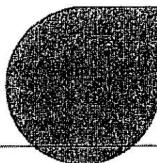


**G. Chitarin F. Gnesotto M. Guarnieri
A. Maschio A. Stella**

ELETTROTECHNICA

2 - APPLICAZIONI

Prefazione



ISBN 978-88-9385-084-1

Prima edizione: Settembre 2018

Responsabile produzione: Alessandro Parenti

Redazione: Carlotta Lenzi Laura Brugnoli e Laura Tondelli

Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dientro pagamento alla S.I.A.E del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E o con altre modalità indicate da S.I.A.E. Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico o commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del volume.

CLEARedi - Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali Corso di Porta Romana, n. 108 - 20122 Milano

e-mail: autorizzazioni@clearedi.org - sito: <http://www.clearedi.org>.

Il settore delle applicazioni elettriche ha conosciuto, soprattutto nell'ultimo ventennio, un rapido sviluppo, sia nel campo della produzione di energia con metodi alternativi (in particolare fotovoltaico ed eolico) che in quello degli azionamenti elettrici, con l'utilizzazione di nuove categorie di motori e più versatili sistemi di alimentazione e di controllo.

Questo secondo volume si rivolge agli studenti universitari che seguono insegnamenti di Elettrotecnica che comprendono anche argomenti applicativi. Esso è dedicato alle più rilevanti applicazioni dei principi dell'Elettrotecnica generale, esposti nel primo volume di questa raccolta, a cui si rimanda lo studente. Il testo espone i principi di funzionamento e le caratteristiche delle principali categorie di macchine elettriche (trasformatori, generatori sincroni, motori asincroni e motori alimentati in corrente continua), con particolare attenzione ai motori speciali utilizzati negli azionamenti e nelle macchine utensili. Vengono inoltre trattati i fondamenti dei componenti e dei sistemi di conversione statica dell'energia. Sono infine affrontate le problematiche degli impianti elettrici utilizzatori a tensioni inferiori a 1000 V, con ampia trattazione del dimensionamento delle linee e delle protezioni elettriche, dei sistemi di distribuzione e degli aspetti legati alla sicurezza, con relativo aggiornamento del quadro normativo.

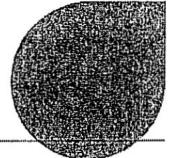
La trattazione è svolta in modo tale da fornire allo studente dei corsi di laurea "non elettrici" gli elementi necessari, nella futura professione, per rapide valutazioni sia in sede di progetto che di verifica. L'impostazione del testo non si discosta da quella ben consolidata nella tradizione padovana, con particolare riferimento alle lezioni di Luciano Merigliano; siamo d'altra parte convinti che la rapida evoluzione tecnologica nel settore delle applicazioni elettriche di potenza richiedesse un aggiornamento significativo di gran parte degli argomenti.

Gli autori



SOCIETÀ EDITRICE
ESCOLAPIO

40131 Bologna - Via U. Terracini 30 - Tel. 051-63.40.113 - Fax 051-63.41.136
www.editrice-esculapio.it



Gli autori ringraziano il Prof. Roberto Benato, del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, e l'Ing. Roberto Spezie, Responsabile dell'Area Operativa Trasmissione di Torino – Terna Rete Italia S.p.A., per il materiale fotografico utilizzato a corredo del presente volume.

■ 1 TRASFORMATORI

1.1 Introduzione	1
1.1.1 Valori nominali dei trasformatori	2
1.2 Trasformatore monofase	3
1.2.1 Generalità	3
1.2.1.1 Nucleo ferromagnetico	3
1.2.1.2 Avvolgimenti e Isolamento	4
1.2.1.3 Raffreddamento	6
1.2.2 Modelli per il trasformatore monofase	6
1.2.3 Trasformatore ideale	7
1.2.3.1 Proprietà del trasformatore ideale	7
1.2.4 Trasformatore reale	8
1.2.4.1 Riluttanza del nucleo non nulla	8
1.2.4.2 Perdite nel nucleo non nulle	10
1.2.4.3 Accoppiamento non perfetto tra gli avvolgimenti	12
1.2.4.4 Resistenze degli avvolgimenti non nulle	12
1.2.4.5 Circuito equivalente completo	13
1.2.5 Funzionamento a vuoto	14
1.2.5.1 Impedenza a vuoto a primario	15
1.2.5.2 Corrente a vuoto a primario	16
1.2.6 Funzionamento in cortocircuito	16
1.2.6.1 Circuito equivalente riportato a primario	16
1.2.6.2 Impedenze in cortocircuito	17
1.2.6.3 Tensioni di cortocircuito	18
1.2.6.4 Triangolo di cortocircuito	18
1.2.7 Misura dei parametri dei circuiti equivalenti	19
1.2.7.1 Prova a vuoto	20
1.2.7.2 Prova in cortocircuito	20
1.2.8 Funzionamento a carico	21
1.2.8.1 Circuiti equivalenti semplificati	21

1.2.8.2 Caduta di tensione a carico - diagramma di Kapp	23
1.2.8.3 Perdite e rendimento.....	24
1.2.9 Dati di targa	25
1.2.9.1 Simboli impiantistici del trasformatore monofase	25
1.2.10 Parallello di trasformatori monofasi	26
1.2.10.1 Condizioni di corretto funzionamento in parallelo	27
1.2.10.2 Vincoli sui parametri	27
1.3 Trasformatore trifase	29
1.3.1 Generalità	29
1.3.1.1 Nucleo ferromagnetico trifase.....	30
1.3.2 Collegamenti degli avvolgimenti	31
1.3.3 Circuito equivalente del trasformatore trifase.....	34
1.3.4 Dati di targa	35
1.3.4.1 Simboli impiantistici del trasformatore trifase	36
1.3.5 Parallello di trasformatori trifasi	36
1.4 Autotrasformatori	37
1.4.1 Generalità	37
1.4.2 Variac	38

2 CONVERTITORI STATICI

2.1 Generalità.....	39
2.1.1 Componenti dei convertitori.....	40
2.1.1.1 Diodo ideale	40
2.1.1.2 Diodo a semiconduttore.....	40
2.1.1.3 Transistor bipolare a giunzione - BJT	42
2.1.1.4 IGBT.....	44
2.1.1.5 Tiristore – SCR	45
2.1.1.6 Interruttori elettronici e fenomeni di commutazione dei componenti reali	46
2.2 Conversione ac/dc: raddrizzatori	47
2.2.1 Raddrizzatore monofase.....	47
2.2.1.1 Raddrizzatore ad una semionda	47
2.2.1.2 Raddrizzatore a due semionde	48
2.2.2 Raddrizzatore trifase	51
2.2.2.1 Raddrizzatori polifasi a gruppi di commutazione	51
2.2.2.2 Raddrizzatori polifasi a ponte di Greitz	52
2.2.3 Raddrizzatore controllato.....	54
2.2.4 Transistori di commutazione.....	55
2.2.5 Filtraggio	56

2.3 Conversione dc/ac: invertitori.....	56
2.3.1 Invertitore a ponte.....	56
2.3.1.1 Schema di principio.....	56
2.3.1.2 Circuito reale.....	57
2.3.2 Invertitore a mezzo ponte	58
2.3.3 Invertitore trifase.....	58
2.3.4 Modulazione di ampiezza.....	60
2.4 Chopper	61

3 INTRODUZIONE ALLE MACCHINE ELETTRICHE ROTANTI

3.1 Principi di funzionamento	63
3.1.1 Generalità	63
3.1.2 Campo magnetico rotante	64
3.1.2.1 Campo prodotto da un magnete rotante	64
3.1.2.2 Campo prodotto da un sistema di elettromagneti fissi	64
3.1.2.3 Campo prodotto con più coppie polari	68
3.2 Struttura delle macchine ELETTRICHE rotanti	68
3.2.1 Circuito magnetico, induttore ed indotto	68
3.2.1.1 Esempio di macchina con induttore rotante	69
3.2.2 Contatti strisciante.....	71
3.2.3 Aspetti funzionali.....	72
3.2.3.1 Potenze e perdite	72
3.2.3.2 Rendimento del generatore	73
3.2.3.3 Rendimento del motore	73
3.2.3.4 Raffreddamento	73

4 MACCHINE SINCRONE

4.1 Generalità.....	75
4.1.1 Rotore.....	77
4.1.2 Stator.....	78
4.1.3 Conduttori di induttore e di indotto	78
4.1.4 Valori nominali.....	78
4.2 F.e.m. della macchina sincrona trifase	79
4.2.1 Induzione al traferro dovuta all'induttore	79
4.2.1.1 Induzione al traferro nelle macchine a poli salienti	79
4.2.1.2 Induzione al traferro nelle macchine a rotore liscio	80
4.2.2 F.e.m. indotte	81
4.2.2.1 F.e.m. indotta negli avvolgimenti di stator	81

4.3 Funzionamento a vuoto	83
4.4 Funzionamento a carico	84
4.4.1 Correnti di indotto.....	84
4.4.2 Effetti delle correnti di indotto e reattanza sincrona	84
4.5 Comportamento elettrico.....	85
4.5.1 Modello equivalente elettrico	85
4.6 Comportamento elettromeccanico	86
4.6.1 Potenza elettrica erogata	86
4.6.2 Rendimento	87
4.7 Comportamento dinamico.....	87
4.7.1 Condizioni di funzionamento	87
4.7.1.1 Funzionamento a vuoto.....	88
4.7.1.2 Funzionamento da generatore.....	88
4.7.1.3 Funzionamento da motore	89
4.7.2 Equilibrio meccanico e stabilità	89
4.7.2.1 Variazioni dell'equilibrio meccanico	90
4.7.2.2 Variazioni dell'equilibrio elettrico	91
4.7.3 Regolazione dell'alternatore.....	92
4.7.4 Avviamento.....	92
4.8 Condensatore rotante	93

5 MACCHINE ASINCRONE

5.1 Generalità.....	95
5.1.1 Statore.....	95
5.1.2 Rotore.....	96
5.1.2.1 Rotore avvolto	96
5.1.2.2 Rotore a gabbia di scoiattolo.....	97
5.1.3 Valori nominali.....	98
5.2 Macchina asincrona trifase	98
5.2.1 Campo magnetico rotante	98
5.2.2 Rotore fermo: circuito equivalente a vuoto e in cortocircuito	99
5.2.3 Rotore in moto: scorrimento e circuito equivalente	100
5.2.4 Circuito equivalente semplificato.....	103
5.2.5 Bilancio delle potenze, potenza meccanica e coppia erogate da una macchina asincrona	104
5.2.5.1 Coppia elettromeccanica.....	105
5.2.5.2 Rendimento	105
5.2.6 Diagramma circolare di Ossanna	105
5.2.6.1 Tracciamento del diagramma circolare	105
5.2.6.2 Potenze a vuoto ed in cortocircuito	107

5.2.6.3 Potenze in condizioni generiche.....	108
5.2.6.4 Rendimento, scorrimento e coppia.....	109
5.2.7 Caratteristica meccanica	110
5.2.7.1 Equilibrio meccanico	110
5.2.7.2 Analisi della stabilità dell'equilibrio	111
5.2.8 Avviamento del motore asincrono.....	111
5.2.9 Regolazione della velocità.....	114
5.2.9.1 Variazione della frequenza.....	114
5.2.9.2 Inversione del senso di rotazione	114
5.2.10 Generatore asincrono	114
5.3 Motore asincrono con alimentazione monofase.....	115
5.3.1 Campo al traferro e caratteristica meccanica	115
5.3.2 Avviamento del motore monofase	117
5.3.2.1 Motore a condensatore.....	117
5.3.2.2 Motore a poli schermati	117

6 AZIONAMENTI ELETTRICI

6.1 Generalità.....	119
6.1.1 Caratteristiche di un azionamento	119
6.1.1.1 Caratteristica meccanica stazionaria dei carichi e dei motori.....	120
6.1.1.2 Stabilità del punto di funzionamento	122
6.1.1.3 Stabilità dinamica	122
6.2 Azionamenti con motori convenzionali	123
6.2.1 Motore asincrono	124
6.2.2 Motore sincrono	124
6.2.2.1 Motore sincrono a rotore avvolto	125
6.2.2.2 Motore sincrono a magneti permanenti (brushless)	125
6.2.2.3 Controllo della frequenza nel motore sincrono	126
6.3 Azionamenti con motori speciali.....	127
6.3.1 Motore sincrono a riluttanza variabile (synchronous reluctance motor).....	127
6.3.2 Motore a passo (stepping motor)	128
6.3.2.1 Alimentazione	129
6.3.2.3 Motore switched reluctance	131

7 LINEE ELETTRICHE

7.1 Generalità.....	133
7.2 Tipologie	133

7.2.1 Linee aeree sospese	134
7.2.2 Linee in cavo	136
7.3 Schemi equivalenti	137
7.3.1 Schema equivalente di una linea bifilare.....	137
7.3.1.1 Parametri dello schema.....	138
7.3.2 Schemi equivalenti di linee in DC.....	138
7.3.3 Schemi equivalenti di linee in AC.....	139
7.3.3.1 Linea bifilare in AC (monofase).....	139
7.3.3.2 Linea trifase simmetrica ed equilibrata.....	140
7.4 Topologia delle linee elettriche di potenza.....	141
7.5 Caduta di tensione in linea	142
7.5.1 Sezione di linee elettriche e caduta di tensione.....	142
7.5.1.1 Linea DC a sbalzo con più carichi	142
7.5.1.2 Linea AC monofase a sbalzo con un solo carico	144
7.5.2 Linee elettriche trifasi	145
7.5.3 Cadute di tensione attive e reattive	146
7.6 Comportamento termico delle linee elettriche.....	146
7.7 Dimensionamento delle linee elettriche.....	146
7.7.1 Dimensionamento elettrico.....	146
7.7.2 Dimensionamento termico.....	147
7.7.3 Dimensionamento complessivo.....	148
7.8 Altri elementi per la scelta delle linee elettriche	148
7.8.1 Effetto pelle.....	148
7.8.2 Corrente capacitiva	148
7.8.3 Livello di isolamento.....	149
7.8.4 Scelta del sistema di trasmissione.....	149

8 SISTEMI ELETTRICI DI POTENZA

8.1 Generalità.....	151
8.1.1 Caratteristiche dell'energia elettrica	151
8.1.2 Sistemi elettrici in alternata.....	154
8.1.3 Livelli di tensione nei sistemi elettrici	154
8.2 Sistemi di generazione	156
8.2.1 Tipi di centrali elettriche di generazione	158
8.2.1.1 Centrali idroelettriche.....	158
8.2.1.2 Centrali termoelettriche a combustibile fossile	159
8.2.1.3 Centrali elettronucleari	160
8.2.1.4 Centrali geotermiche	161
8.2.1.5 Centrali mareomotrici.....	161
8.2.1.6 Sistemi di generazione ad energia eolica	161

8.2.1.7 Sistemi di generazione ad energia solare	162
8.2.1.8 Altre forme di generazione	163
8.3 Linee elettriche di potenza.....	163
8.3.1 Linee elettriche di trasporto o interconnessione.....	163
8.3.2 Linee elettriche di distribuzione.....	164
8.4 Stazioni e cabine di trasformazione.....	165
8.5 Sistemi elettrici in corrente continua	167
8.5.1 Collegamenti HVDC	167
8.5.2 Trazione elettrica.....	168

9 COMPONENTI DEI SISTEMI ELETTRICI

9.1 Generalità.....	169
9.1.1 Sovratensioni.....	169
9.1.2 Sovraccorrenti	170
9.2 Apertura e chiusura dei circuiti elettrici	171
9.2.1 Apertura di un circuito elettrico	171
9.2.1.1 Arco elettrico	172
9.2.1.2 Interruzione della corrente alternata	172
9.2.1.3 Interruzione della corrente continua	173
9.2.2 Chiusura di un circuito elettrico	173
9.3 Interruttori elettrici di potenza	173
9.3.1 Generalità sugli interruttori di potenza	173
9.3.1.1 Parametri degli interruttori	174
9.3.1.2 Tecniche di interruzione	174
9.3.2 Tipologie di interruttori di potenza	175
9.3.2.1 Interruttori in esafluoruro di zolfo (SF ₆)	175
9.3.2.2 Interruttori in vuoto	175
9.4 Sezionatori	176
9.4.1 Sezionatori	176
9.4.1.1 Tipologie di sezionatori	177
9.4.1.2 Sezionatori di linea	177
9.4.1.3 Sezionatori di terra	178
9.5 Relè e dispositivi automatici	178
9.5.1 Relè	178
9.5.1.1 Relè elettromagnetico	179
9.5.1.2 Relè differenziale	179
9.5.1.3 Relè termico	180
9.5.2 Interruttori automatici	181
9.5.2.1 Interruttore con relè elettromagnetico	181
9.5.2.2 Interruttore differenziale (salvavita)	182

TRASFORMATORI

1.1 INTRODUZIONE

Il trasformatore è una macchina elettrica statica, cioè priva di organi in movimento, il cui funzionamento è fondato sul principio dell'induzione elettromagnetica (Legge di Faraday-Neumann, § 10.1.4, Vol. 1); esso può quindi funzionare solo in regime variabile e trova impiego fondamentale in regime sinusoidale. Esistono trasformatori monofasi e trifasi; riferendosi per semplicità al caso monofase, si può dire che esso è un doppio bipolo (§ 3.5, Vol. 1) in grado di assorbire potenza ad una porta (primario) e di renderla pressoché integralmente all'altra (secondario), modificando i livelli delle tensioni e delle correnti.

