quad Z_2 = \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}},$$

$$Z_3 = \frac{Z_{23} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

Nel caso di impedenze uguali tra loro: $Z_1 = Z_2 = Z_3$ e $Z_{12} = Z_{23} = Z_{31}$ si ha:

$$Z_{stella} = \frac{1}{3} Z_{triangolo} \quad (1)$$

$$\cos \varphi_{stella} = \cos \varphi_{triangolo}$$

Se noi vogliamo determinare le correnti di fase in un utilizzatore a stella ad impedenze disuguali alimentate da un sistema simmetrico, anzichè servirsi della determinazione del V_0 , possiamo avvalerci della trasformazione della stella nel triangolo equivalente.

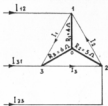


Fig. 189 - Stella di resistenze.

Infatti determinate le impedenze del triangolo di trasformazione si possono avere le correnti in valore e fase che circolano nelle dette fasi perchè noto il sistema delle tensioni applicato.

E note le correnti di fase del triangolo di trasformazione si possono facilmente determinare le correnti di linea come differenza vettoriale delle due correnti che circolano nelle fasi alimentate da ognuno dei fili considerati, correnti di linea che sono poi le stesse delle correnti che circolerebbero in ciascuna delle fasi della stella data.

Esempio. Supponiamo una stella costituita da sole resistenze come da valori in fig. 189, alimentata da un sistema simmetrico di tensioni (220 V concatenati).

(1) Se le tre impedenze sono vettorialmente uguali, oltre ad essere $Z_A = \frac{1}{3} Z_{\Delta}$ avremo anche:

$$R_A = \frac{1}{3} R_{\Delta} \quad X_A = \frac{1}{3} X_{\Delta}$$

ed in un circuito in cui la reattanza sia costituita o da sola induttanza o da sola capacità, avremo anche:

$$L_A = \frac{1}{3} L_{\Delta} \quad C_A = 3 C_{\Delta}$$

Resistenze dei lati del triangolo di trasformazione:

$$R_{12} = \frac{4 \cdot 5 + 5 \cdot 6 + 6 \cdot 4}{6} = \frac{74}{6} = 12,3 \, \Omega$$

$$R_{22} = \frac{74}{4} = 18,5 \, \Omega \quad R_{31} = \frac{74}{5} = 14,8 \, \Omega$$

Intensità delle correnti nei lati del triangolo:

$$I_1 = \frac{220}{14,8} = 14,8 \, \text{A}; \quad I_2 = \frac{220}{12,3} = 17,8 \, \text{A}; \quad I_3 = \frac{220}{18,5} = 11,8 \, \text{A}$$

Queste correnti sono in fase con le tensioni simmetriche che le determinano, risultano, perciò, esse pure sfasate di 120° tra loro.

Le correnti di linea (supposto il verso delle tensioni e delle correnti come in fig. 179 b) si ottengono differenziando vettorialmente le correnti di due lati contigui che convergono nel nodo alimentato dal filo di linea considerato:

$$I_{12} = I_1 - I_2 \quad I_{23} = I_2 - I_3 \\ I_{31} = I_3 - I_1$$

Si osserva che la differenza vettoriale di due grandezze sfasate di 120° tra loro equivale alla somma del vettore minuendo con il vettore sottraendo cambiato di segno (deviato perciò di 60° rispetto al minuendo).

Per semplificare le indicate operazioni vettoriali (nell'usare i numeri complessi) si assume l'asse di riferimento nella direzione del vettore minuendo (ved. fig. 190).

Risulta così il minuendo rappresentato dalla sola sua parte reale cioè dal valore del suo modulo ed il sottraendo dal numero complesso:

$$I_2 (\cos 60^\circ + j \sin 60^\circ) = I_2 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Perciò

$$I_{12} = 14,8 + 17,8 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 3,7 + j 15,4$$

$$I_{23} = 17,8 + 11,8 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 23,7 + j 10,2$$

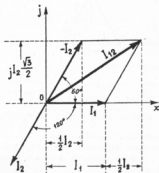


Fig. 190 - Differenza di due vettori espressi in termini complessi.

$$I_{31} = 11,8 + 14,8 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 19,2 + j 12,8$$

da cui si ottengono i moduli dei vettori:

$$I_{12} = \sqrt{23,7^2 + 15,4^2} = 28,3 \text{ A}; \quad I_{23} = \sqrt{23,7^2 + 10,2^2} = 25,8 \text{ A}$$

$$I_{31} = \sqrt{19,2^2 + 12,8^2} = 23 \text{ A}$$

Accenniamo ad un problema dei meno semplici relativi ai circuiti squilibrati.

Si abbia un triangolo di impedenze (per semplificare il problema supponiamo sia costituito da sole resistenze), valori come in fig. 191, collegato ad una linea trifase di resistenza $R' = 1,2 \Omega$ per filo.

La linea, al suo inizio, sia alimentata da un sistema simmetrico di tensioni $V = 220 \text{ V}$ concatenati.

Determinare le correnti di fase e di linea.

Per la risoluzione osserviamo che non conosciamo le tensioni applicate ai lati del triangolo perchè incognite le cadute di tensione nei fili di linea. Bisogna prima trasformare il triangolo nella stella equivalente di resistenza R_1, R_2, R_3 indi sommare a ciascuna la resistenza del filo di linea. Si ottiene così una stella di resistenza $R'_1 = R_1 + R', R'_2 = R_2 + R', R'_3 = R_3 + R'$ i cui raggi hanno una

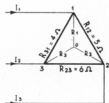


Fig. 191 - Triangolo di resistenze.

resistenza uguale a quella della corrispondente fase della stella di trasformazione aumentata della resistenza del filo di linea.