Il trasformatore trova largo impiego in applicazioni sia elettriche che elettroniche. Tra gli utilizzi più significativi si possono citare i seguenti.

- Per trasportare in modo economico la potenza elettrica è necessario ricorrere a linee di trasmissione funzionanti a tensioni molto maggiori sia di quelle convenienti per i generatori sia di quelle idonee alla distribuzione ai carichi utilizzatori. L'interconnessione e lo scambio di potenza tra le parti del sistema elettrico operanti a livelli di tensione diversi è resa possibile da trasformatori capaci di elevare o ridurre le ampiezze delle tensioni senza significative perdite di potenza. Per tali applicazioni si utilizzano trasformatori trifasi di grande potenza.
- Il livello di tensione al quale gli enti erogatori forniscono l'energia elettrica agli utenti è spesso diverso da quello richiesto dai dispositivi contenuti nelle apparecchiature elettriche; anche in questo caso si ottiene la tensione opportuna per mezzo di trasformatori.
- In talune applicazioni in cui occorre ottenere il massimo trasferimento di potenza da un generatore ad un determinato carico, si può impiegare un trasformatore che realizza l'adattamento di impedenza, § 1.2.3.1.
- Per trasferire potenza tra due parti di una rete elettrica, mantenendole elettricamente isolate, si interpone un trasformatore, detto *trasformatore di isolamento*, che è un componente *essenziale per garantire la sicurezza* di dispositivi e impianti utilizzatori collegati a reti in bassa tensione.

1.1.1 Valori nominali dei trasformatori

V_{1n}	tensione nominale primaria [V]
V_{2n}	tensione nominale secondaria [V]
I_{1n}	corrente nominale primaria [A]
I_{2n}	corrente nominale secondaria [A]
P_n	potenza nominale [VA]
f_n	frequenza nominale [Hz]
n	rappporto di trasformazione

Tabella 1.1.1.1

Un trasformatore è caratterizzato da un insieme di grandezze fisiche, chiamate *valori nominali*, elencate in Tabella 1.1.1.1.

I valori nominali sono i valori efficaci della tensione e della corrente previsti per il normale funzionamento della macchina; nel caso di macchine trifasi si fa riferimento alle tensioni concatenate e alle correnti di linea. Questi valori definiscono i limiti operativi della macchina e possono essere superati solo marginalmente (di poco e/o per un periodo di tempo limitato); infatti se si eccedono le tensioni nominali si possono causare saturazione magnetica e cedimento degli isolamenti; se si eccedono le correnti nominali si possono causare eccessivo riscaldamento degli avvolgimenti o anche cedimento meccanico dovuto agli sforzi elettrodinamici. Tra valori nominali di tensione e corrente sussistono, per definizione, le relazioni:

$$\frac{V_{1n}}{V_{2n}} = n, \quad \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{1}{n}. \quad (1.1.1.1)$$

La potenza nominale ha significato di potenza apparente ed è pertanto misurata in VA; essa è legata alle tensioni e correnti nominali dalle relazioni:

$$\begin{aligned} P_n &= V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n} \\ P_n &= \sqrt{3} V_{1n} I_{1n} = \sqrt{3} V_{2n} I_{2n} \end{aligned} \quad (1.1.1.2)$$

valide rispettivamente per trasformatori monofasi e trifasi.

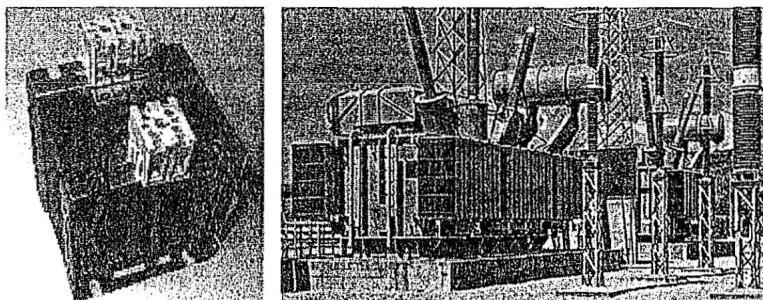


Figura 1.1.1.1 Trasformatore monofase di piccola potenza (500 VA) e trasformatore trifase di grande potenza (300 MVA).

Nel seguito vengono trattati principalmente i trasformatori che hanno frequenza nominale uguale a quella industriale (50 o 60 Hz) e sono largamente utilizzati nelle apparecchiature elettriche e negli impianti industriali e civili: essi, spesso detti *trasformatori di potenza*, presentano potenze nominali che possono variare in un campo molto vasto, da pochi VA a varie centinaia di MVA (Fig. 1.1.1.1). In alcune applicazioni si usano tuttavia trasformatori di potenza funzionanti a frequenze più alte (decine o centinaia di kHz).

1.2 TRASFORMATORE MONOFASE

1.2.1 Generalità

Un trasformatore monofase è essenzialmente costituito da due induttori detti *avvolgimenti primario e secondario*, magneticamente ben accoppiati tra loro, utilizzando un circuito magnetico ad elevata permeabilità, detto nucleo ferromagnetico. Il nucleo magnetico è sempre presente nei trasformatori di potenza, anche se esistono trasformatori (*alimentatore wireless* ad alta frequenza per dispositivi mobili o veicoli), nei quali l'accoppiamento tra primario e secondario avviene in parte in aria, così da evitare qualunque tipo di connessione solida o in cavo tra l'alimentatore e il dispositivo da ricaricare.

1.2.1.1 Nucleo ferromagnetico

I nuclei ferromagnetici sono costituiti da lamierini di acciaio al silicio (§ 14.12.1, Vol. 1) a bassa cifra di perdita, di spessore generalmente compreso tra 0,3 e 0,5 mm, ricoperti di vernice isolante o passivati, che vengono tagliati e impaccati per ottenere le sezioni utili desiderate nei diversi tratti di circuito magnetico. Nei trasformatori funzionanti ad alta frequenza si usano nuclei ceramici di ferrite sintetizzata. Le forme più usate sono:

- nucleo a colonne, (Fig. 1.2.1.1a), dove sia l'avvolgimento primario che il secondario sono suddivisi in due semiavvoltigimenti, avvolti sulle due colonne;
- nucleo a mantello o corazzato, (Fig. 1.2.1.1b).

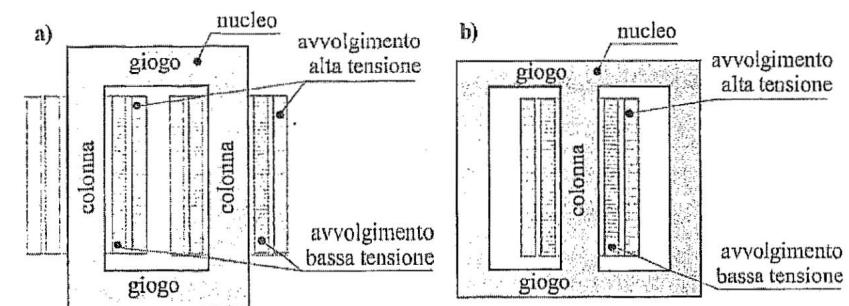


Figura 1.2.1.1 Forme tipiche dei nuclei ferromagnetici dei trasformatori.

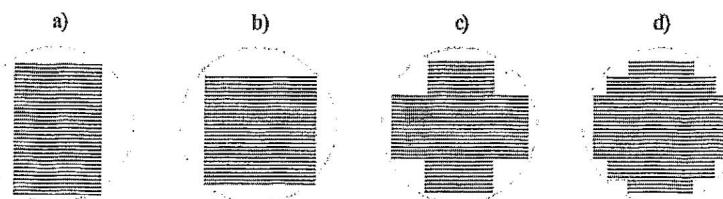


Figura 1.2.1.2 Sezioni di colonne di circuito magnetico.

I tratti di circuito magnetico lungo i quali sono alloggiati gli avvolgimenti sono detti colonne; i tratti di raccordo sono detti gioghi.

Le colonne hanno sezione rettangolare, quadrata o a gradini nel caso di macchine di grandi dimensioni (Fig. 1.2.1.2). Quest'ultima soluzione consente una migliore utilizzazione dello spazio disponibile entro gli avvolgimenti e un migliore ancoraggio di questi, per sopportarne le forze elettrodinamiche. La sezione dei gioghi è generalmente rettangolare oppure uguale a quella delle colonne. I lamierini sono pressati mediante bulloni, isolati per non causare contatti elettrici tra i diversi lamierini.

Per ragioni costruttive i nuclei laminati presentano quasi sempre un certo numero di giunti che, costituendo dei traferri, devono essere di minimo spessore per minimizzare la riluttanza del circuito magnetico. Tali giunti possono essere di tipo affacciato (Fig. 1.2.1.3a) oppure di tipo intercalato (Fig. 1.2.1.3b o Fig. 1.2.1.3c). Il tipo a) risulta costruttivamente più semplice degli altri, ma i tipi b) e c) presentano traferri di minore spessore equivalente e quindi danno luogo a valori inferiori di riluttanza e quindi a migliore accoppiamento.

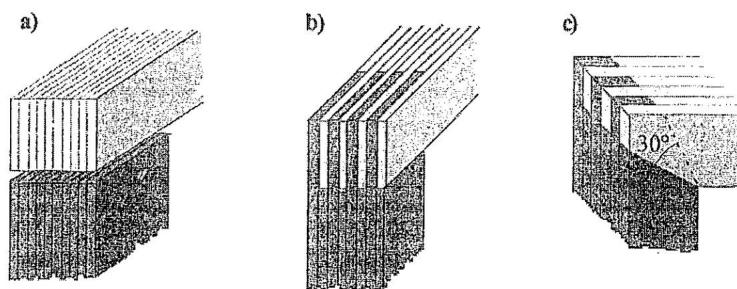


Figura 1.2.1.3

1.2.1.2 Avvolgimenti e Isolamento

Gli avvolgimenti sono costituiti da conduttori di rame o di alluminio, isolati esternamente mediante smalto sintetico, oppure mediante fogli di polietilene o nastri di tessuto di vetro, impregnati con resina epoxidica; i conduttori sono avvolti per realizzare bobine formate da più spire; a sua volta, ogni bobina può essere

impregnata in resina. Le bobine primarie e secondarie sono montate coassialmente alle colonne del nucleo ferromagnetico, come indica la Figura 1.2.1.1. Le disposizioni più comuni delle bobine sono:

- disposizione concentrica, nella quale le bobine costituenti l'avvolgimento primario e secondario hanno diametri diversi (Fig. 1.2.1.1 e Fig. 1.2.1.4a). Questa disposizione è preferita nei trasformatori per tensioni elevate, dato che permette un migliore isolamento dell'avvolgimento di alta tensione (AT), che viene posto esternamente rispetto a quello di bassa tensione (BT).
- disposizione alternata, nella quale le bobine costituenti il primario e quelle costituenti il secondario hanno uguale diametro e sono montate intercalate l'una all'altra (Fig. 1.2.1.4b). Questa disposizione consente una costruzione modulare delle bobine che costituiscono gli avvolgimenti e migliora notevolmente l'accoppiamento magnetico.

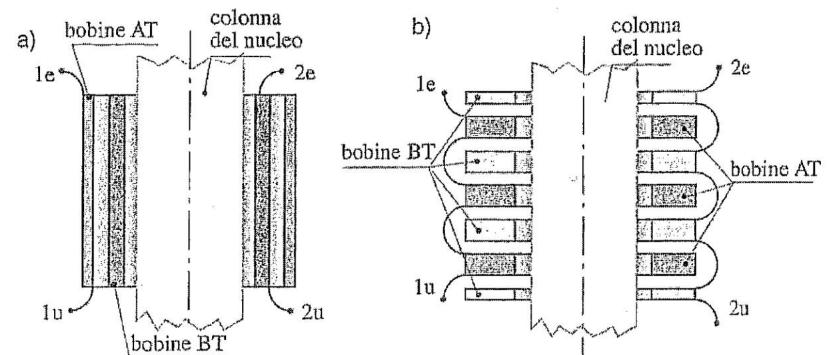


Figura 1.2.1.4 Schema di avvolgimenti concentrici e di avvolgimenti alternati.

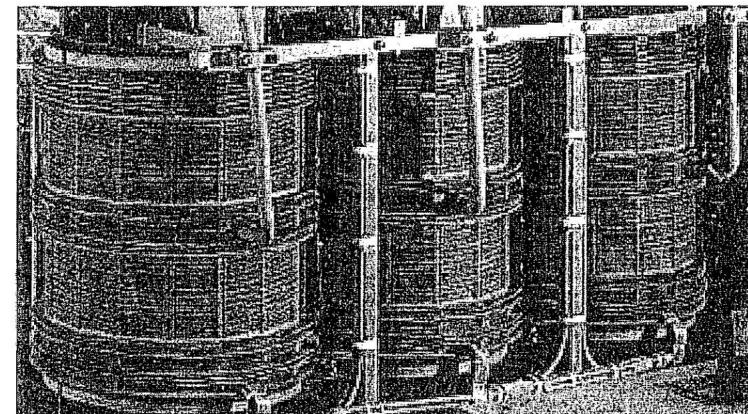


Figura 1.2.1.5 Avvolgimenti di un grande trasformatore trifase isolato in olio.

Le bobine devono essere isolate tra loro e rispetto ad ogni altra parte del trasformatore in funzione delle tensioni che vi si possono presentare in condizioni di normale funzionamento ed anche in condizione di guasto. Tale isolamento può essere realizzato mediante materiale isolante impregnato in resina epossidica ("isolamento in aria") o anche mediante olio minerale, inserendo il nucleo e gli avvolgimenti in un contenitore metallico (cassone) pieno d'olio ("isolamento in olio").

Per installazioni all'interno di edifici, si usano solo trasformatori con isolamento solido in resina, che non contengono olio minerale e pertanto comportano ridotti rischi d'incendio. Di norma si impiegano resine epossidiche, caricate con quarzo, grazie alle loro ottime proprietà dielettriche, termiche e meccaniche. Un notevole vantaggio dei trasformatori con isolamento solido è la ridotta necessità di manutenzione.

1.2.1.3 Raffreddamento

Il trasformatore dissipava potenza sia nel nucleo ferromagnetico, a causa dell'isteresi e delle correnti parassite, che negli avvolgimenti, per effetto Joule; per evitare che gli isolamenti vengano danneggiati dall'eccessiva temperatura, il calore prodotto deve essere smaltito; a tal fine tra gli avvolgimenti (e per grossi trasformatori anche entro il nucleo) sono presenti opportuni canali per il passaggio di un fluido refrigerante.

I trasformatori di piccola e media potenza hanno in genere isolamento solido impregnato in resina e sono refrigerati ad aria in ventilazione naturale o forzata. I trasformatori di grande potenza sono di solito isolati in olio (che presenta al tempo stesso ottime proprietà termiche e dielettriche) e il calore viene smaltito all'esterno attraverso le pareti del cassone, grazie ad alette, tubi o scambiatori di calore esterni, a loro volta raffreddati a convezione forzata, ad aria o ad acqua.

1.2.2 Modelli per il trasformatore monofase

Si consideri un trasformatore avente N_1 spire al primario e N_2 spire al secondario, avvolte attorno al nucleo ferromagnetico, come schematizza la Figura 1.2.2.1. Alimentando il primario con la tensione sinusoidale $v_1(t)$ e lasciando il secondario aperto o chiuso sul carico, si ottengono rispettivamente le condizioni di funzionamento a vuoto e di funzionamento a carico.

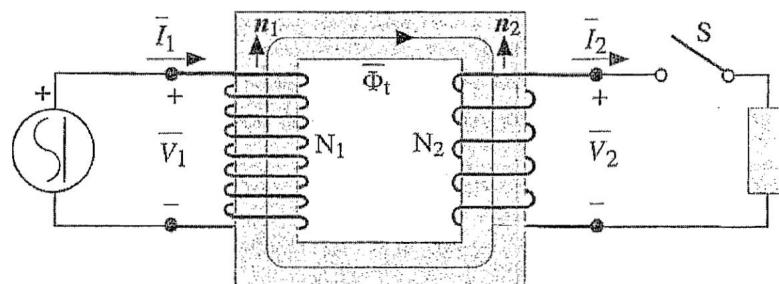


Figura 1.2.2.1

TRASFORMATORI

Per lo studio del funzionamento del trasformatore è utile introdurre il concetto di *trasformatore ideale*, caratterizzato dalle seguenti condizioni:

- la riluttanza del nucleo è nulla ($\mathcal{R} = 0$), ovvero la permeabilità del materiale di cui esso è costituito è infinita ($\mu = \infty$);
- le perdite nel nucleo, per isteresi e correnti parassite, sono nulle;
- l'accoppiamento tra gli avvolgimenti è perfetto, cioè i due avvolgimenti sono concatenati con lo stesso flusso;
- le resistenze degli avvolgimenti sono nulle ($R_1 = 0, R_2 = 0$).

Nel seguito sono dedotte le semplici equazioni e i circuiti equivalenti che descrivono il funzionamento del *trasformatore ideale*; modelli più complessi (ma più rispondenti al reale funzionamento) saranno proposti mano a mano che le condizioni precedenti non saranno più verificate.

1.2.3 Trasformatore ideale

Il *trasformatore ideale* è un doppio bipolo caratterizzato, con le convenzioni di Figura 1.2.3.1, dalle seguenti relazioni tra tensioni e correnti:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= n v_2(t) \\ i_1(t) &= 1/n i_2(t) \end{aligned} \quad (1.2.3.1)$$

ove il numero reale n è detto *rapporto di trasformazione*. In regime sinusoidale esso è governato dalle equazioni in forma simbolica:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = n \bar{V}_2 \\ \bar{I}_1 = \frac{1}{n} \bar{I}_2 \end{cases} \quad (1.2.3.2)$$

se n è positivo, sia le tensioni V_1 e V_2 che le correnti I_1 e I_2 sono in fase tra loro, se n è negativo sono in opposizione.