Questa stella di resistenze risulta alimentata da un sistema simmetrico di tensioni.

Valori della stella di trasformazione:

$$R_1 = \frac{4 \cdot 5}{4 + 5 + 6} = 1,3 \Omega; \quad R_2 = \frac{5 \cdot 6}{4 + 5 + 6} = 2 \Omega; \quad R_3 = \frac{6 \cdot 4}{4 + 5 + 6} = 1,6 \Omega$$

Valori totali:

$$R'_1 = 1,3 + 1,2 = 2,5 \Omega \quad R'_2 = 2 + 1,2 = 3,2 \Omega \quad R'_3 = 1,6 + 1,2 = 2,8 \Omega$$

È noto che in una stella costituita da resistenze disuguali alimentata da un sistema simmetrico di tensioni circolano correnti disuguali.

Queste correnti tra loro diverse daranno luogo a cadute di tensione dissimmetriche in linea.

Se al sistema di f.e.m. simmetriche sommiamo cadute dissimmetriche si hanno tensioni dissimmetriche ai morsetti dell'utilizzatore.

Al fine di ottenere il valore di queste tensioni dissimmetriche è d'uopo determinare il potenziale V_o del centro stella concreto della stella di resistenze $R'_1,$

R'_2, R'_3 . Note le rispettive tensioni applicate e perciò note le correnti circolanti in linea (come indicato nel paragrafo precedente) si moltiplicano queste per le rispettive resistenze di fase R_1, R_2, R_3 della stella di trasformazione. Dai rispettivi prodotti otteniamo le cadute nei singoli rami cioè le tensioni applicate alla stella di trasformazione.

Dopo di che si determinano le tensioni concatenate applicate ai morsetti dell'utilizzatore sottraendo vettorialmente da ogni tensione di fase della stella di trasformazione quella della fase che la segue nell'ordine dei ritardi.

Ottenute le tensioni concatenate si determinano le richieste correnti di fase dividendo quelle per le resistenze alle quali sono applicate.

POTENZA NEI SISTEMI TRIFASI

Misure di potenza in circuiti trifasi con neutro.

In un sistema trifase con neutro ogni fase si può considerare come un circuito a sè, alimentato dalla rispettiva tensione stellata V_f . L'espressione generale della potenza reale, P , è dunque somma delle potenze $P_f = V_f I \cos \varphi$ relative alle singole fasi:

$$P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 + V_2 I_2 \cos \varphi_2 + V_3 I_3 \cos \varphi_3$$

ove φ è l'angolo di sfasamento della corrente di linea rispetto alla corrispondente tensione stellata.

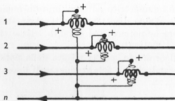


Fig. 192 - Misure della potenza reale in una linea trifase con filo neutro.

Per la misura della potenza reale occorrono dunque tre wattmetri connessi come in fig. 192.

Se in particolare il sistema è simmetrico ed equilibrato, la potenza dei tre circuiti monofasi che lo costituiscono sono uguali:

$$P = 3 P_f = 3 V_f I \cos \varphi$$

Per la sua misura basta un solo wattmetro dei tre inseriti in fig. 192 e triplicare il risultato.

Misure di potenza in circuiti trifasi senza neutro.

La potenza reale di un sistema simmetrico ed equilibrato riferita alle grandezze di linea diventa:

$$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi$$

qualunque sia il collegamento.

Infatti nel collegamento a stella abbiamo $V = \sqrt{3} V_f$ ed $I = I_f$, e nel collegamento a triangolo $V = V_f$ ed $I = \sqrt{3} I_f$.

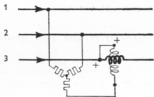


Fig. 193 - Misura della potenza reale in un sistema simmetrico ed equilibrato.

Da notare che φ , in quest'ultima espressione, rappresenta l'angolo di sfasamento tra tensione di fase e corrente di fase cioè tra grandezze di cui una non compare nell'espressione della potenza; di conseguenza non è possibile la misura della potenza con un solo wattmetro in un sistema a tre fili simmetrico ed equilibrato a meno di creare un *centro neutro artificiale* al fine di ottenere la tensione stellata ed il $\cos \varphi$ relativo e così ottenere la potenza del circuito trifase triplicando la potenza misurata dal wattmetro ⁽¹⁾.

Ricorreremo, per la misura della potenza in un sistema trifase a tre fili, basandoci sulle sole grandezze di linea, al *metodo Aron* o *metodo dei due*

⁽¹⁾ Come si nota dallo schema fig. 193, uno dei lati della stella di resistenze va connesso in serie con l'avvolgimento voltmetrico del wattmetro. (La resistenza di questa serie dev'essere uguale alla resistenza di una delle altre due uguali resistenze della stella).

Se invece si derivasse l'avvolgimento voltmetrico del wattmetro da un « centro stella artificiale » (centro stella costituito da tre resistenze ohmiche uguali derivate, cadauna, da un filo di linea e connesse tra loro, all'altro estremo, a stella), risulterebbe in parallelo sia l'avvolgimento voltmetrico sia il lato della stella connessi allo stesso filo di linea al quale è derivato l'avvolgimento: la resistenza di questo lato verrebbe diminuita, conseguentemente il centro stella artificiale non sarebbe più il baricentro del sistema e la misura ne verrebbe alterata.

scattometri, metodo che consente la massima esattezza comunque sia dissimmetrica l'alimentazione e squilibrato il carico.

Infatti considerando i valori istantanei della potenza, delle tensioni e delle correnti, abbiamo:

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 + v_3 i_3$$

Sappiamo che in una distribuzione a tre fili una qualsiasi delle tre correnti istantanee deve essere uguale e contraria alla somma algebrica delle altre due correnti nello stesso istante, quindi noi possiamo sostituire, ad es., ad i_1 l'espressione $-(i_2 + i_3)$. Facendo tale sostituzione nella formula della potenza istantanea, avremo:

$$p = -v_1 (i_2 + i_3) + v_2 i_2 + v_3 i_3$$

da cui raccogliendo:

$$p = i_2 (v_2 - v_1) + i_3 (v_3 - v_1)$$

Questa espressione, sviluppata (ved. pag. 156), ci dà la potenza media del sistema:

$$P = I_2 V_{21} \cos \widehat{I_2 V_{21}} + I_3 V_{31} \cos \widehat{I_3 V_{31}}$$

Perciò se noi inseriamo due wattmetri il primo dei quali con l'ampereometrica in serie sul filo 2 e la voltmetrica derivata fra detto filo ed il filo 1 ed il secondo wattmetro con l'ampereometrica in serie sul filo 3 e la voltmetrica in serie sul filo 1, otteniamo la potenza reale assorbita dal sistema sommando algebricamente le indicazioni dei due wattmetri (1).

Permutando gli indici si ottengono le possibili inserzioni Aron (ved. fig. 195): le amperometriche, in serie

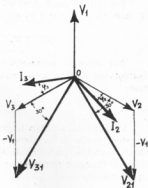


Fig. 194.

(1) Considerando il sistema simmetrico nelle tensioni, si ha che l'angolo $\widehat{V_{21} I_2}$ corrisponde a $30^\circ - \varphi_2$ perchè il vettore V_{21} segue di 30° il vettore V_2 mentre l'angolo $\widehat{V_{31} I_3}$ corrisponde a $30^\circ + \varphi_3$ perchè il vettore V_{31} precede di 30° il vettore V_3 (ved. fig. 194).

Di conseguenza l'indicata espressione della potenza reale diventa:

$$P = V I_2 \cos (30^\circ - \varphi_2) + V I_3 \cos (30^\circ + \varphi_3)$$

su due qualunque fili di linea e le voltmetriche in derivazione sullo stesso corrispondente filo di linea dell'amperometrica ed il filo che non porta avvolgimenti amperometrici ⁽¹⁾.

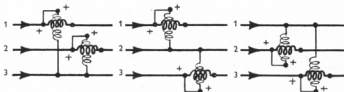


Fig. 195 - Inserzioni Aron.

Potenza reattiva.

Nei sistemi simmetrici ed equilibrati si ottiene la potenza reattiva Q , moltiplicando per 3 la potenza reattiva di una fase:

$$Q = 3 V_f I \text{ sen } \varphi = \sqrt{3} V I \text{ sen } \varphi$$

Nei sistemi dissimmetrici e squilibrati si considera come potenza reattiva del sistema la somma algebrica delle potenze reattive di ciascuna fase:

$$Q = V_1 I_1 \text{ sen } \varphi_1 + V_2 I_2 \text{ sen } \varphi_2 + V_3 I_3 \text{ sen } \varphi_3$$

Considerata positiva la potenza reattiva di un circuito induttivo e negativa quella di un circuito capacitivo si ha che la potenza reattiva totale potrebbe anche risultare nulla.

Dal triangolo rettangolo delle potenze (ved. fig. 160) risulta la potenza apparente P_a :

$$P_a = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

⁽¹⁾ Nei wattmetri uno dei morsetti della bobina amperometrica ed uno della voltmetrica sono contrassegnati da un segno (+).

Questo segno ci indica il morsetto di entrata dunque ci precisa il verso della corrente e della tensione nelle rispettive bobine. Se invertiamo una delle connessioni invertiamo il senso relativo della corrente o della tensione nella rispettiva bobina: il wattmetro ci darà indicazioni invertite.

Fattore di potenza.

Per fattore di potenza di un sistema trifase si considera, convenzionalmente, il coseno dell'angolo che ha per tangente il rapporto tra la somma algebrica delle potenze reattive e la somma aritmetica delle potenze attive:

$$\cos \varphi = \cos \arctg \frac{Q}{P}$$

È facile vedere che quando il sistema è simmetrico ed equilibrato, il fattore di potenza così definito è quello comune alle singole fasi.

Rifasamento degli impianti trifasi.

Si è detto che per rifasare un impianto si installano adatti condensatori in derivazione agli apparecchi utilizzatori, apparecchi che per la loro induttività assorbono una potenza reattiva $Q = P \operatorname{tg} \varphi$.

Nelle linee trifasi (linee alimentate da tensioni simmetriche e che si possono considerare equilibrate nei carichi) i condensatori vengono raggruppati sia a triangolo che a stella (ved. fig. 196).

Nel 1° caso la potenza reattiva fornita dal raggruppamento a triangolo è $3 \omega C_r V^2 = P \operatorname{tg} \varphi$ per il fatto che i condensatori sono tre alimentati, cadauno, dalla tensione concatenata V .