1.2.3.1 Proprietà del trasformatore ideale

La potenza istantanea erogata a secondario dal trasformatore ideale è uguale alla potenza istantanea assorbita a primario (*conservazione delle potenze*): infatti, dalla (1.2.3.1) discende che la potenza istantanea erogata a secondario vale $p_2(t) = v_2 i_2 = (v_1/n)(n i_1) = v_1 i_1 = p_1(t)$.

Dalla (1.2.3.2) si deduce che tale proprietà vale anche con riferimento alla potenza complessa. Infatti:

$$\dot{S}_2 = \bar{V}_2 \bar{I}_2^* = \frac{\bar{V}_1}{n} \bar{I}_1^* = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \dot{S}_1 \Rightarrow P_1 = P_2 \quad Q_1 = Q_2 \quad (1.2.3.3)$$

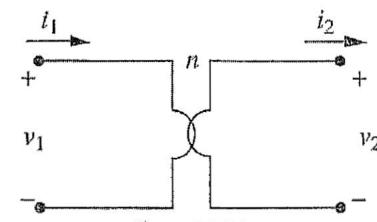


Figura 1.2.3.1

Si usa anche esprimere lo stesso concetto affermando che il trasformatore ideale è trasparente alle potenze attiva e reattiva e alla potenza istantanea.

Se i morsetti della porta 2 del trasformatore ideale vengono chiusi su un'impedenza esterna \dot{Z}_{2e} , con i riferimenti assunti in Figura 1.2.3.2, si ha:

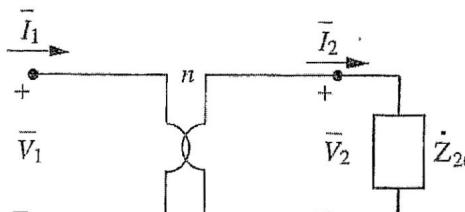


Figura 1.2.3.2

$$\dot{Z}_{2e} = \frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2}. \quad (1.2.3.4)$$

L'impedenza equivalente alla porta 1, vale a dire il rapporto tra la tensione e la corrente, risulta:

$$\dot{Z}_{1eq} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} = \frac{n\bar{V}_2}{\bar{I}_1} = n^2 \frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2} = n^2 \dot{Z}_{2e}, \quad (1.2.3.5)$$

quindi essa è n^2 volte l'impedenza connessa alla porta 2; questa proprietà del trasformatore ideale è detta *trasferimento di impedenza*.

Ad esempio, nei sistemi di riscaldamento ad induzione e in quelli di amplificazione di segnali radio o audio, la potenza nominale del sistema viene ottenuta solamente quando l'impedenza del carico è uguale all'impedenza di uscita del generatore. Se esse sono diverse, si può operare il cosiddetto *adattamento di impedenza* interponendo tra generatore e carico un trasformatore con opportuno rapporto di trasformazione.

1.2.4 Trasformatore reale

I trasformatori *reali* sono normalmente progettati e costruiti per avere, per quanto possibile, proprietà simili a quelle illustrate per il trasformatore ideale.

Un trasformatore reale non verifica nessuna delle quattro condizioni di idealità esposte nel § 1.2.2, ma il suo comportamento può essere dedotto da quello del trasformatore ideale rimuovendole una ad una.

1.2.4.1 Riluttanza del nucleo non nulla

Si considera anzitutto che la permeabilità del nucleo ferromagnetico non sia infinita. Per l'ipotesi di accoppiamento perfetto, tutte le N_1 spire primarie e tutte le N_2 spire secondarie sono attraversate dal medesimo flusso di induzione magnetica

$\phi_1(t)$, sinusoidale nel tempo e coincidente con la portata del circuito magnetico (Fig. 1.2.2.1); quindi, passando alle rappresentazioni fasoriali, il flusso concatenato con l'avvolgimento primario $\bar{\Phi}_{c1}$, e con l'avvolgimento secondario $\bar{\Phi}_{c2}$ risultano rispettivamente:

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{c1} &= N_1 \bar{\Phi}_1 \\ \bar{\Phi}_{c2} &= -N_2 \bar{\Phi}_1\end{aligned} \quad (1.2.4.1)$$

I segni derivano dal fatto che il flusso $\bar{\Phi}_1$ ha riferimento concorde con n_1 , riferimento di $\bar{\Phi}_{c1}$, e discorde con n_2 , riferimento di $\bar{\Phi}_{c2}$. Le tensioni ai morsetti di primario (convenzionato da utilizzatore) e secondario (convenzionato da generatore), coincidono con le f.e.m. indotte e valgono:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{E}_1 = j\omega \bar{\Phi}_{c1} = j\omega N_1 \bar{\Phi}_1 \\ \bar{V}_2 = \bar{E}_2 = -j\omega \bar{\Phi}_{c2} = j\omega N_2 \bar{\Phi}_1 \end{cases} \quad (1.2.4.2)$$

Queste relazioni valgono qualsiasi valore assumano le correnti primaria \bar{I}_1 e secondaria \bar{I}_2 ; per la prima di esse, se la tensione primaria \bar{V}_1 è imposta, pure imposto è il flusso $\bar{\Phi}_1$, indipendentemente da \bar{I}_1 e \bar{I}_2 e dalla riluttanza \mathcal{R} del circuito magnetico.

1.2.4.1a Funzionamento a vuoto

Quando la corrente secondaria è nulla, $\bar{I}_2 = 0$ (interruttore S aperto), la corrente primaria verifica la legge di Hopkinson (§ 11.2.3, Vol.1), che in forma simbolica impone:

$$N_1 \bar{I}_{1\mu} = \mathcal{R} \bar{\Phi}_1 \text{ con } \bar{I}_2 = 0; \quad (1.2.4.3)$$

talè corrente primaria $\bar{I}_{1\mu}$ è chiamata *corrente magnetizzante* o *corrente di magnetizzazione*; essendo $\mathcal{R} \neq 0$, essa è non nulla e in fase con $\bar{\Phi}_1$. Ricavando $\bar{\Phi}_1$ e sostituendo nella prima delle (1.2.4.2) si ha:

$$\bar{V}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_1 = j\omega \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu} = j\omega L_1 \bar{I}_{1\mu} = j X_{10} \bar{I}_{1\mu} \quad (1.2.4.4)$$

quindi il trasformatore con secondario a vuoto si comporta a primario come un bipolo di impedenza $j\omega L_1 = j X_{10}$, corrispondente all'induttanza dell'avvolgimento primario.

1.2.4.1b Funzionamento a carico

Quando la corrente secondaria non è nulla, $\bar{I}_2 \neq 0$ (interruttore S chiuso sul carico, Fig. 1.2.2.1), le correnti primaria \bar{I}_1 e secondaria \bar{I}_2 devono verificare la

- la tensione \bar{V}_2 e la corrente \bar{I}_2 a secondario, che si assumono note;
- la f.e.m. secondaria che vale \bar{E}_2 , per la seconda delle (1.2.4.13);
- la f.e.m. primaria \bar{E}_1 in fase con \bar{E}_2 per le (1.2.4.12);
- la corrente secondaria riportata a primario $\bar{I}_{12} = \frac{1}{n} \bar{I}_2$, in fase con \bar{I}_2 ;
- la corrente a vuoto \bar{I}_{10} , pari alla somma di $\bar{I}_{1\mu}$ e \bar{I}_{1a} , rispettivamente in quadratura in ritardo e in fase con \bar{E}_1 per la (1.2.4.9);
- la corrente primaria \bar{I}_1 , per la seconda delle (1.2.4.14);
- la tensione primaria \bar{V}_1 , per la prima delle (1.2.4.13).

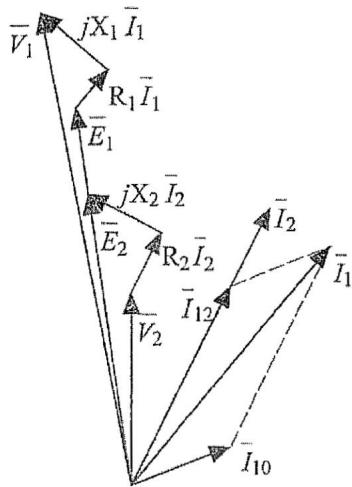


Figura 1.2.4.6

I circuiti equivalenti sopra illustrati sono costituiti da bipoli che non sono individuabili fisicamente e quindi non sono misurabili le singole tensioni e correnti quali ad esempio $R_2 \bar{I}_2$, $jX_2 \bar{I}_2$ e \bar{I}_{10} ; gli unici terminali fisicamente esistenti nel trasformatore sono quelli dei due avvolgimenti, che costituiscono le due porte elettriche, e le uniche grandezze misurabili sono le loro tensioni e correnti \bar{V}_1 , \bar{V}_2 , \bar{I}_1 , \bar{I}_2 .

1.2.5 Funzionamento a vuoto

Il funzionamento a vuoto (a secondario) si ha quando il secondario è aperto: allora è $\bar{I}_2=0$ e quindi $\bar{I}_{12}=0$; per la seconda delle (1.2.4.14) alla porta primaria si ha $\bar{I}_1=\bar{I}_{10}$; in questa condizione la tensione secondaria è indicata con $\bar{V}_2=\bar{V}_{20}$.

1.2.5.1 Impedenza a vuoto a primario

L'impedenza $R_1 + jX_1$ e l'impedenza:

$$\dot{Z}_{10} = \frac{jX_{10} R_{10}}{R_{10} + jX_{10}} \quad (1.2.5.1)$$

risultano in serie, essendo entrambe percorse dalla corrente \bar{I}_{10} . Nei trasformatori di potenza si ha $Z_{10} \gg \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ (tipicamente di tre ordini di grandezza). Tale condizione permette, con ottima approssimazione, di trascurare l'impedenza $R_1 + jX_1$ (come se fosse nulla) nel funzionamento a vuoto, sicché l'impedenza a primario praticamente coincide con la (1.2.5.1), che perciò è detta *impedenza a vuoto a primario*. Anche all'impedenza $R_2 + jX_2$, avente corrente nulla, può essere sostituito un cortocircuito; vale dunque il circuito equivalente a vuoto di Figura 1.2.5.1, che mostra come nel funzionamento a vuoto il comportamento dipende esclusivamente dal nucleo ferromagnetico, che determina \dot{Z}_{10} ; in particolare la potenza attiva assorbita a vuoto dal trasformatore corrisponde alle perdite nel ferro, mentre la potenza reattiva serve a magnetizzare il nucleo.

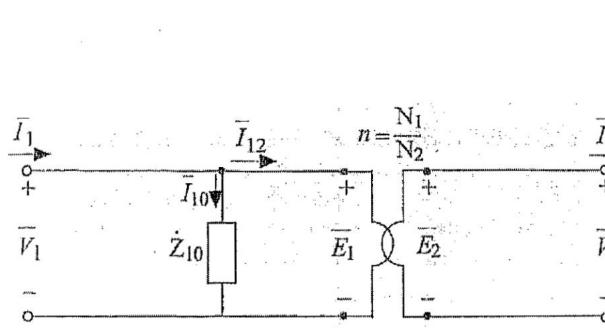


Figura 1.2.5.1

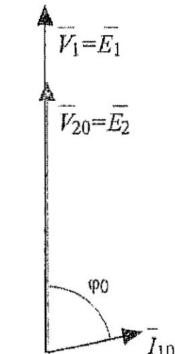


Figura 1.2.5.2

In base alle assunzioni precedenti, trascurando la piccola caduta di tensione prodotta dalla corrente \bar{I}_{10} sull'impedenza $R_1 + jX_1$, le tensioni alle porte verificano le relazioni:

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 = n \bar{E}_2 = n \bar{V}_{20} \Rightarrow n = \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_{20}}; \quad (1.2.5.2)$$

quindi il trasformatore reale a vuoto si comporta come un trasformatore ideale con ottima approssimazione per quanto riguarda le tensioni, ma non per le correnti, essendo $\bar{I}_{10} \neq 0$ con $\bar{I}_2=0$. In Figura 1.2.5.2 è rappresentato il diagramma fasoriale del circuito equivalente a vuoto di Figura 1.2.5.1.

1.2.5.2 Corrente a vuoto a primario

Si definisce *corrente a vuoto a primario* il valore efficace I_{10} della corrente primaria che si presenta nel funzionamento a vuoto con valore efficace della tensione primaria pari alla tensione nominale V_{1n} :

$$I_{10} = \frac{V_{1n}}{Z_{10}}; \quad (1.2.5.3)$$

generalmente si considera la corrente a vuoto percentuale, definita rapportando I_{10} alla corrente nominale primaria I_{1n} :

$$i_0 \% \triangleq \frac{I_{10}}{I_{1n}} 100 = \frac{V_{1n}}{Z_{10} I_{1n}} 100. \quad (1.2.5.4)$$

1.2.6 Funzionamento in cortocircuito

Il funzionamento in cortocircuito (a secondario) si ha quando il secondario è cortocircuitato: allora è $\bar{V}_2=0$; in questa condizione le correnti a primario e secondario sono dette di cortocircuito e sono indicate con $\bar{I}_1 = \bar{I}_{1cc}$ e $\bar{I}_2 = \bar{I}_{2cc}$.

1.2.6.1 Circuito equivalente riportato a primario

Per analizzare il funzionamento in cortocircuito conviene considerare il circuito equivalente riportato a primario (Fig. 1.2.6.1) che si ottiene applicando al circuito di Figura 1.2.4.5 la proprietà del trasformatore ideale illustrata in § 1.2.3.1 (*trasferimento di impedenza*), per la quale l'impedenza a secondario $R_2 + jX_2$ può essere sostituita con l'impedenza $R_{12} + jX_{12}$ posta a primario, avente parametri:

$$\begin{cases} R_{12} = n^2 R_2 \\ X_{12} = n^2 X_2 \end{cases} \quad (1.2.6.1)$$

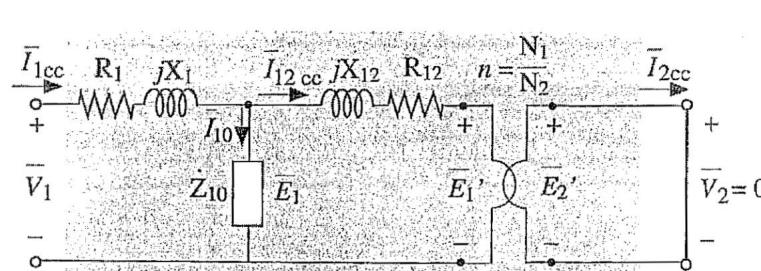


Figura 1.2.6.1

TRASFORMATORI

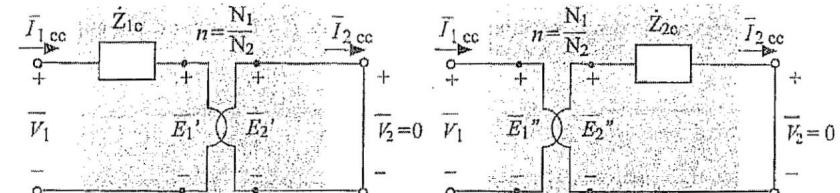


Figura 1.2.6.2

Figura 1.2.6.3

1.2.6.2 Impedenze in cortocircuito

Nel circuito di Figura 1.2.6.1 la tensione alla porta primaria del trasformatore ideale è nulla ($\bar{E}_1' = n\bar{V}_2 = 0$) e quindi le impedenze \dot{Z}_{10} e $R_{12} + jX_{12}$ risultano in parallelo, perché entrambe sono sottoposte alla tensione \bar{E}_1 . Nei trasformatori di potenza si ha $Z_{10} \gg \sqrt{R_{12}^2 + X_{12}^2}$ (tipicamente di tre ordini di grandezza). Tale condizione permette, con ottima approssimazione, di trascurare l'impedenza \dot{Z}_{10} (come se avesse modulo infinito); così le impedenze $R_{1c} + jX_{1c}$ e $R_{12} + jX_{12}$ risultano in serie, dando luogo all'impedenza equivalente:

$$\dot{Z}_{1c} = R_{1c} + jX_{1c} \quad \text{ove} \quad \begin{cases} R_{1c} = R_{12} + R_{12} \\ X_{1c} = X_{12} + X_{12} \end{cases}; \quad (1.2.6.2)$$

questa, con ottima approssimazione, costituisce l'impedenza vista alla porta del primario quando il secondario è in cortocircuito e perciò è detta *impedenza di cortocircuito a primario*; le sue componenti R_{1c} e X_{1c} sono dette rispettivamente *resistenza in cortocircuito a primario* e *reattanza in cortocircuito a primario*. Vale dunque il circuito equivalente in cortocircuito di Figura 1.2.6.2. Applicando il trasferimento di impedenza, \dot{Z}_{1c} , posta a primario del trasformatore ideale, può essere sostituita con l'impedenza \dot{Z}_{2c} posta a secondario, avente parametri:

$$\dot{Z}_{2c} = R_{2c} + jX_{2c} = \frac{1}{n^2} \dot{Z}_{1c} \quad \text{ove} \quad \begin{cases} R_{2c} = \frac{R_{1c}}{n^2} \\ X_{2c} = \frac{X_{1c}}{n^2} \end{cases}; \quad (1.2.6.3)$$

essa è detta *impedenza di cortocircuito a secondario* del trasformatore; R_{2c} e X_{2c} sono dette rispettivamente *resistenza in cortocircuito a secondario* e *reattanza in cortocircuito a secondario*. Vale quindi anche il circuito equivalente in cortocircuito di Figura 1.2.6.3.

Dunque nel funzionamento in cortocircuito il comportamento dipende esclusivamente dagli avvolgimenti, che determinano \dot{Z}_{1c} e \dot{Z}_{2c} ; in particolare la potenza attiva assorbita in cortocircuito dal trasformatore coincide con le perdite nel rame.

In base alle assunzioni precedenti, dato che si ha $\bar{I}_1 \approx \bar{I}_{12}$ con ottima approssimazione, le correnti alle porte verificano le relazioni:

$$\bar{I}_{1cc} = \bar{I}_{12cc} = \frac{1}{n} \bar{I}_{2cc} \Rightarrow n = \frac{\bar{I}_{2cc}}{\bar{I}_{1cc}}; \quad (1.2.6.4)$$

quindi il trasformatore in cortocircuito si comporta come un trasformatore ideale con ottima approssimazione per quanto riguarda le correnti, ma non per le tensioni, essendo $\bar{V}_1 \neq 0$ con $\bar{V}_2 = 0$.

1.2.6.3 Tensioni di cortocircuito

Si definisce *tensione primaria di cortocircuito* V_{1c} il valore efficace della tensione primaria che, con il secondario in cortocircuito, comporta una corrente primaria di valore efficace pari alla corrente nominale I_{1n} ; vale dunque la relazione:

$$V_{1c} = Z_{1c} I_{1n}. \quad (1.2.6.5)$$

Analogamente si definisce *tensione secondaria di cortocircuito* V_{2c} il valore efficace della tensione secondaria che, con il primario in cortocircuito, comporta una corrente secondaria di valore efficace pari alla corrente nominale I_{2n} ; per essa vale la relazione:

$$V_{2c} = Z_{2c} I_{2n}; \quad (1.2.6.6)$$

dalle relazioni $I_{2n} = nI_{1n}$ e $Z_{1c} = n^2 Z_{2c}$ si deduce che $V_{1c} = nV_{2c}$.

Si considerano anche le tensioni di cortocircuito percentuali, definite rapportando V_{1c} e V_{2c} alle tensioni nominali V_{1n} e V_{2n} :

$$\begin{cases} v_{1c}\% = \frac{V_{1c}}{V_{1n}} 100 = \frac{Z_{1c} I_{1n}}{V_{1n}} 100 \\ v_{2c}\% = \frac{V_{2c}}{V_{2n}} 100 = \frac{Z_{2c} I_{2n}}{V_{2n}} 100 \end{cases}; \quad (1.2.6.7)$$

dalle relazioni precedenti si deduce facilmente che esse coincidono, quindi si definisce una sola *tensione di cortocircuito percentuale* $v_{cc}\%$:

$$v_{1c}\% = v_{2c}\% = v_{cc}\%. \quad (1.2.6.8)$$

1.2.6.4 Triangolo di cortocircuito

Si consideri il circuito equivalente di Figura 1.2.6.3, ripreso in Figura 1.2.6.4, nel quale si impongono alle correnti di cortocircuito valori efficaci uguali a quelli nominali; allora la tensione su \dot{Z}_{2c} vale:

$$\bar{V}_{2c} = \dot{Z}_{2c} \bar{I}_{2n} = (R_{2c} + jX_{2c}) \bar{I}_{2n}; \quad (1.2.6.9)$$

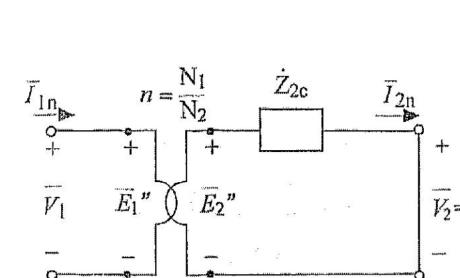


Figura 1.2.6.4

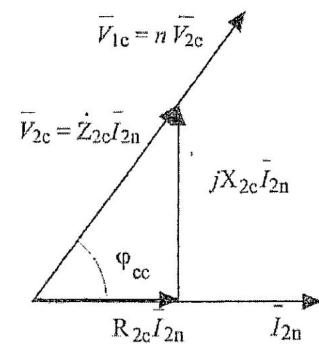


Figura 1.2.6.5

nel corrispondente diagramma fasoriale (Fig. 1.2.6.5), tracciato ponendo a piacere I_{2n} sull'asse reale, \bar{V}_{2c} e le sue componenti resistiva $R_{2c} \bar{I}_{2n}$ ed induttiva $jX_{2c} \bar{I}_{2n}$ danno luogo al cosiddetto *triangolo di cortocircuito*. Si definiscono anche l'*angolo di cortocircuito* φ_{cc} ed il *fattore di potenza in cortocircuito* $\cos\varphi_{cc}$:

$$\varphi_{cc} = \arctg \frac{X_{2c}}{R_{2c}}, \quad (1.2.6.10)$$

Quando sono noti $v_{cc}\%$, $\cos\varphi_{cc}$ ed i valori nominali, si possono ricavare i parametri del triangolo di cortocircuito:

$$Z_{2c} = \frac{V_{2c}}{I_{2n}} = \frac{v_{cc}\% V_{2n}}{100 I_{2n}}, \quad \begin{cases} R_{2c} = Z_{2c} \cos\varphi_{cc} \\ X_{2c} = Z_{2c} \sin\varphi_{cc} \end{cases}. \quad (1.2.6.11)$$

1.2.7 Misura dei parametri dei circuiti equivalenti

I parametri dei circuiti equivalenti si possono determinare mediante le misure fornite dagli strumenti inseriti come in Figura 1.2.7.1.

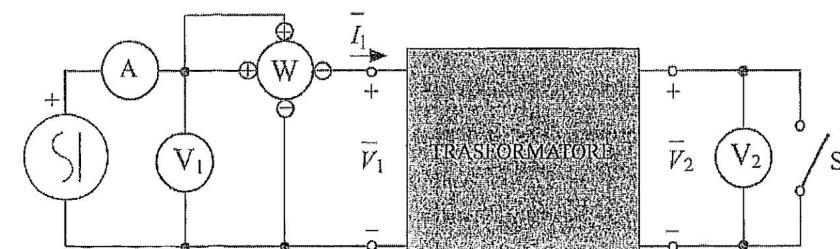


Figura 1.2.7.1

1.2.7.1 Prova a vuoto

Quando l'interruttore S è aperto, il secondario è a vuoto; alimentando il primario, gli strumenti forniscono le misure di I_1' , V_1' , P' e V_2' . Essi permettono di determinare l'impedenza a vuoto a primario $\dot{Z}_{10} = Z_{10} e^{j\phi_0}$, che compare nel circuito di Figura 1.2.5.1; in particolare il modulo dell'impedenza e il fattore di potenza valgono:

$$Z_{10} = \frac{V_1'}{J_1'}, \quad \cos\phi_0 = \frac{P'}{V_1' J_1'}; \quad (1.2.7.1)$$

la resistenza e la reattanza a vuoto, il cui parallelo forma \dot{Z}_{10} , valgono:

$$R_{10} = \frac{Z_{10}}{\cos\phi_0}, \quad X_{10} = \frac{Z_{10}}{\sin\phi_0}. \quad (1.2.7.2)$$

Dato che il trasformatore a vuoto non ha comportamento lineare, conviene effettuare la prova a vuoto con valore efficace della tensione primaria pari alla tensione nominale, $V_1' = V_{1n}$ in modo da determinare il valore di \dot{Z}_{10} nelle condizioni in cui il trasformatore è destinato a funzionare.

Essendo la prova eseguita con il secondario aperto, dalle misure si deduce anche il rapporto di trasformazione, in accordo con la (1.2.5.2):

$$n = \frac{V_1'}{V_2'}. \quad (1.2.7.3)$$

1.2.7.2 Prova in cortocircuito

Quando l'interruttore S di Figura 1.2.7.1 è chiuso, il secondario è in cortocircuito; alimentando il primario, gli strumenti forniscono le misure di I_1 , V_1 e P . Essi permettono di determinare le impedenze in cortocircuito a primario $\dot{Z}_{1c} = Z_{1c} e^{j\phi_{cc}}$ e a secondario $\dot{Z}_{2c} = Z_{2c} e^{j\phi_{cc}}$ che compaiono nei circuiti di Figura 1.2.6.2 e Figura 1.2.6.3; in particolare moduli e fattore di potenza valgono:

$$Z_{1c} = \frac{V_4''}{I_1''}, \quad Z_{2c} = \frac{Z_{1c}}{n^2}, \quad \cos\phi_{cc} = \frac{P''}{V_2'' I_2''}; \quad (1.2.7.4)$$

le resistenze di cortocircuito e le reattanze di cortocircuito, le serie delle quali costituiscono rispettivamente \dot{Z}_{sc} e \dot{Z}_{ac} , valgono:

$$\begin{cases} R_{1c} = Z_{1c} \cos \varphi_{cc}, & X_{1c} = Z_{1c} \sin \varphi_{cc} \\ R_{2c} = Z_{2c} \cos \varphi_{cc}, & X_{2c} = Z_{2c} \sin \varphi_{cc} \end{cases}. \quad (1.2.7.5)$$

Dato che le impedenze di cortocircuito sono lineari, la prova in cortocircuito può essere effettuata a qualsiasi livello di corrente primaria I_1 , avendo cura di non

superare la corrente nominale I_{1n} per evitare sollecitazioni oltre i limiti progettuali. Se I_1'' è uguale a I_{1n} , V_1'' è pari alla tensione primaria di cortocircuito V_{1c} .

1.2.8 Funzionamento a carico

1.2.8.1 Circuiti equivalenti semplificati

Anche in questa condizione è possibile applicare il trasferimento di impedenza, come in Figura 1.2.6.1, sostituendo l'impedenza a secondario $R_2 + jX_2$ con l'impedenza $R_{12} + jX_{12}$ posta a primario. Inoltre, a carico la tensione primaria \bar{V}_1 e la f.e.m. primaria \bar{E}_1 sono quasi uguali (a potenza nominale V_1 e E_1 differiscono di pochi percento); così pure la corrente primaria \bar{I}_1 e la corrente secondaria riportata a primario \bar{I}_{12} sono quasi uguali (a potenza nominale I_1 e I_{12} differiscono di pochi percento). Pertanto si introduce un errore modesto se si sposta l'impedenza \dot{Z}_{10} a monte dell'impedenza $R_1 + jX_1$, ponendola in parallelo alla porta primaria; infatti così l'impedenza a vuoto \dot{Z}_{10} risulta sottoposta alla tensione $\bar{V}_1 \approx \bar{E}_1$ (invece che ad \bar{E}_1) mentre $R_1 + jX_1$ ha corrente $\bar{I}_{12} \approx \bar{I}_1$ (invece che \bar{I}_1). Con tale modifica $R_1 + jX_1$ e $R_{12} + jX_{12}$ risultano in serie e possono essere sostituite dalla loro somma, ovvero dall'impedenza di cortocircuito a primario \dot{Z}_{1c} , definita in (1.2.6.2). Il circuito equivalente risultante è mostrato in Figura 1.2.8.1.

Il corrispondente diagramma fasoriale (Fig. 1.2.8.2) può essere ottenuto tracciando le grandezze nel seguente ordine:

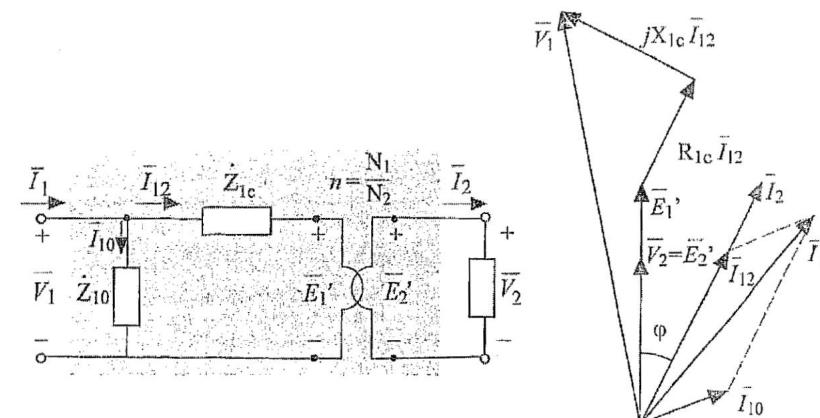


Figura 1,2,8,1

Figura 1.2.8.2

- la tensione \bar{V}_2 e la corrente \bar{I}_2 a secondario, che si assumono note;
- la f.e.m. del trasformatore ideale secondaria $\bar{E}_2' = \bar{V}_2$;
- la f.e.m. primaria $\bar{E}_1' = n\bar{E}_2'$;
- la corrente secondaria riportata a primario $\bar{I}_{12} = \bar{I}_2/n$;
- la tensione primaria $\bar{V}_1 = E_1' + \dot{Z}_{1c}\bar{I}_{12} = E_1' + R_{1c}\bar{I}_{12} + jX_{12}\bar{I}_{12}$;
- la corrente a vuoto $\bar{I}_{10} = \bar{V}_1 / \dot{Z}_{10}$;
- la corrente primaria $\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12}$.

Se la tensione primaria \bar{V}_1 è imposta, l'impedenza a vuoto \dot{Z}_{10} è ininfluente su tensione e corrente a secondario e quindi può essere omessa al fine della determinazione di queste ultime, ottenendo un circuito ulteriormente semplificato, nel quale, trascurando \bar{I}_{10} , alla porta primaria è presente la sola corrente \bar{I}_{12} .

Il trasferimento di impedenza permette di sostituire l'impedenza \dot{Z}_{1c} posta a primario del trasformatore ideale con l'impedenza di cortocircuito a secondario $\dot{Z}_{2c} = \dot{Z}_{1c}/n^2$, pervenendo così al circuito equivalente semplificato di Figura 1.2.8.3; il relativo diagramma fasoriale è illustrato in Figura 1.2.8.4.

Essendo la tensione primaria \bar{V}_1 imposta, nel circuito equivalente di Figura 1.2.8.3 anche la f.e.m. $\bar{E}_2'' = \bar{E}_1''/n = \bar{V}_1/n$ è imposta, come se essa fosse impressa da un generatore ideale di tensione. Pertanto, quando non interessano le grandezze a primario del trasformatore, può essere considerato il circuito equivalente sempli-

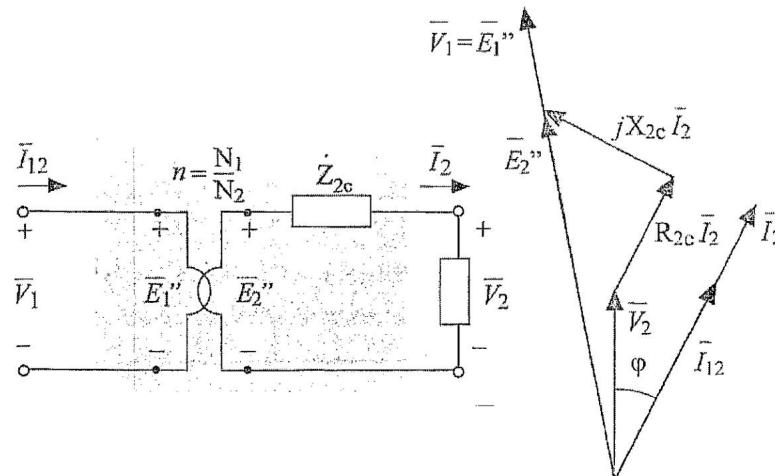


Figura 1.2.8.3

Figura 1.2.8.4

ficato di Figura 1.2.8.5. Quando la corrente secondaria è nulla, tale è pure la caduta di tensione su \dot{Z}_{2c} e pertanto la tensione secondaria a vuoto \bar{V}_{20} (vale a dire per $I_2 = 0$) coincide con la f.e.m. \bar{E}_2'' ; si ha quindi:

$$\bar{V}_{20} = \bar{E}_2'' = \frac{\bar{V}_1}{n}. \quad (1.2.8.1)$$

1.2.8.2 Caduta di tensione a carico - diagramma di Kapp

Spesso interessa conoscere la caduta di tensione a secondario ΔV_2 , definita come differenza tra i valori efficaci che la tensione secondaria presenta a vuoto e a carico: $\Delta V_2 = V_{20} - V_2$. Una valutazione approssimata di ΔV_2 può essere dedotta dal circuito equivalente di Figura 1.2.8.5, al quale corrisponde il diagramma fasoriale di Figura 1.2.8.6 (diagramma di Kapp).

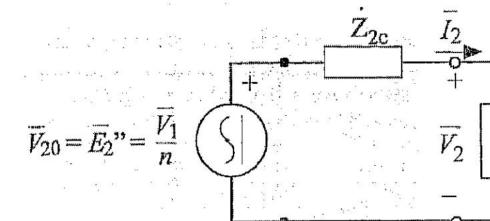


Figura 1.2.8.5

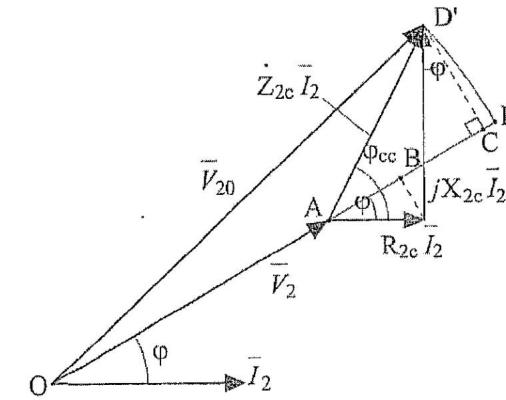


Figura 1.2.8.6

In tale diagramma si ha: OA = V_2 , OD = OD' = V_{20} , AD = OD - OA = ΔV_2 ; dato che CD ≪ AD, con buona approssimazione, si ottiene: $AD \approx AC = AB + BC = R_{2c} I_2 \cos\varphi + X_{2c} I_2 \sin\varphi$, e quindi:

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \cong R_{2c} I_2 \cos\varphi + X_{2c} I_2 \sin\varphi; \quad (1.2.8.2)$$

pertanto per un dato trasformatore (ossia fissati Z_{2c} e φ_{cc}) la caduta di tensione è funzione dell'impedenza di cortocircuito del trasformatore (R_{2c} ed X_{2c}), del valore efficace della corrente I_2 e del suo sfasamento φ rispetto alla tensione V_2 .