Nel 2° caso ciascun condensatore viene alimentato dalla tensione stellata $\frac{V}{\sqrt{3}}$, perciò la potenza reattiva

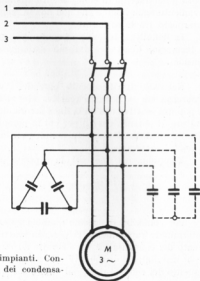


Fig. 196 - Rifasamento degli impianti. Connessioni a triangolo ed a stella dei condensatori rifasatori.

erogata dal raggruppamento a stella è $3 \omega C_s \left(\frac{V}{\sqrt{3}} \right)^2 = \omega C_s V^2$.

Nell'un caso e nell'altro si ottengono i valori della capacità di ognuno dei condensatori derivati, al fine di ottenere $\cos \varphi = 1$ in linea, a monte dei condensatori:

$$C_{\Delta} = \frac{1}{3} \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{\omega V^2}, \quad C_{\lambda} = \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{\omega V^2}$$

Appare conveniente il raggruppamento a triangolo. Si osserva però che la tensione applicata ad ogni condensatore, con detto collegamento, è $\sqrt{3}$ volte maggiore della tensione stellata, ciò implica, nelle alte tensioni, un maggior distacco delle armature. Ed allora, a pari dielettrico, lo stesso condensatore viene a risultare di capacità inferiore per l'aumentata distanza delle armature. Conclusione: il vantaggio del raggruppamento a triangolo, nelle alte tensioni, viene in parte neutralizzato dallo svantaggio ora accennato.

Invece, nelle basse tensioni, si realizzano distanze uguali delle armature nei due tipi di collegamento, distanze che sono le minime costruttivamente realizzabili e che non danno luogo a perforazioni del dielettrico interposto fra le armature.

In definitiva, tenendo presente che conviene sempre il collegamento a triangolo, questo risulta più vantaggioso nelle basse che nelle alte tensioni.

Nel caso di rifasamento parziale, i condensatori debbono dare la differenza tra la potenza reattiva che richiede l'utilizzatore ($P \operatorname{tg} \varphi_1$) e la potenza reattiva che dà la linea lavorando nelle condizioni da noi volute (fattore di potenza $\cos \varphi_2$) per cui la potenza reattiva erogata dalla linea viene a risultare $P \operatorname{tg} \varphi_2$. In definitiva i condensatori debbono dare una potenza reattiva pari alla differenza: $P \operatorname{tg} \varphi_1 - P \operatorname{tg} \varphi_2$.

Risultano, nei due casi, le capacità di ogni condensatore:

$$C_{\Delta} = \frac{1}{3} \frac{P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega V^2}, \quad C_{\lambda} = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega V^2}$$

Per comodità di calcolo diamo un nomogramma (ved. fig. 197) per determinare rapidamente la potenza reattiva (KVAR) che il raggruppamento dei condensatori deve fornire ad un impianto avente una potenza reale installata $P = 100$ kW allo scopo di elevare il fattore di potenza, a monte dei condensatori, dal valore $\cos \varphi_1$ al valore $\cos \varphi_2$.

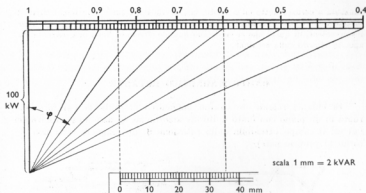


Fig. 197 - Nomogramma per un impianto della potenza di 100 kW da rifasare.

La misura della distanza che intercorre tra i due determinati valori del $\cos \varphi$ letta in scala 1 mm = 2 KVAR dà la potenza reattiva ricercata.

Esempio. Per migliorare, in linea, il fattore di potenza dal valore $\cos \varphi_1 = 0,6$ al valore $\cos \varphi_2 = 0,85$ è necessario disporre di un raggruppamento di condensatori della potenza reattiva di 71 KVAR per ogni 100 kW di potenza reale.

Perciò, per una potenza installata di 150 kW (ved. anche esercizio di pagina 161) necessitano $71 \times 1,5 = 106,5$ KVAR.

Capacità di ogni condensatore della batteria connessa a triangolo (tensione concatenata $V = 1200$ V).

$$C_t = \frac{1}{3} \frac{P (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)}{\omega V^2} = \frac{1}{3} \frac{106\ 800}{452\ 160\ 000} = 0,000078\ F = 78\ \mu F$$

Come noto, ogni condensatore rimane caricato dopo staccato dalla rete. Questa carica residua costituisce un pericolo per chi viene a contatto con le sue armature. Per scaricarle si ricorre ad un commutatore che mentre disinserisce la batteria dei condensatori dalla rete, collega le armature di questi a delle opportune resistenze ohmiche chiamate *resistenze di scarica*.

Nel caso della fig. 196 resta semplificata l'installazione perchè gli stessi avvolgimenti del motore servono da resistenze di scarica e perchè lo stesso interruttore di macchina e le stesse sue protezioni (valvole, nel caso nostro) servono pure per il raggruppamento dei condensatori.

Da notare che se la capacità della batteria dei condensatori viene calcolata per il massimo carico e per un rifasamento totale, si avrà, quando l'utilizzatore

funziona a carico ridotto od a vuoto, una sovracompensazione in linea: circolerà in essa una corrente sfasata in anticipo sulla tensione che darà luogo agli stessi inconvenienti di quelli che si verificano quando circola in linea una corrente sfasata in ritardo sulla tensione.

CAMPO MAGNETICO ROTANTE

Si chiama *rotante* un campo magnetico costante la cui direzione ruota in un piano con moto uniforme attorno ad un asse ad esso normale (ad es. il campo ottenibile dalla rotazione di un magnete rettilineo attorno al proprio asse).