- Se $\Delta V_2 > 0$, nel passare da vuoto a carico si ha una diminuzione della tensione secondaria del trasformatore. Dalla (1.2.8.2) si deduce che ciò avviene quando il carico verifica la condizione:

$$\operatorname{tg}\varphi > -\frac{R_{2c}}{X_{2c}}; \quad (1.2.8.3)$$

tal diseguaglianza è sempre verificata per carichi ohmico-induttivi ($\varphi > 0$), ma anche per carichi ohmico-capacitivi che impongono uno sfasamento non troppo elevato.

- Viceversa se $\Delta V_2 < 0$, nel passare da vuoto a carico si ha un aumento della tensione a secondario del trasformatore. Ciò avviene con carichi ohmico-capacitivi che impongono uno sfasamento φ tale che $\operatorname{tg}\varphi < -R_{2c}/X_{2c}$.

La caduta di tensione viene spesso espressa anche in valore percentuale della tensione secondaria, ovvero:

$$\Delta V_2 \% = \frac{\Delta V_2}{V_{20}} 100 \cong \frac{R_{2c} I_2 \cos\varphi + X_{2c} I_2 \sin\varphi}{V_{20}} 100 \quad (1.2.8.4)$$

1.2.8.3 Perdite e rendimento

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, i trasformatori reali presentano essenzialmente due tipi di perdite:

- perdite nel rame (P_{Cu}), che si manifestano negli avvolgimenti per effetto Joule e dipendono dalla condizione di carico; con riferimento ai circuiti equivalenti di Figura 1.2.8.1 e Figura 1.2.8.3 sono esprimibili come:

$$P_{Cu} = R_{1c} I_1^2 = R_{2c} I_2^2. \quad (1.2.8.5)$$

- perdite nel ferro (P_{Fe}), che si manifestano nel nucleo ferromagnetico per isteresi e correnti parassite e dipendono dalla sola tensione di alimentazione; con riferimento al circuito equivalente di Figura 1.2.6.1 sono esprimibili come:

$$P_{Fe} = \frac{V_1^2}{R_{10}}. \quad (1.2.8.6)$$

Di conseguenza, per una data potenza attiva P_u erogata a secondario (ed assorbita dal carico), il trasformatore assorbe a primario la potenza $P_a > P_u$ con rendimento:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_{Cu} + P_{Fe}}. \quad (1.2.8.7)$$

Per un determinato trasformatore il rendimento è funzione della condizione di carico, ossia della corrente secondaria I_2 e dello sfasamento φ tra tensione e corrente secondarie; a parità di I_2 , cresce al crescere del fattore di potenza $\cos\varphi$; a parità di $\cos\varphi$, cresce al crescere di I_2 fino ad un determinato valore minore della corrente nominale, oltre il quale diminuisce lentamente.

Rendimento nominale è quello che si presenta alla potenza nominale con fattore di potenza unitario. Esso è tanto più elevato quanto maggiore è la potenza nominale del trasformatore; si riscontrano tipicamente i valori indicati in Tabella 1.2.6.1, valida anche per i trasformatori trifasi.

Potenza nominale P_n [kVA]	1	10	100	1.000	10.000	50.000
Rendimento η	0,93	0,96	0,975	0,985	0,99	0,993

Tabella 1.2.6.1

1.2.9 Dati di targa

I principali parametri che caratterizzano il funzionamento di un trasformatore vengono chiamati dati di targa perché sono riportati in una targa applicata al trasformatore stesso; essa tipicamente comprende:

- costruttore, numero di matricola e anno di fabbricazione;
- marchi di conformità normativa (quali il marchio europeo CE);
- i principali valori nominali (P_n , V_{1n} , V_{2n} , f_n ...);
- $V_{cc}\%$;
- $\cos\varphi_{cc}$;
- tipo di raffreddamento (indicato con simboli quali ONAN = Olio Naturale Aria Naturale);
- tipo di servizio;
- peso.

La Figura 1.2.9.1 illustra un esempio di targa.

Officine Elettromeccaniche Romolo & Remo SpA, ROMA		CE
TRASFORMATORE	MONOFASE	3827
anno	753 AC	50 Hz
P_n	100 kVA	$V_{cc}\%$
V_{1n}	10 kV	$\cos\varphi_{cc}$
V_{2n}	220 V	tipo
peso	800 kg	servizio

Figura 1.2.9.1

1.2.9.1 Simboli impiantistici del trasformatore monofase

Negli schemi impiantistici il trasformatore monofase viene in genere rappresentato con i simboli di Figura 1.2.9.2: il primo è utilizzato negli *schemi bifilari*, che mostrano entrambi i conduttori, sia primari che secondari (e i relativi terminali); il secondo trova impiego nei cosiddetti *schemi unifilari*, ove le linee elettriche primaria e secondaria vengono rappresentate ciascuna da una sola linea grafica (i trattini trasversali indicano il numero dei conduttori).

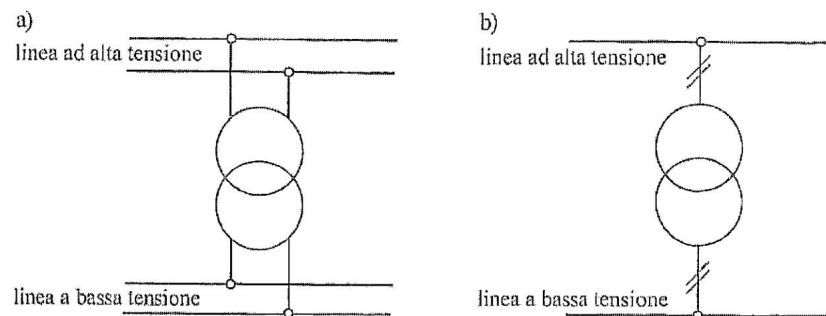


Figura 1.2.9.2

1.2.10 Parallelo di trasformatori monofasi

Se si alimentano uno o più carichi utilizzatori con un solo trasformatore, questo va mantenuto sempre in servizio, anche quando è richiesta potenza molto ridotta rispetto alla sua potenza nominale, sicché la fornitura avviene con rendimento inferiore a quello massimo; inoltre, se il trasformatore deve essere posto "fuori servizio" a causa di un guasto o per manutenzione, i carichi utilizzatori restano privi di alimentazione. Risulta quindi preferibile utilizzare più trasformatori che, all'aumentare della potenza richiesta, possano essere via via fatti funzionare in parallelo tra loro, connettendo i primari alla stessa linea di alimentazione e i secondari alla stessa linea di utilizzazione, cui sono connessi i carichi utilizzatori, come illustra la Figura 1.2.10.1, ove sono utilizzati i circuiti equivalenti semplificati di Figura 1.2.8.3. Nel seguito, per semplicità di trattazione si considerano due trasformatori in parallelo, ma il ragionamento può essere facilmente generalizzato.

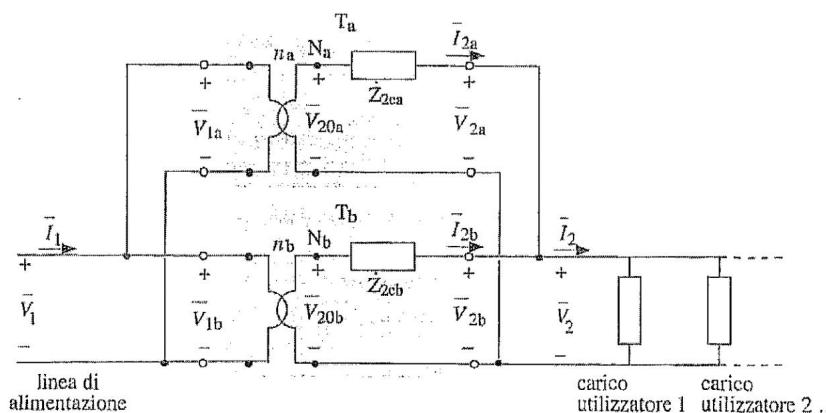


Figura 1.2.10.1

1.2.10.1 Condizioni di corretto funzionamento in parallelo

Affinché i trasformatori in parallelo funzionino correttamente, devono essere soddisfatte le due condizioni seguenti:

- nel funzionamento a vuoto (quando la linea di utilizzazione non assorbe corrente; $I_2 = 0$) anche i trasformatori che compongono il parallelo devono lavorare a vuoto ($I_{2a} = 0, I_{2b} = 0$). In caso contrario vi sarebbe dissipazione di potenza negli avvolgimenti, anche con potenza erogata alla linea di utilizzazione nulla;
- in ogni condizione di carico, le correnti e quindi le potenze apparenti erogate devono essere ripartite proporzionalmente alle rispettive potenze nominali, cosicché, al crescere del carico, i due trasformatori raggiungono insieme la loro potenza nominale, evitando così che un trasformatore rimanga sottoutilizzato.

1.2.10.2 Vincoli sui parametri

In tutta generalità ed indipendentemente dalle condizioni di lavoro, la connessione in parallelo comporta le relazioni:

$$\begin{cases} \bar{V}_{1a} = \bar{V}_{1b} = \bar{V}_1 \\ \bar{V}_{2a} = \bar{V}_{2b} = \bar{V}_2 \\ \bar{I}_{2a} + \bar{I}_{2b} = \bar{I}_2 \end{cases} \quad (1.2.10.1)$$

Inoltre i parametri che caratterizzano i due trasformatori non sono liberi, dato che le due condizioni di corretto funzionamento in parallelo sopra enunciate comportano per essi dei vincoli.

1.2.10.2a Linea di utilizzazione a vuoto

La prima condizione impone che quando la linea di utilizzazione è a vuoto lo siano anche i due trasformatori: ($I_{2a} = I_{2b} = 0$); applicando la LKT alla maglia costituita dai secondari dei due trasformatori di Figura 1.2.10.1 si ottiene:

$$\bar{V}_{20a} - \bar{V}_{20b} = \dot{Z}_{2ca}\bar{I}_{2a} - \dot{Z}_{2cb}\bar{I}_{2b}; \quad (1.2.10.2)$$

imponendo ad essa la condizione di correnti secondarie nulle si deduce che le tensioni secondarie a vuoto devono essere uguali:

$$\bar{V}_{20a} = \bar{V}_{20b} = \bar{V}_2. \quad (1.2.10.3)$$

Dividendo membro a membro la prima delle (1.2.10.1) per quest'ultima si ottiene:

$$\frac{\bar{V}_{1a}}{\bar{V}_{20a}} = \frac{\bar{V}_{1b}}{\bar{V}_{20b}}; \quad (1.2.10.4)$$

questa relazione comporta che *i due trasformatori abbiano uguali rapporti di trasformazione*:

$$n_a = n_b \quad (1.2.10.5)$$

e che i loro morsetti secondari siano connessi in modo tale che le loro tensioni risultino in fase.

1.2.10.2b Linea di utilizzazione a carico

Quando i trasformatori erogano potenza al carico, la condizione ottimale di funzionamento è quella che minimizza le perdite nel rame complessive. Tenuto conto della (1.2.10.3), la LKT alla maglia costituita dai secondari dei due trasformatori di Figura 1.2.10.1 fornisce:

$$\dot{Z}_{2ca} \bar{I}_{2a} = \dot{Z}_{2cb} \bar{I}_{2b}, \quad (1.2.10.6)$$

mentre la LKC al nodo di parallelo a secondario impone che:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{2a} + \bar{I}_{2b}. \quad (1.2.10.7)$$

A parità di corrente erogata al carico I_2 , le perdite nel rame dipendono dai valori efficaci delle correnti \bar{I}_{2a} e \bar{I}_{2b} , che in generale sono sfasate tra loro. Ovviamente le perdite sono minime quando le due correnti sono in fase tra loro. In particolare, a pieno carico si avrà $I_{2n} = I_{2na} + I_{2nb}$.

Inoltre a pieno carico la (1.2.10.6) diviene:

$$\bar{V}_{2ca} = \dot{Z}_{2ca} \bar{I}_{2na} = \dot{Z}_{2cb} \bar{I}_{2nb} = \bar{V}_{2cb}; \quad (1.2.10.8)$$

essa indica che, per ottenere le condizioni di funzionamento ottimale, le *tensioni di cortocircuito a secondario devono essere uguali, in modulo e fase*.

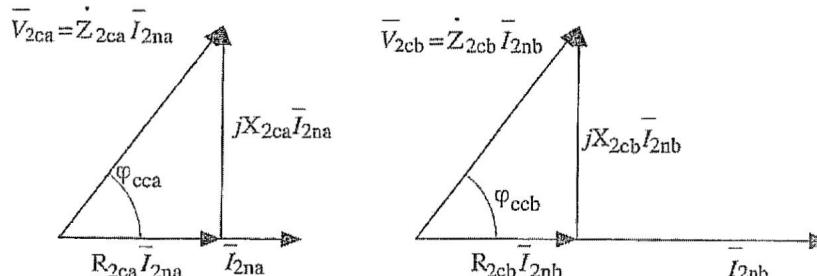


Figura 1.2.10.2

I diagrammi fasoriali che rispettano le condizioni precedenti sono mostrati in Figura 1.2.10.2: essendo $\bar{V}_{2ca} = \bar{V}_{2cb}$ e le correnti \bar{I}_{2na} e \bar{I}_{2nb} in fase tra loro, i triangoli di cortocircuito dei due trasformatori sono uguali. Ne segue che le tensioni di cortocircuito percentuali ed i fattori di potenza di cortocircuito sono uguali:

$$\begin{cases} V_{cca}\% = V_{ccb}\% \\ \cos\varphi_{cca} = \cos\varphi_{ccb} \end{cases} \quad (1.2.10.9)$$

Riassumendo, per il corretto funzionamento in parallelo due o più trasformatori devono soddisfare alle due seguenti condizioni:

- avere uguali rapporti di trasformazione;
- avere uguali triangoli di cortocircuito (ovvero uguali tensioni di cortocircuito percentuali e uguali fattori di potenza di cortocircuito).

Dalle (1.2.10.6) e (1.2.10.8) si ottiene anche:

$$\frac{\bar{I}_{2a}}{\bar{I}_{2b}} = \frac{I_{2na}}{I_{2nb}}, \quad (1.2.10.10)$$

la quale indica che nei due trasformatori, posti in parallelo nel rispetto delle condizioni illustrate, le correnti secondarie hanno sempre valori efficaci proporzionali alle rispettive correnti nominali; pertanto in ogni condizione di lavoro anche le potenze erogate risultano ripartite proporzionalmente alle rispettive potenze nominali. Non esiste invece nessun vincolo tra le potenze nominali, cosicché anche trasformatori di potenza nominale assai diversa possono venire posti in parallelo se rispettano le condizioni indicate.

■ 1.3 TRASFORMATORE TRIFASE

1.3.1 Generalità

Per la trasformazione di un sistema trifase di tensioni e correnti si possono utilizzare tre trasformatori monofasi identici, uno per ciascuna fase, oppure un solo trasformatore trifase (Fig. 1.3.1.1-2-3); quest'ultimo dispone di una terna di avvolgimenti primari, una terna di avvolgimenti secondari e di un solo nucleo ferromagnetico.

Avvolgimenti, isolamenti, nucleo e sistemi di raffreddamento hanno caratteristiche analoghe a quelle dei trasformatori monofasi; gli avvolgimenti primari e secondari sono disposti a coppie lungo le colonne del nucleo in modo da garantire mutuo accoppiamento elevato.

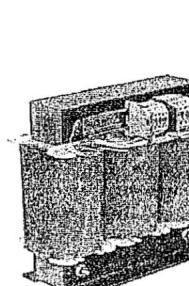


Figura 1.3.1.1 Trasformatore trifase in aria da 7 kVA.

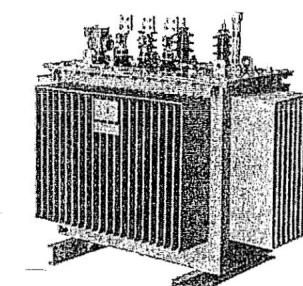


Figura 1.3.1.2 Trasformatore trifase in olio 630 kVA - 20 kV / 400 V.

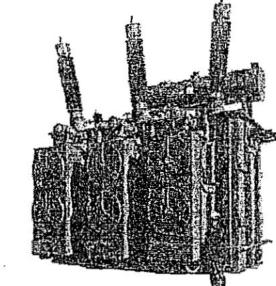


Figura 1.3.1.3 Trasformatore trifase in olio 15 MVA.