Fig. 198 - Avvolgimento magnetizzante bifase.



Fig. 199 - Avvolgimento magnetizzante trifase.

Si ottiene un campo magnetico rotante alimentando con un sistema polifase di corrente di ordine n (sistema di n correnti uguali, sfasate di $\frac{1}{n}$ di periodo tra loro) un sistema di n spire fisse coassiali aventi i loro piani deviati, rispettivamente, di $\frac{1}{n}$ dell'angolo giro.

In conseguenza, se l'alimentazione è bifase sono tra loro normali i piani delle due spire coassiali (ved. fig. 198), se l'alimentazione è trifase si trovano a 120° i piani delle spire coassiali susseguentesi nell'ordine dei ritardi (ved. fig. 199), ecc.

Il fenomeno intuito e realizzato da Galileo Ferraris ⁽¹⁾ è applicato ai motori di più larga diffusione industriale chiamati appunto *motori a campo magnetico rotante*.

(¹) Galileo Ferraris (1847-1897) fu professore al Politecnico di Torino. L'Ing. Ferraris, nella sua primitiva disposizione per ottenere un campo rotante (1885) si servì di due spire disposte a 90° tra loro percorse rispettivamente da due correnti isofrequenziali, di uguale valore efficace, sfasate di $1/4$ di periodo tra loro. I due flussi alternativi così prodotti, componendosi vettorialmente danno luogo nello spazio sottoposto alla loro azione a due poli nord e sud di intensità costante e rotanti con velocità uniforme uguale alla pulsazione delle correnti eccitatrici (2π radianti cioè 1 giro ad ogni periodo).

Campo rotante trifase.

Si abbia un pacco statorico provvisto di sei cave equidistanti (ved. fig. 200) composto di lamierini tra loro isolati con vernici al fine di limitare le perdite nel ferro (perdite dovute all'isteresi ed alle correnti parassite).

Sistemiamo nelle cave tre spire $P_1 F_1$, $P_2 F_2$, $P_3 F_3$, in modo che i rispettivi principi, e quindi anche le fini, distino, nell'ordine, di 120° tra loro, indi colleghiamo le fini a centro stella.

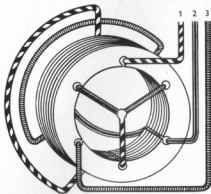


Fig. 200 - Schema dello statore di un motore trifase a campo rotante.

Alimentiamo le tre spire con un sistema trifase equilibrato di correnti cioè con tre correnti I_1 , I_2 , I_3 di uguale frequenza, di uguale valore efficace e sfasate di 120° tra loro.

In un diagramma cartesiano tracciamo le tre sinusoidi delle correnti I_1 , I_2 , I_3 (ved. fig. 201) indi dividiamo il periodo in sei parti uguali (ciascuna parte comprende dunque 60°) e consideriamo questi diversi successivi istanti del periodo nei quali una delle correnti si annulla.

Con riferimento a questi istanti indichiamo nella parte sottostante al diagramma il verso delle correnti nei lati attivi delle rispettive spire sistemate nelle cave.

Istante 0. Nella fase 3 la corrente ha senso positivo: sarà dunque entrante (\times) in P_3 ed uscente (\cdot) in F_3 . Nella fase 1 la corrente è nulla, nella fase 2 ha senso negativo cioè senso opposto alla corrente circolante nella fase 3; sarà perciò uscente (\cdot) in P_2 ed entrante ($+$) in F_2 .

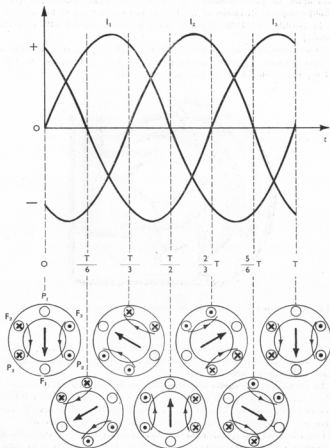


Fig. 201 - Generazione di un campo rotante trifase.

I flussi magnetici generati dalle correnti daranno origine a due polarità nord e sud indicate dalle frecce.

Istante $\frac{T}{6}$. Nella fase 1 la corrente ha senso positivo, è nulla in 3 mentre in 2 ha senso negativo. Il campo rotante generato dalle correnti risulta rotato di 60° rispetto all'istante O .

Istante $\frac{T}{3}$. Nella fase 1 la corrente ha senso positivo, è nulla in 2 mentre in 3 la corrente ha senso negativo. Il campo rotante risulta rotato da 60° rispetto all'istante $\frac{T}{6}$ e di 120° rispetto all'istante O .

Istante $\frac{T}{2}$. Nella fase 2 la corrente ha senso positivo, è nulla in 1 mentre in 3 ha senso negativo. È facile verificare che il campo rotante ha rotato di 180° rispetto all'istante O cioè di mezzo giro in un semiperiodo della corrente.

Proseguendo il ragionamento per gli istanti successivi si verifica che tale movimento di rotazione continua e che il campo rotante compie un giro completo ad ogni periodo.

Concludiamo che il numero dei giri del campo rotante (otteniamo questo campo rotante anche collegando l'avvolgimento a triangolo) è proporzionale alla frequenza f mentre è facile verificare che per invertire il senso di rotazione del campo basta scambiare tra loro due fasi qualsiasi.