1.3.1.1 Nucleo ferromagnetico trifase

Il trasformatore trifase può avere:

- *nucleo a 3 colonne*, con la topologia illustrata schematicamente in Figura 1.3.1.4. È questa la soluzione più frequentemente adottata, perché più semplice ed economica; in essa i flussi delle tre colonne, per non dare luogo a flussi dispersi fuori dal nucleo, devono soddisfare alla prima legge di Kirchhoff per le reti magnetiche:

$$\bar{\Phi}_A + \bar{\Phi}_B + \bar{\Phi}_C = 0 \quad (1.3.1.1)$$

se le tensioni degli avvolgimenti costituiscono terne simmetriche anche i flussi lo sono necessariamente e la (1.3.1.1) non comporta alcuna limitazione al normale funzionamento del trasformatore.

- *nucleo a mantello o corazzato*, con le tipologie schematizzate in Figura 1.3.1.5 e Figura 1.3.1.6; i flussi delle colonne non sono tra loro vincolati dalla (1.3.1.1) ed il funzionamento magnetico del trasformatore trifase è sostanzialmente quello di tre trasformatori monofasi.

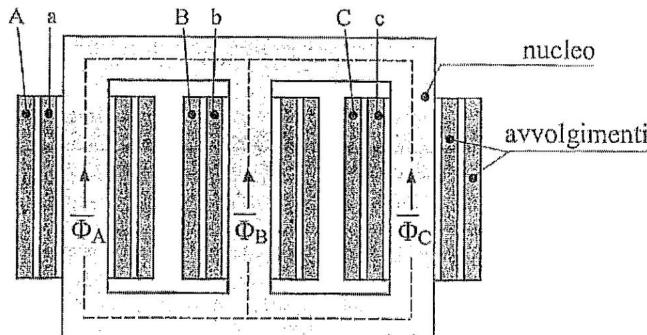


Figura 1.3.1.4

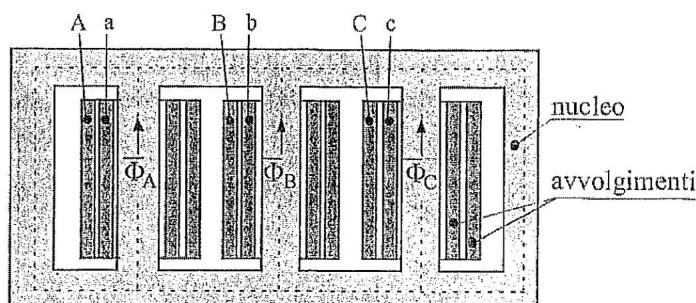


Figura 1.3.1.5

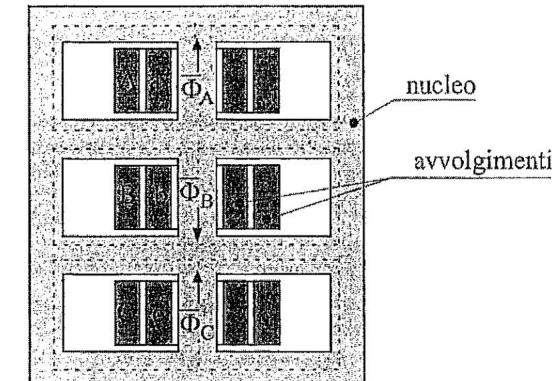


Figura 1.3.1.6

1.3.2 Collegamenti degli avvolgimenti

Quale che sia il tipo di nucleo, nei tre avvolgimenti primari A, B, C e nei tre avvolgimenti secondari a, b, c vengono indotte rispettivamente due terne di f.e.m., che in condizioni di normale funzionamento sono simmetriche. In accordo con quanto visto per il trasformatore monofase, le f.e.m. dei due avvolgimenti primario e secondario posti su di una stessa colonna del nucleo (A-a, B-b, C-c) sono tra loro in fase.

I tre avvolgimenti primari (secondari) possono essere collegati tra loro in diversi modi, per realizzare le tre fasi interne primarie (secondarie). Si possono presentare i seguenti tipi di collegamenti:

- a stella, in cui i terminali con riferimento - dei tre avvolgimenti sono connessi in un unico nodo (come mostra la Fig. 1.3.2.1-a per i primari); tale collegamento è indicato con i simboli Y per i primari e y per i secondari; l'eventuale presenza del neutro viene indicata con il simbolo n
- a triangolo, in cui il terminale con riferimento - di ogni avvolgimento è connesso con quello con riferimento + dell'avvolgimento consecutivo nella sequenza ciclica delle fasi (come mostra la Fig. 1.3.2.1-b per i primari); tale collegamento è indicato con i simboli D per i primari e d per i secondari (in alternativa si usa anche il simbolo Δ);
- a zig-zag, in cui ogni avvolgimento è suddiviso in due parti uguali e ciascuna fase interna è ottenuta connettendo in serie rovesciata due parti di due avvolgimenti; questo tipo di collegamento, meno frequente, non verrà trattato nel seguito.

In ogni tipo di collegamento i due terminali di ciascun avvolgimento possono essere scambiati, rovesciando così le f.e.m. della corrispondente terna. Il collegamento a stella è dotato di centro stella e ad esso si deve fare ricorso se si vuole disporre del collegamento di neutro.

Il collegamento dei primari può essere uguale o diverso dal collegamento dei secondari. Alimentando i primari con una terna simmetrica di tensioni di linea si ottiene una terna simmetrica di tensioni di linea secondarie, in generale sfasate rispetto alle corrispondenti primarie. Il trasformatore trifase risulta pertanto caratterizzato, oltre che dai parametri già illustrati per i trasformatori monofasi, anche dallo *spostamento angolare*, che è lo sfasamento in ritardo della tensione secondaria (di fase o di linea) rispetto alla corrispondente tensione primaria (l'angolo di rotazione antioraria con cui \bar{V}_{ab} o \bar{E}_a si sovrappongono rispettivamente a \bar{V}_{AB} o \bar{E}_A). Gli spostamenti angolari che si ottengono dalle diverse combinazioni di collegamenti primari e secondari sono sempre multipli di 30° .

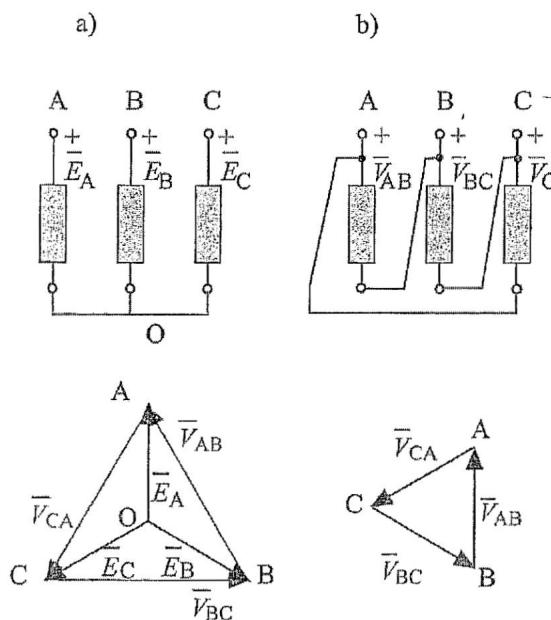


Figura 1.3.2.1 Esempio di avvolgimenti collegati a stella e di avvolgimenti collegati a triangolo.

Tale spostamento angolare viene identificato dal *gruppo di collegamento*, che è il numero intero ottenuto dividendo lo spostamento angolare per 30° . Di fatto il gruppo corrisponde all'ora indicata sul quadrante di un orologio dal fasore E_a , quando il fasore \bar{E}_A è posto sulle ore 12. Con i diversi collegamenti si possono ottenere tutti i gruppi compresi tra 0 e 11 con esclusione dei gruppi 3 e 9; tra essi vengono tuttavia utilizzati quasi esclusivamente trasformatori appartenenti ai gruppi 0, 5, 6 e 11.

Esempi

Collegamento stella-stella. In questo collegamento (Fig. 1.3.2.2) le tensioni di fase primarie e secondarie corrispondenti risultano in fase. Il trasformatore appartiene pertanto al gruppo 0 (Simbolo Yy0).

Il rapporto di trasformazione, definito come il rapporto tra i valori efficaci delle tensioni di fase (o di linea) primarie e secondarie, è uguale al rapporto spire:

$$n = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.3.2.1)$$

Invertendo le connessioni dei secondari, le loro tensioni concatenate risultano in opposizione di fase rispetto alle corrispondenti tensioni concatenate primarie. Il trasformatore appartiene pertanto al gruppo 6 (Simbolo Yy6).

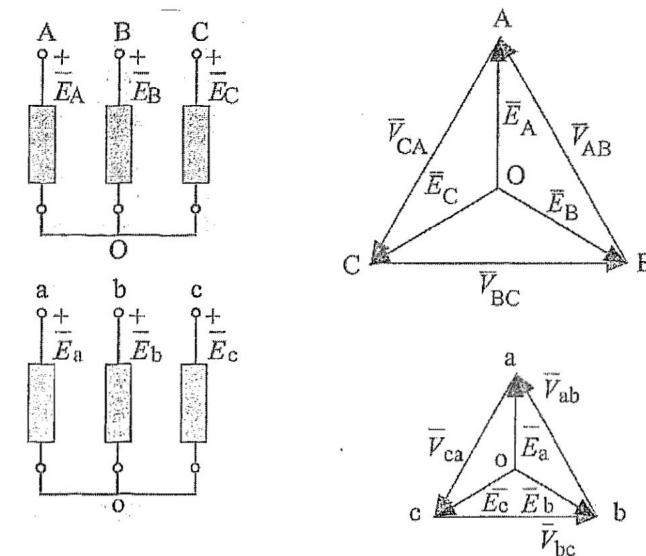


Figura 1.3.2.2

Collegamento triangolo - stella con neutro. In questo collegamento (Fig. 1.3.2.3) le tensioni di fase secondarie sono in ritardo di 330° rispetto alle corrispondenti primarie. Il trasformatore appartiene al gruppo 11 (Simbolo Ydn11).

Il rapporto di trasformazione, definito come il rapporto tra i valori efficaci delle tensioni di fase (o di linea) primarie e secondarie, non è più uguale al rapporto spire. Infatti:

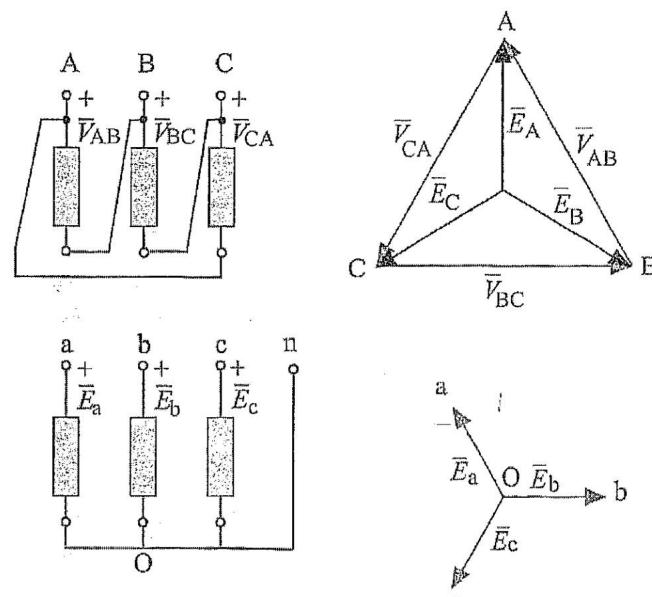


Figura 1.3.2.3

$$E_A = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} E_a : \quad (1.3.2.2)$$

per cui n è dato da:

$$n = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2} \quad (1.3.2.3)$$

Se il collegamento viene realizzato con secondari invertiti, le tensioni di fase secondarie risultano in opposizione di fase rispetto al caso precedente e il trasformatore appartiene al gruppo 5 (Simbolo Ydn5).

1.3.3 Circuito equivalente del trasformatore trifase

Si è visto in § 1.2.8 che il comportamento ai terminali di un trasformatore monofase può essere descritto mediante un circuito equivalente che realizza un doppio bipolo. Analogamente un trasformatore trifase può venire rappresentato mediante un circuito equivalente costituito da tre doppi bipoli identici, dei tipi utilizzati per il trasformatore monofase, le tre porte primarie e secondarie dei quali sono connesse a stella, indipendentemente dall'effettivo collegamento degli avvolgimenti primari e secondari del trasformatore. Facendo ad esempio ricorso al circuito sem-

plificato di Figura 1.2.8.1, si ottiene il circuito equivalente del trasformatore trifase di Figura 1.3.3.1; altri circuiti equivalenti del trasformatore trifase si possono ottenere utilizzando altri circuiti equivalenti del trasformatore monofase, oppure anche applicando al circuito di Figura 1.3.3.1 l'usuale trasferimento di impedenza.

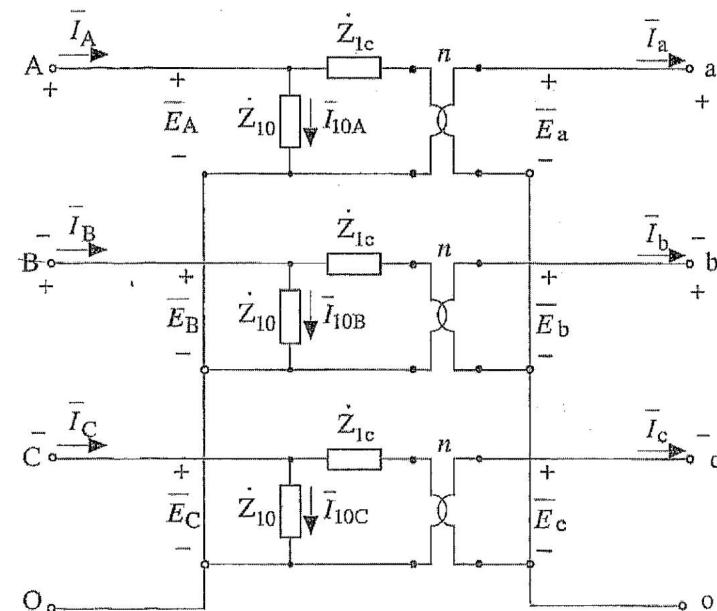


Figura 1.3.3.1

Se il trasformatore trifase è alimentato a primario da una terna simmetrica di tensioni concatenate ed alimenta a secondario un carico equilibrato, tutte le sue terne di tensione e corrente sono simmetriche, e si può fare riferimento ad uno solo dei tre circuiti monofasi: si ottiene così il *circuito equivalente monofase*. In esso tensioni primaria e secondaria sono pari alle tensioni stellate; potenza nominale, potenza attiva erogata e perdite nel ferro e nel rame sono pari ad un terzo delle corrispondenti potenze P_n , P_u , P_{Fe} , P_{Cu} del trasformatore trifase.

1.3.4 Dati di targa

I dati di targa di un trasformatore trifase sono analoghi a quelli di uno monofase (un esempio è mostrato in Fig. 1.3.4.1). Oltre ai dati già illustrati per quest'ultimo la targa riporta anche:

Elettromeccanica Friulana	
Palazzolo dello Stella (Udine) CE	
TRASFORMATORE TRIFASE N. 5671	
ampere	2099
collegamento	Δ / Y
P_n	500 kVA
V_{1n}	10 kV
V_{2n}	220 V
peso	1600 kg
servizio	continuo
f_n	50 Hz
gruppo	5
$V_{sc\%}$	4 %
$\cos\phi_{sc}$	0,2
tipico	O.N.A.N.

Figura 1.3.4.1

- il tipo di collegamento a primario e a secondario;
- il gruppo di appartenenza.

1.3.4.1 Simboli impiantistici del trasformatore trifase

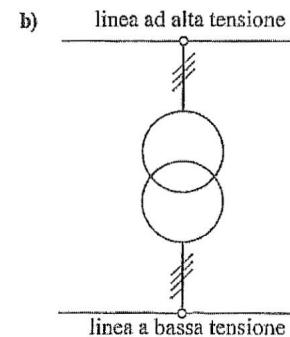
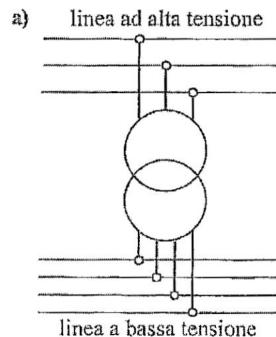


Figura 1.3.4.2

Negli schemi impiantistici il trasformatore trifase viene in genere rappresentato con i simboli di Figura 1.3.4.2: il primo è utilizzato negli schemi trifilari o quadrifilari, che mostrano tutti i conduttori, sia primari che secondari (e i relativi terminali); il secondo trova impiego negli *schemi unifilari*, ove le linee elettriche primaria e secondaria vengono rappresentate ciascuna da una sola linea grafica (i trattini trasversali indicano il numero dei conduttori di fase; il mezzo trattino la presenza del neutro).

1.3.5 Parallello di trasformatori trifasi

Anche negli impianti trifasi è spesso conveniente alimentare una linea di utilizzazione per mezzo di più trasformatori trifasi in parallelo. Pure in questo caso il funzionamento ottimale in parallelo avviene quando sono verificate le condizioni illustrate al § 1.2.8.2 per i trasformatori monofasi, le quali comportano che i trasformatori abbiano:

- tensioni secondarie a vuoto uguali; pertanto essi devono avere rapporti di trasformazione uguali e, affinché le tensioni secondarie siano in fase, devono appartenere al medesimo gruppo.
- triangoli di cortocircuito uguali e quindi devono essere uguali tanto le tensioni di cortocircuito che i fattori di potenza di cortocircuito.

1.4 AUTOTRASFORMATORI

1.4.1 Generalità

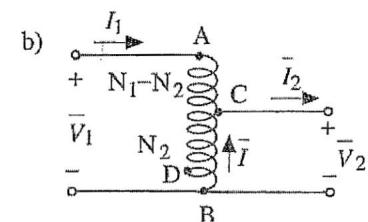
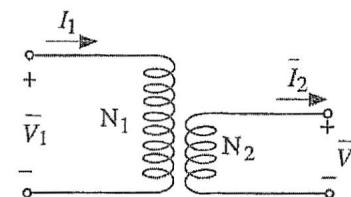


Figura 1.4.1.1

Si consideri un trasformatore monofase con $N_1 > N_2$, nel quale le N_2 spire dell'avvolgimento secondario sono strettamente affiancate ad altrettante spire dell'avvolgimento primario (Fig. 1.4.1.1a). In questo modo ogni spira dell'uno, concatenando lo stesso flusso della corrispondente spira dell'altro, ha la stessa f.e.m. indotta; pertanto il funzionamento del trasformatore non viene alterato se le N_2 coppie di spire secondarie e primarie vengono realizzate con un unico conduttore, in modo che primario e secondario possiedano un tratto di avvolgimento in comune (Fig. 1.4.1.1b). Si ottiene così un *autotrasformatore*.

Trascurando la corrente a vuoto, la corrente del tratto di avvolgimento comune risulta:

$$\bar{I} = \bar{I}_2 - \bar{I}_1 = \bar{I}_2 - \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \bar{I}_2 = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \bar{I}_2 \quad (1.4.1.1)$$

ed ha valore efficace tanto minore quanto più il rapporto di trasformazione n è prossimo all'unità, con conseguente risparmio di sezione e quindi di materiale conduttore.

Quindi gli autotrasformatori generalmente presentano rapporti di trasformazione prossimi all'unità, così non solo sono più economici dei trasformatori convenzionali, ma hanno anche rendimenti maggiori, in conseguenza delle minori perdite nei conduttori. Per elevati rapporti di trasformazione, da un lato tale convenienza si riduce e dall'altro un eventuale guasto di interruzione della porzione comune di avvolgimento (punto D in Fig. 1.4.1.1b) costituirebbe un serio pericolo, perché farebbe salire la tensione tra i morsetti secondari al valore della tensione primaria.

Inoltre un autotrasformatore non realizza l'isolamento elettrico tra circuito primario e circuito secondario e quindi, a differenza di un trasformatore convenzionale, non costituisce elemento utile ai fini della sicurezza degli impianti.

Esistono anche autotrasformatori trifasi, generalmente dotati di nucleo ferromagnetico a tre colonne e avvolgimenti collegati a stella; essi trovano largo impiego nelle reti di distribuzione dell'energia elettrica ad alta tensione, consentendo, con piccole variazioni del numero di spire N_2 , e quindi della tensione, la regolazione dei flussi di potenza lungo le linee.

1.4.2 Variac

L'autotrasformatore trova impiego anche nel caso in cui si voglia ottenere una tensione di valore efficace V_2 , variabile a piacere tra zero e un valore massimo. Si realizza in tal caso un avvolgimento primario uniformemente distribuito lungo un nucleo toroidale, come illustrato in Figura 1.4.1.2 sul quale può essere spostato il punto di connessione C per mezzo di un contatto mobile, in modo da variare il numero delle spire N_2 costituenti il secondario. Questo autotrasformatore, chiamato commercialmente *Variac*, è spesso utilizzato per comodità nei laboratori di prova, ma, come detto sopra, non garantisce alcun isolamento tra la rete di alimentazione e il dispositivo in prova.

Inoltre, poiché il contatto mobile permette di ottenere rapporti di trasformazione anche molto elevati, se il Variac è alimentato per errore al secondario, ai terminali del primario può presentarsi una tensione molto elevata e dunque molto pericolosa.

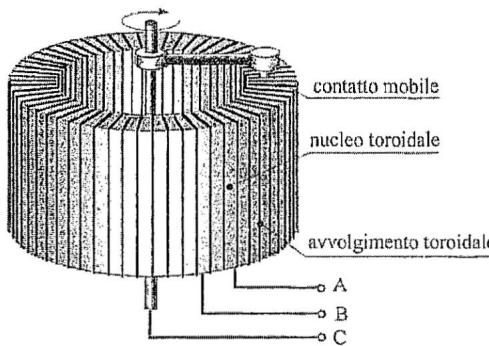


Figura 1.4.1.2



Figura 1.4.1.3 Variac 220 V 10 A.

Capitolo 2

CONVERTITORI STATICI

2.1 GENERALITÀ

Numerosi dispositivi utilizzatori richiedono un'alimentazione con tensione a polarità costante nel tempo (anche se l'ampiezza può essere variabile), e assorbono una corrente unidirezionale (con ampiezza che può ovviamente essere variabile). Dato che la maggior parte dei sistemi di produzione, trasmissione e distribuzione funzionano in regime sinusoidale (monofase o trifase), risulta necessario interporre tra rete di alimentazione ed utilizzatore un dispositivo (chiamato *convertitore* o *raddrizzatore*), in grado di effettuare la *conversione da alternata a continua*, che spesso viene indicata con la sigla AC/DC (alternating current - direct current).

In molti altri casi è necessario effettuare il processo opposto e convertire una tensione continua in una tensione alternata (approssimativamente sinusoidale, monofase o trifase), in modo da alimentare un utilizzatore funzionante in corrente alternata. In questo caso viene interposto tra rete di alimentazione ed utilizzatore un dispositivo (chiamato *invertitore* o più spesso *inverter*), in grado di effettuare la *conversione da continua ad alternata*, che spesso viene indicata con la sigla DC/AC (direct current - alternating current).

In altri casi è necessario produrre una tensione o un sistema di tensioni con ampiezza e frequenza diverse da quelle della rete di alimentazione: ciò si ottiene con un dispositivo chiamato *convertitore alternata-alternata* o *convertitore di frequenza*.

Esistono infine dispositivi, chiamati *convertitori continua-continua* (o DC/DC) o più spesso *chopper*, che consentono di eseguire la conversione da una tensione continua d'ingresso ad una tensione continua di diverso valore.

Queste funzioni vengono normalmente svolte mediante *convertitori statici*, che sono dispositivi basati su componenti i quali, pur privi di organi in movimento, si comportano come interruttori elettrici, consentendo o impedendo, in determinate condizioni, il passaggio di corrente nel circuito. A tale scopo si utilizzano componenti elettronici di potenza a semiconduttore, quali diodi, transistor e tiristori.

L'impiego dei dispositivi sopra descritti è tuttora in forte aumento. Essi vengono ad esempio utilizzati per:

- azionamenti con motori alimentati in corrente continua (trazione ferroviaria, tram, metropolitane, funivie, laminatoi, mulini, ecc.);
- azionamenti con motori sincroni brushless;
- azionamenti con motori asincroni a velocità variabile;

- eccitazione degli alternatori;
- impianti chimici (elettrolisi, elettrodepositazione, ecc.);
- generatori per garantire la continuità della fornitura di energia elettrica anche in caso di guasto della rete: gruppi di continuità statici;
- trattamenti termici a media ed alta frequenza (riscaldamento ad induzione, tempra, ecc.);
- linee di trasmissione dell'energia in corrente continua;
- stabilizzazione delle reti trifasi di trasmissione dell'energia.

2.1.1 Componenti dei convertitori

Il componente più semplice è il diodo, un bipolo non lineare già illustrato nel Capitolo 6 del primo volume. Ma i convertitori statici possono essere realizzati anche con componenti più complessi del diodo, dotati di un terzo terminale di comando oltre ai due terminali principali: essi si comportano come interruttori nei quali la commutazione dipende non solo dal segno di tensione e corrente ai terminali principali ma anche dalla corrente del terminale di comando o dalla sua tensione rispetto agli altri due.

2.1.1.1 Diodo ideale

Nel Capitolo 6 del Vol. 1 si è visto che il *diodo ideale* ha la caratteristica illustrata in Figura 2.1.1.1: la tensione e la resistenza sono nulle quando la corrente assume qualsiasi valore positivo; la corrente è nulla e la resistenza è infinita quando la tensione assume qualsiasi valore negativo; perfatto il diodo ideale si comporta come un *interruttore che commuta* spontaneamente nelle seguenti condizioni:

- chiude non appena la tensione da valori negativi si annulla;
- apre non appena la corrente da valori positivi si annulla.

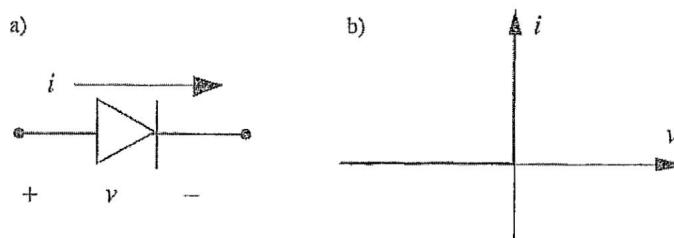


Figura 2.1.1.1

2.1.1.2 Diodo a semiconduttore

Nel Capitolo 6 del Vol. 1 si è visto che il *diodo a semiconduttore* (o *a giunzione*, o *pn*), costituito da un elemento semiconduttore tetravalente (in genere silicio, con quattro elettroni esterni legati al reticolo cristallino), modificato inserendo atomi di elementi trivalenti e pentavalenti in due zone contigue (Fig. 2.1.1.2a). Tale processo viene chiamato *droggaggio* rispettivamente di tipo P (elementi trivalenti) e di

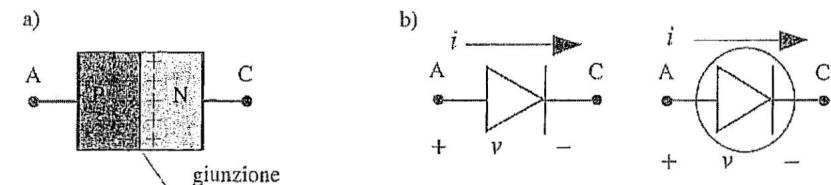


Figura 2.1.1.2

tipo N (elementi pentavalenti). Le zone di tipo P e N sono accessibili tramite due terminali indicati rispettivamente con A (*anodo*) e C (*catodo*); il dispositivo risultante viene rappresentato con uno dei simboli di Figura 2.1.1.2b.

Il droggaggio non modifica la neutralità elettrica del materiale, ma provoca nella zona di tipo N un addensamento di elettroni liberi (ovvero un esubero di elettroni di legame); invece nella zona tipo P si crea una carenza di elettroni di legame, che equivale ad un esubero di cariche positive fittizie dette *lacune*. Elettroni liberi e lacune si spostano verso la regione di confine tra zona N e zona P, detta *giunzione*, e tendono a diffondere reciprocamente nella zona adiacente. In questo modo si formano due concentrazioni di cariche di segno opposto ai due lati della giunzione, le quali generano un campo coulombiano che tende a muovere le cariche dei due segni in verso opposto a quello di diffusione. Si raggiunge così uno stato di equilibrio dinamico, in cui un uguale numero di cariche dello stesso segno attraversa la giunzione in direzioni opposte.

Se si applica una tensione $v > 0$, si riduce il campo coulombiano nella giunzione, mentre le cariche di entrambi i segni addensate ai lati della giunzione sono attratte verso i terminali; così altre cariche possono attraversare la giunzione stessa, dando luogo ad un movimento continuo di cariche, ossia ad una corrente.

Se invece si applica una tensione $v < 0$, aumenta il campo coulombiano e aumentano pure le cariche di entrambi i segni che si trovano ai lati della giunzione; si crea così un nuovo equilibrio dinamico nel quale cariche di ciascun segno, pur attraversando la giunzione in entrambi i versi, si bilanciano in modo che la corrente complessiva risulta nulla.

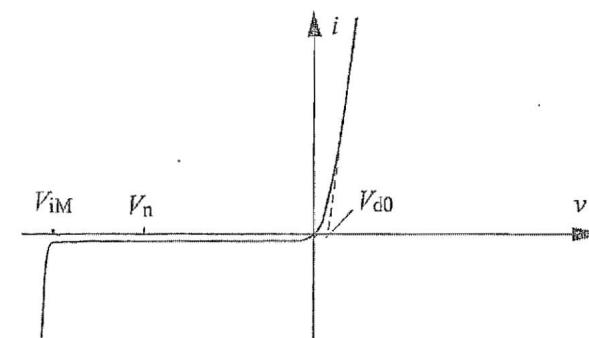


Figura 2.1.1.3

Pertanto il diodo a giunzione approssima il comportamento del diodo ideale; la sua caratteristica esterna è illustrata in Figura 2.1.1.3: essa presenta tensione positiva non nulla (*tensione diretta*) con corrente positiva (*corrente diretta*); in tale zona si dice che il diodo è in *conduzione* e l'andamento di v in funzione di i può essere approssimato nel primo quadrante dalla retta tratteggiata, che ha equazione:

$$v = V_{d0} + R_d i, \quad (2.1.1.1)$$

dove, tipicamente, $V_{d0} = 0,3 \div 0,5$ V è denominata *tensione di polarizzazione*, mentre R_d (resistenza differenziale del diodo) dipende dalle dimensioni del diodo ed è dell'ordine del m Ω ; il valore massimo di i costituisce la corrente nominale I_n ; nei *diodi di potenza* I_n può arrivare a parecchi kA.

Con tensione v negativa (*inversa*), si ha una debole corrente i negativa (*inversa*), tipicamente $10^{-6} \div 10^{-7}$ volte la corrente nominale, in questo caso si dice che il diodo è in *interdizione*. Se la tensione inversa supera un dato valore massimo, V_{IM} , che costituisce la tensione di rottura del diodo, si ha una scarica, ossia un brusco aumento di corrente inversa, normalmente distruttiva (Fig. 2.1.1.3); la *tensione nominale* di un diodo V_n deve sempre essere inferiore a V_{IM} ; nei diodi di potenza (Fig. 2.1.1.4) V_n può arrivare a parecchi kV.

Pertanto esiste un intervallo di tensioni e correnti entro il quale il dispositivo si comporta quasi come un diodo ideale, avendo caratteristica che si discosta di poco da quella di quest'ultimo.

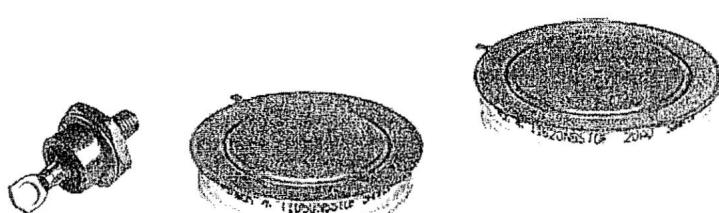


Figura 2.1.1.4 Diodi di elevata potenza.

2.1.1.3 Transistor bipolar a giunzione - BJT

Il *transistor a giunzione*, o BJT (Bipolar Junction Transistor) è un elemento di silicio ove sono create tre zone con diverso droggaggio; il transistor di tipo NPN presenta (Fig. 2.1.1.5a): una zona con debole droggaggio N (*collettore*, indicato con C); una di piccolissimo spessore con droggaggio P (*base*, indicata con B); una con forte droggaggio N (*emettitore*, indicato con E). Il dispositivo viene rappresentato con i simboli di Figura 2.1.1.5b. Nel transistor di tipo PNP i drogaggi delle tre zone sono invertiti.

Per descriverne il comportamento può essere considerato lo schema equivalente di Figura 2.1.1.5c, costituito da due diodi in serie contrapposta. Quando si

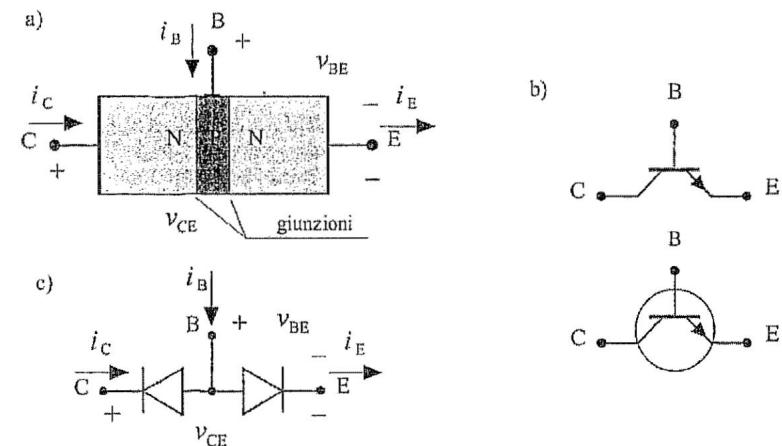


Figura 2.1.1.5

applica tra collettore ed emettitore la tensione $v_{CE} > 0$ con la base aperta ($i_B = 0$), il diodo di sinistra è interdetto e le correnti di collettore e di emettitore sono nulle. Quando invece, sempre con $v_{CE} > 0$, si applica tra base ed emettitore la tensione $v_{BE} > 0$ si produce una corrente $i_B > 0$ da B a E, vale a dire elettroni che si muovono da E a B; se i_B è abbastanza elevata, avendo la zona P spessore inferiore al loro libero cammino medio, questi arrivano in prossimità della giunzione C-B e vengono accelerati dalla sua differenza di potenziale verso la zona C: così il transistor può condurre una corrente tra C ed E, con $i_E = i_C + i_B \approx i_C > 0$.

Con $v_{CE} < 0$ il transistor rimane in *interdizione* ($i_C = 0$) per qualsiasi valore di i_B , purché $|v_{CE}|$ non sia maggiore di alcuni volt; altrimenti si manifesta una scarica, con corrente $i_C < 0$ intensa e distruttiva¹.