Nel caso considerato in cui due polarità nord e sud, di valore costante, diametralmente opposte, rotano con velocità angolare costante $\omega = 2\pi f$, siamo in presenza di un campo bipolare.

Campo rotante multipolare.

Se aumentiamo convenientemente il numero delle spire nonché il collegamento delle stesse, aumentiamo il numero dei poli cioè otteniamo un campo rotante multipolare.

Ad es. un campo rotante tetrapolare lo possiamo ottenere da uno statore provvisto di 12 cave con sistemate in esse 6 spire opportunamente collegate due a due come risulta dallo schema fig. 202 a) dove è stata tracciata la fase 1, indicati i principi delle fasi 2 e 3 e segnato il senso delle correnti nei lati attivi delle spire nell'istante O .

Infatti in detto istante è nulla la corrente nella fase 1, negativa nella fase 2, positiva nella fase 3: i quattro lati attivi delle fasi 2 e 3 risultano rispettivamente percorsi da correnti opposte.

Si generano quattro flussi magnetici che danno luogo, lungo la periferia, a quattro poli alternativamente nord e sud situati ad angolo retto tra loro.

Istante $\frac{T}{6}$ (ved. diagramma fig. 201 e fig. 202 b). Corrente nulla nella fase 3, positiva nella fase 1 e negativa nella fase 2. I quattro poli magnetici risultano rotati di 30° .

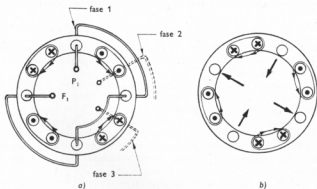


Fig. 202 - Schema di un avvolgimento trifase per ottenere un campo rotante tetrapolare.

Proseguendo nel ragionamento in tutti gli istanti successivi si verifica che il campo tetrapolare ruota di solo metà giro durante un intero periodo della corrente.

Qualunque sia il numero dei poli si ha sempre $P N_0 = 60 f$.

(N_0 = numero dei giri/minuto del campo rotante, P = numero delle paia poli).

Dunque un campo magnetico rotante è caratterizzato da:

- a) la direzione dell'intensità di campo varia la sua posizione nello spazio con velocità angolare costante;
- b) il verso di rotazione è quello dei ritardi cioè il verso cui si succedono, nell'ordine ciclico dei ritardi, le tensioni applicate.

Campi alternativi.

Lo statore su considerato sia provvisto di due cave diametrali, sistemiamo in esse una spira. Se alimentiamo questa spira con una corrente alternata sinusoidale veniamo a creare un *campo magnetico alternativo* avente direzione fissa nello spazio (l'asse della spira) ma di grandezza e senso variabili, nel tempo, secondo la legge sinusoidale.

È facile verificare che il valore vettoriale OH (ved. fig. 203) del campo alternativo nell'istante generico t , cioè $H_M \sin \omega t$ (ove H_M è l'ampiezza del campo ed ω la pulsazione) può pensarsi ottenuto dalla composizione di due vettori OM ed OM' (*componenti rotatorie*)

di modulo $\frac{H_M}{2}$ rotanti in senso opposto, l'uno in senso sinistrorso l'altro in senso destrorso, attorno all'origine (centro della spira) con un numero di giri pari alla frequenza.

È questo un ragionamento matematico cui, effettivamente, non corrisponde alcuna realtà fisica ma che interpreta il funzionamento, ad es., dei motori monofasi ad induzione. Nella rappresentazione grafica di fig. 203 sono stati contati i tempi a partire dall'istante in cui le due componenti rotatorie giacciono nel piano della spira ($t = 0$, $H = 0$).

Per il fatto che le velocità di rotazione dei vettori sono uguali e di senso contrario si ha che in ogni istante la bisettrice dell'angolo formato da questi coincide con OH . La risultante conserva perciò sempre questa direzione ed assume il suo valore massimo (H_M) dopo un quarto di giro (un quarto di periodo) quando, dunque, le due componenti rotatorie si sovrappongono.

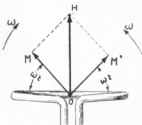


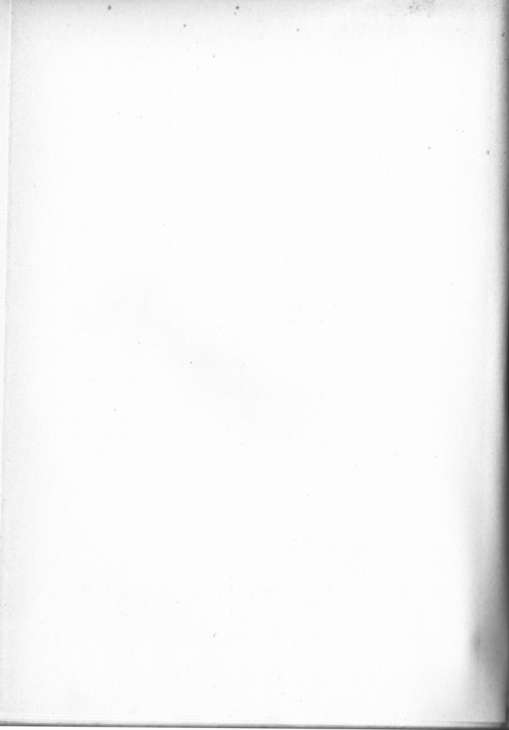
Fig. 203 - Componenti rotatorie (OM ed OM') del vettore alternativo OH .

Journal of the

The first part of the report is devoted to a general description of the country, its position, and its resources. It is then divided into several sections, each dealing with a different aspect of the country's development. The first section deals with the general situation of the country, and the second section deals with the state of the country's resources. The third section deals with the state of the country's population, and the fourth section deals with the state of the country's industry. The fifth section deals with the state of the country's agriculture, and the sixth section deals with the state of the country's commerce. The seventh section deals with the state of the country's education, and the eighth section deals with the state of the country's public administration. The ninth section deals with the state of the country's public health, and the tenth section deals with the state of the country's public safety. The eleventh section deals with the state of the country's public works, and the twelfth section deals with the state of the country's public finance. The thirteenth section deals with the state of the country's public debt, and the fourteenth section deals with the state of the country's public revenue. The fifteenth section deals with the state of the country's public expenditure, and the sixteenth section deals with the state of the country's public property. The seventeenth section deals with the state of the country's public services, and the eighteenth section deals with the state of the country's public institutions. The nineteenth section deals with the state of the country's public buildings, and the twentieth section deals with the state of the country's public works.

The second part of the report is devoted to a detailed description of the country's resources, its population, its industry, its agriculture, its commerce, its education, its public administration, its public health, its public safety, its public works, its public finance, its public debt, its public revenue, its public expenditure, its public property, its public services, its public institutions, its public buildings, and its public works. It is then divided into several sections, each dealing with a different aspect of the country's development. The first section deals with the general situation of the country, and the second section deals with the state of the country's resources. The third section deals with the state of the country's population, and the fourth section deals with the state of the country's industry. The fifth section deals with the state of the country's agriculture, and the sixth section deals with the state of the country's commerce. The seventh section deals with the state of the country's education, and the eighth section deals with the state of the country's public administration. The ninth section deals with the state of the country's public health, and the tenth section deals with the state of the country's public safety. The eleventh section deals with the state of the country's public works, and the twelfth section deals with the state of the country's public finance. The thirteenth section deals with the state of the country's public debt, and the fourteenth section deals with the state of the country's public revenue. The fifteenth section deals with the state of the country's public expenditure, and the sixteenth section deals with the state of the country's public property. The seventeenth section deals with the state of the country's public services, and the eighteenth section deals with the state of the country's public institutions. The nineteenth section deals with the state of the country's public buildings, and the twentieth section deals with the state of the country's public works.

Finito di stampare
il 16 Dicembre 1959
nella tipografia
U. Allegretti di Campi
in via Orti 2, Milano



- PASINI G., Impianti telefonici. Criteri di progettazione razionale nella telefonia moderna. 1959, in-8, di pag. XVI-1012, con 434 illustrazioni e 184 tabelle L. 5000
- PIERAZZUOLI M., Piccoli trasformatori. Calcolo e costruzione ad uso degli elettricisti. 3^a edizione aumentata. Ristampa 1959 in-16, di pag. VIII-152, con 44 figure e 22 tavole fuori testo L. 600
- QUERQUES A., Accumulatori elettrici acidi ed alcalini. Principi di funzionamento e di costruzione - Caratteristiche. 1951, in-16, di pag. VIII-152, con 42 figure e 2 tabelle L. 750
- Materiali elettrici:
- Vol. I: «Materiali isolanti». 1948, in-8, di pag. XII-224, con 20 figure nel testo L. 750
- Vol. II: «Materiali conduttori, materiali magnetici». 1948, in-8, di pag. XII-196, con 27 figure nel testo L. 750
- I pericoli dell'elettricità ed i mezzi di prevenzione e soccorso. Compendio ad uso di dirigenti, tecnici e studenti. 3^a ediz. 1949, in-16, di pag. VIII-65, con 12 figure L. 250
- Sistemi ed unità di misura sistema Giorgi. Compendio per tecnici e studenti. 2^a edizione aumentata ed aggiornata. 1951, in-8, di pag. 64 L. 400
- RAVALICO D. E., Il videolibro. Televisione pratica. 4^a edizione ampliata ed aggiornata, con nuova raccolta di schemi di televisori. 1958, in-8, di pag. XX-470, con 415 figure e 56 tavole fuori testo. Copertina a colori plastificata L. 3000
- Servizio videotelevisivo. Verifica, messa a punto e riparazione dei televisori. 3^a edizione riveduta e ampliata. 1959, in-8, di pag. XII-445, con 402 figure e 6 tavole. Copertina a colori plastificata L. 2500
- Strumenti per il videotelevisivo. 2^a edizione riveduta. 1957, in-8, di pag. XX-248, con 207 figure e 1 tavola fuori testo. Copertina a colori plastificata L. 1800
- Primo avviamento alla conoscenza della radio. Come è fatto, come funziona, come si adopera l'apparecchio radio, come si possono costruire piccoli apparecchi radio. 14^a edizione riveduta e aggiornata. 1958, in-16, di pag. XII-338, con 150 figure, 60 schemi di apparecchi radio di facile costruzione; copertina a colori plastificata L. 850
- Radio elementi. Corso preparatorio per radiotecnici e riparatori. 5^a edizione riveduta. 1958, di pag. XXXII-612, con 363 figure, 2 tavole fuori testo e 12 tabelle, copertina a colori plastificata L. 1500
- L'apparecchio radio a valvole e a transistor, per studenti, dilettanti, radiotecnici. 2^a edizione riveduta ed ampliata. 1959, in-8, di pag. XXXII-448, con 315 figure nel testo e 6 tavole fuori testo. Copertina a colori plastificata L. 2500
- Il radiolibro. 17^a edizione completamente rifatta ed adeguata ai recenti progressi della radiotecnica. 1960, in-8, di pagine XXIV-384, con 820 figure, di cui 103 tavole fuori testo e 490 zecconi di valvole. Copertina a colori plastificata L. 4500
- Servizio radiotecnico:
- Vol. I: «Strumenti per radiotecnici. Verifiche e misure per la messa a punto e riparazione degli apparecchi radio». 12^a edizione riveduta. 1959, in-16, di pag. XVI-424, con 279 figure di cui 125 schemi di strumenti di misura e di collaudo per il servizio radiotecnico, copertina a colori plastificata L. 1200
- Vol. II: «Radioriparazioni». Ricerca ed eliminazione dei guasti e difetti negli apparecchi radio a valvole e a transistor. 12^a edizione riveduta. 1959, in-16, di pag. XII-432, con 246 figure, 2 tavole fuori testo, 15 tabelle. Copertina a colori plastificata L. 1200
- Schemario degli apparecchi radio. (Prima raccolta di schemi prebellici). Comprende gli schemi di apparecchi di produzione commerciale costruiti in Italia nel periodo pre-

bellico. La raccolta comprende 620 schemi completi relativi a 837 modelli con numerose note di servizio, ad uso dei radiotecnici riparatori. 6^a ediz. 1957, in-16, di pag. XII-624, con 629 figure e indici, 34 tavole fuori testo L. 1600

RAVALICO D. E., Schemi di apparecchi radio.

Vol. I: Raccolta di schemi degli apparecchi radio di produzione commerciale, costruiti in Italia dal 1945 al 1950, con numerose note di servizio, ad uso dei radiotecnici riparatori. 3^a edizione riveduta. 1957, in-8, di pag. XVI-326, con 557 figure, delle quali 489 schemi di apparecchi radio completi di valori e 30 note di servizio. Copertina a colori plastificata L. 2500

Vol. II: Raccolta di schemi di apparecchi radio di produzione commerciale, costruiti e importati in Italia, nel periodo 1950-1955. 1957, in-8, di pag. VIII-376, con 460 figure, di cui 320 schemi di apparecchi radio e 30 note di servizio. Copertina a colori plastificata L. 2500

— L'audiolibro. Amplificatori - Altoparlanti - Microfoni - Dischi fonografici - Registratori magnetici - 4^a edizione ampliata e aggiornata. 1958, in-8, di pag. XXIV-496, con 382 figure di cui 5 tavole fuori testo e 124 schemi completi di amplificatori di tutte le potenze e per tutti gli usi, copertina a colori plastificata L. 2500

REBORA G., La costruzione delle macchine elettriche. 11^a edizione aggiornata e ampliata a cura degli ing. G. Solari e G. Pagliaro. 1959, in-8 gr., di pag. XVI-824, con 1308 figure, 107 tabelle e 8 appendici L. 3200

RICKMANN E. e H. HEYDA, Prontuario di elettrotecnica. Prima versione Italiana autorizzata a cura del dott. ing. Gino Beretta Tazzini. Di pag. XII-340, con 99 figure e numerose tabelle, 2 grandi tabelle fuori testo dei vari sistemi adottati per le unità di misura relative alle grandezze meccanoelettriche L. 650

ROSA E., Le resistenze nella tecnica elettronica. 1949, in-8, di pag. XII-125, con 64 figure nel testo, 12 nomogrammi e 44 tabelle L. 1000

SOLARI C., Macchine elettriche (Funzionamento e prove):

Vol. I: «Macchine a corrente continua». 4^a edizione riveduta. 1953, in-8, di pag. XVI-444, con 388 figure e 153 problemi L. 1250

Vol. II: «Macchine a corrente alternata». 4^a edizione riveduta ed aumentata. 1955, in-8, di pag. XVI-680, con 686 figure e 202 problemi L. 2500

STEFFANONI O., Installazioni elettriche nelle stalle, ad uso dei costruttori e progettisti. 2^a edizione riveduta ed aumentata. 1955, in-16, di pag. XII-144, con 32 illustrazioni, 7 grafici e tabelle L. 600

— Elettricità ed elettronica nell'industria. Manuale del direttore di fabbrica. 1955, in-16, di pagine XII-244, con 144 figure L. 1200

UGLIETTI G. A., Il prontuario del riparatore elettronico. 2^a edizione. 1957, in-16, di pag. XX-480, con 153 illustrazioni, numerosi schemi, le caratteristiche di oltre 3000 valvole e 29 tabelle L. 1800

— Il raddomante elettronico (Geofisica applicata). 1954, in-16, di pagine XII-292 con 143 illustrazioni, copertina a colori L. 1400

— Gli ultrasuoni. Teoria - Apparecchi e schemi - Applicazioni chimico-fisiche - Applicazioni biomedicali. 2^a edizione aggiornata. 1957, in-8, di pag. XVI-316, con 152 illustrazioni. Sopraccopertina a colori plastificata L. 2500

VANZI E., Prove e difetti delle macchine elettriche. Prove meccaniche. Prove elettriche. 1955, in-8, di pag. XVI-280, con 133 illustrazioni, sopraccopertina a colori L. 2000

VOLPI C., Vademecum per l'elettrotecnica pratica (con speciale riguardo all'illuminazione). 1953, in-16, di pag. XXIV-776, con 485 tabelle e 242 figure. Riliegato in tutta Lincoln L. 3000

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

Prezzo del presente volume L. 1600