Pertanto il transistor presenta le caratteristiche esterne qualitativamente illustrate in Figura 2.1.1.6, grazie alle quali esso trova vastissimo impiego nei circuiti elettronici. Interessa qui il suo utilizzo nelle zone di saturazione e interdizione: a partire dallo stato di interdizione, con $v_{CE} > 0$, non appena si applica $i_B = i_{Bs}$, esso si porta in saturazione, ossia *commuta* in conduzione, essendo $i_C > 0$ con v_{CE} modesta e poco dipendente da i_C ; non appena i_B viene ridotta a zero il transistor *commuta* nuovamente, tornando allo stato di interdizione in modo controllato.

Pertanto il dispositivo tra C ed E si comporta come un interruttore unidirezionale ($i_C > 0$) che può essere chiuso e aperto agendo sulle grandezze di controllo v_{BE} e i_B , tipicamente molto minori dei valori nominali di v_{CE} diretta (in interdizione) e $i_C \approx i_E$ diretta (in conduzione).

¹ Tale comportamento non simmetrico tra collettore ed emettitore è dovuto alla non simmetria del transistor, dovuta ai diversi drogaggi delle due zone N.

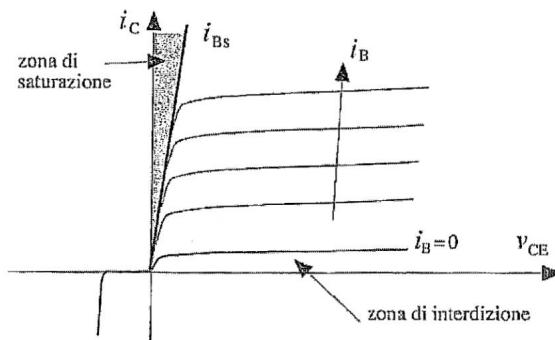


Figura 2.1.1.6

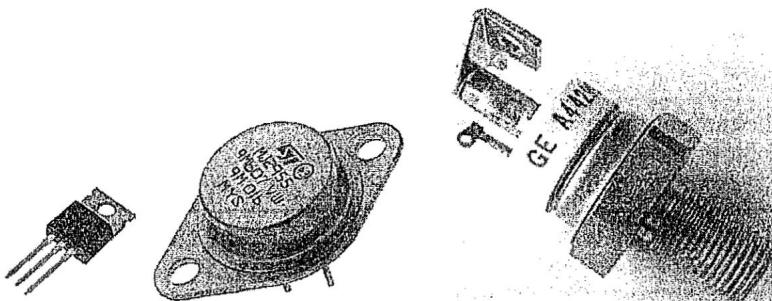


Figura 2.1.1.7 Transistor di potenza.

La Figura 2.1.1.7 mostra alcuni transistori di potenza (con correnti fino a qualche decina di ampère).

2.1.1.4 IGBT

LIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) è un dispositivo che alle proprietà del transistor BJT unisce ulteriori due vantaggi:

- bassissima corrente al terminale di controllo (chiamato gate), per cui la commutazione avviene con la sola applicazione di tensione tra gate ed emettitore (si dice che il dispositivo è controllato in tensione);
- elevata velocità di commutazione, che ne consente l'uso fino a frequenze dell'ordine di 10 kHz.

Viene realizzato per potenze nominali (prodotto di tensione nominale in interdizione per corrente nominale in conduzione) che vanno dal kVA alle centinaia di kVA.

2.1.1.5 Tiristore – SCR

Il tiristore, denominato anche SCR (Silicon Controlled Rectifier) è un dispositivo a quattro zone con diverso drogaggio (Fig. 2.1.1.8a). Le zone P1 e N1 sono di spessore maggiore e presentano drogaggio più debole di P2 e N2, che hanno spessori inferiori al libero cammino medio delle cariche libere. Tre zone sono accessibili per mezzo di terminali che sono indicati con A (anodo), C (catodo) e G (gate); il dispositivo risultante si rappresenta con i simboli di Figura 2.1.1.8b.

Il comportamento può essere descritto per mezzo dello schema equivalente di Figura 2.1.1.8c. Si assuma anzitutto che G sia aperto, $i_G = 0$. In questa condizione, quando tra A e C è applicata una tensione inversa, $v_{AC} < 0$, i due diodi esterni sono interdetti e l'SCR non può condurre (correnti di anodo e catodo nulle, $i_A = i_C = 0$); quando è applicata una tensione diretta, $v_{AC} > 0$, è interdetto il diodo centrale e l'SCR ancora non può condurre.

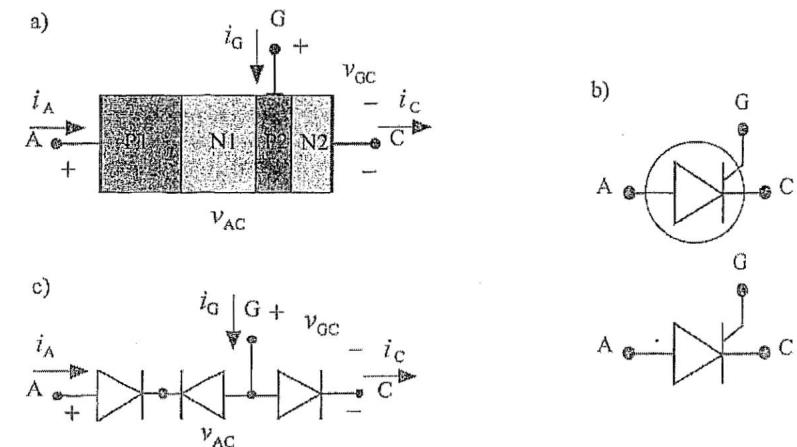


Figura 2.1.1.8

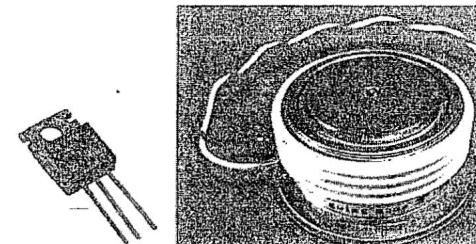


Figura 2.1.1.9 SCR di piccola ed elevata potenza.

Se invece, con $v_{AC} > 0$, si applica un breve impulso di corrente al gate, $i_G > 0$ (corrente di latching ≈ 100 mA), il diodo centrale commuta in conduzione (come nel caso del transistor BJT), con v_{AC} dell'ordine di 1 V e $i_A > 0$; l'SCR rimane in tale stato anche quando i_G si annulla, purché i_A sia superiore ad un valore minimo (corrente di holding ≈ 100 mA); non appena i_A scende sotto tale limite, esso commuta nuovamente tornando in interdizione. Se l'impulso $i_G(t) > 0$ viene applicato con $v_{AC} < 0$ l'SCR resta interdetto.

Pertanto il dispositivo tra anodo e catodo si comporta come un interruttore unidirezionale ($i_C = i_A > 0$) che può essere chiuso applicando impulsi di v_{GC} e i_G (grandezze di controllo), con ampiezze tipicamente molto minori dei valori nominali di v_{AC} in interdizione e $i_A \approx i_C$ in conduzione. L'apertura avviene solo quando la corrente $i_A \approx i_C$ diviene nulla. In altre parole, l'SCR si comporta come un diodo, in cui è possibile ritardare l'istante di entrata in conduzione; per questo viene chiamato anche diodo controllato.

SCR di piccola ed elevata potenza sono mostrati in Figura 2.1.1.9.

2.1.1.6 Interruttori elettronici e fenomeni di commutazione dei componenti reali

Il diodo a giunzione, il transistor bipolare a giunzione e l'SCR possono essere utilizzati come *interruttori elettronici*, o *interruttori a semiconduttore*, ciascuno con caratteristiche specifiche.

Per tutti, il normale funzionamento in interdizione richiede che la tensione inversa non superi mai la tensione nominale V_n , pena la distruzione del componente. Così pure il normale funzionamento in conduzione richiede che la corrente diretta non superi mai la corrente nominale I_n , tranne che per intervalli di tempo molto brevi, con andamenti e modalità che normalmente vengono specificati dal costruttore, altrimenti il componente viene parimenti distrutto.

Caratteristiche del tipo di Figura 2.1.1.3 e 2.1.1.6 descrivono in modo abbastanza corretto il funzionamento dei vari componenti in regime sia stazionario che dinamico. Si devono tuttavia tener presenti particolari fenomeni che avvengono durante la commutazione, cioè nel passaggio da conduzione ad interdizione e viceversa.

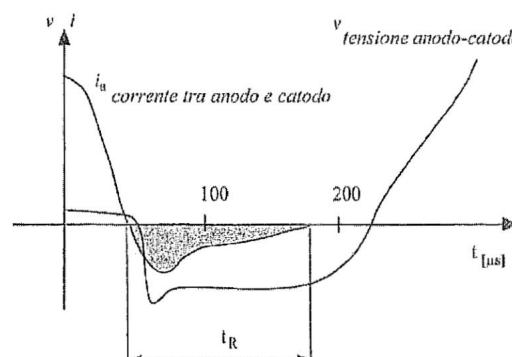


Figura 2.1.1.10

Ad esempio l'entrata in conduzione di un tiristore richiede circa 10 μs. Invece, alla fine della fase di conduzione, l'andamento della corrente nel diodo o nel tiristore è quello illustrato in Figura 2.1.1.10. In tal caso, l'annullamento della corrente non è sufficiente per lo spegnimento del componente; la carica in eccesso, presente nelle varie zone del componente e legata alla conduzione, deve essere rimossa perché il componente possa sopportare la riapplicazione di una tensione diretta. Questo avviene mediante il passaggio di una corrente inversa, per cui la corrente allo spegnimento ha l'andamento di Figura 2.1.1.10. Il componente viene portato in interdizione solo dopo che la carica Q_R data da:

$$Q_R = \int_{t_R} i_a dt \quad (2.1.1.2)$$

ha superato la carica in eccesso da rimuovere. Il tempo necessario perché questo fenomeno abbia luogo è di alcune centinaia di microsecondi. L'area tratteggiata in Figura 2.1.1.10 è proporzionale al valore di Q_R .

2.2 CONVERSIONE AC/DC: RADDRIZZATORI

La conversione alternata/continua consiste nel trasformare tensioni e correnti alternate in tensioni e correnti unidirezionali. I circuiti più semplici, che impiegano soltanto diodi, consentono di ottenere tensioni e correnti unidirezionali di valore non regolabile; si parla allora semplicemente di *conversione AC/DC* o *raddrizzamento*.

Circuiti più complessi, che utilizzano ad esempio tiristori, permettono di ottenere tensioni e correnti di valore regolabile entro un certo campo; in questo caso si parla di *conversione controllata AC/DC* o *raddrizzamento controllato*.

2.2.1 Raddrizzatore monofase

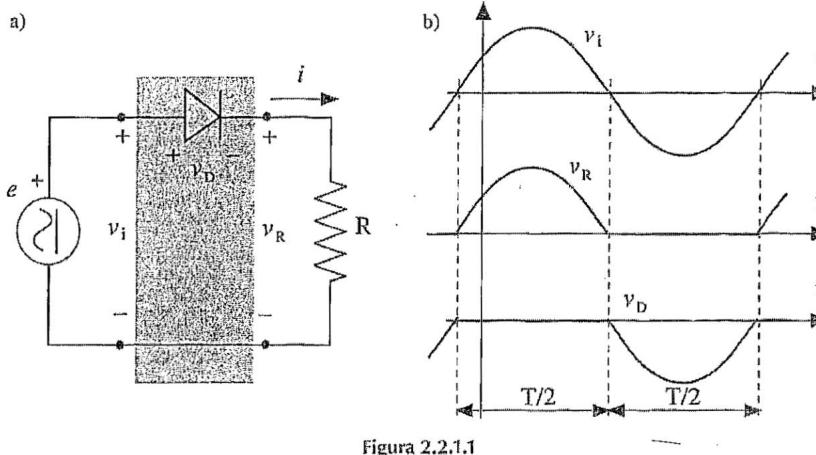
Nel seguito si assume, per semplicità, che la rete di alimentazione sia rappresentabile con un generatore ideale di tensione sinusoidale. Si assume anche che il circuito utilizzatore, ossia il carico, sia rappresentabile con un resistore di resistenza R , anche se esistono applicazioni in cui il carico è di tipo induttivo od ohmico-induttivo.

2.2.1.1 Raddrizzatore ad una semionda

Il più semplice circuito che permette di ottenere una corrente unidirezionale in un resistore R a partire da una tensione sinusoidale è mostrato in Figura 2.2.1.1a, dove $v_D(t)$ è la tensione applicata ai terminali del diodo (supposto ideale), $v_R(t)$ è la tensione sul resistore R ed $i(t)$ la corrente che circola nel semplice anello; la Figura 2.2.1.1b mostra le relative forme d'onda. Essendo in ogni istante:

$$v_i(t) = v_D(t) + v_R(t) \quad (2.2.1.1)$$

quando $v_i(t)$ è positiva, il diodo è in conduzione (la tensione $v_D(t)$ è nulla) e quindi la tensione $v_R(t)$ è uguale a $v_i(t)$; la corrente $i(t)$ è data da $v_i(t)/R$. Se invece $v_i(t)$ è



negativa, il diodo è in interdizione per cui la corrente $i(t)$ è nulla e di conseguenza anche la tensione $v_R(t) = R_i(t)$ è nulla e la tensione $v_D(t)$ è uguale a $v_i(t)$.

Il valore medio della $v_R(t)$, V_m , è pari alla metà del valore medio in una semionda:

$$V_m = \frac{1}{2} \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \right) \approx 0,45 V \quad (2.2.1.2)$$

dove V è il valore efficace della tensione $v_i(t)$ del generatore.

La differenza δ_{VM} tra valore minimo e massimo della $v_R(t)$ (detta *ampiezza dell'ondulazione*) vale:

$$\delta_{VM} = V_M = \sqrt{2} V \quad (2.2.1.3)$$

Il fattore di ondulazione k_0 , definito come:

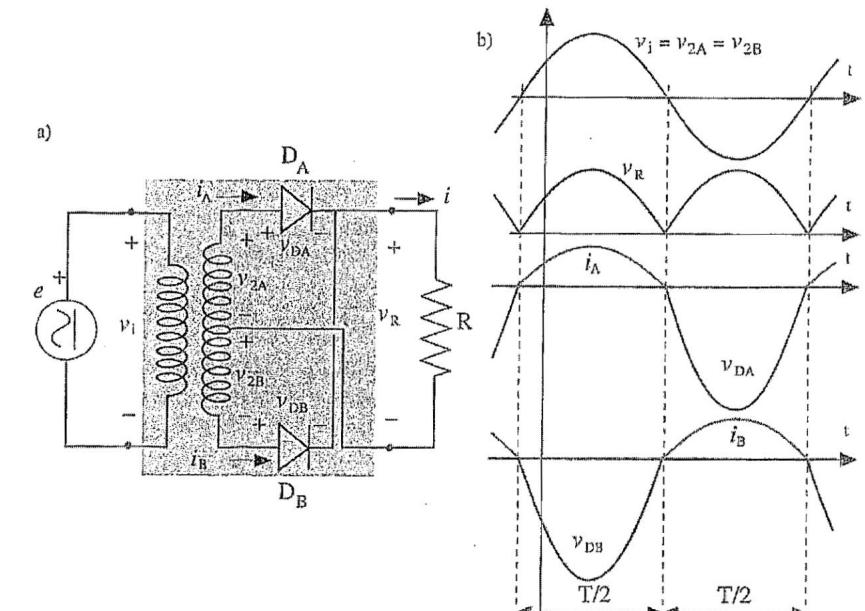
$$k_0 = \frac{1}{2} \frac{\delta_{VM}}{V_m} \quad (2.2.1.4)$$

viene usato come indicatore della qualità del raddrizzamento, tanto migliore quanto più basso risulta k_0 ; nel caso in esame esso è dato da:

$$k_0 = \frac{\pi}{2}. \quad (2.2.1.5)$$

2.2.1.2 Raddrizzatore a due semionde

Raddrizzatore con trasformatore. Il circuito di Figura 2.2.1.2a comprende due diodi uguali ed un trasformatore con secondario a presa centrale: il terzo terminale rende disponibili due tensioni secondarie uguali, che nei calcoli successivi si assumono uguali alla primaria $v_{2A}(t) = v_{2B}(t) = v_i(t)$. La Figura 2.2.1.2b mostra le



forme d'onda di $v_i(t) = v_{2A}(t) = v_{2B}(t)$, di $v_R(t)$, che è proporzionale a $i(t) = v_R(t)/R$ e di $v_{DA}(t)$, $v_{DB}(t)$, $i_A(t)$ e $i_B(t)$.

La seconda legge di Kirchhoff applicata alle due maglie della rete collegata al secondario del trasformatore fornisce:

$$\begin{cases} v_{i(t)} - v_{DA}(t) - v_R(t) = 0 \\ v_{i(t)} + v_{DB}(t) + v_R(t) = 0 \end{cases} \quad (2.2.1.6)$$

Durante la prima semionda la tensione $v_i(t)$ è positiva, il diodo D_A è in conduzione mentre D_B è in interdizione. La tensione $v_{DA}(t)$ è pertanto nulla, la corrente $i_B(t)$ è nulla e la tensione $v_R(t)$ è uguale a $v_i(t)$; si ha quindi:

$$\begin{cases} v_{i(t)} = v_R(t) \\ v_{DB}(t) = -2v_i(t) \end{cases} \quad (2.2.1.7)$$

Durante la seconda semionda $v_i(t)$ è negativa, D_A è in interdizione mentre D_B è in conduzione: sono nulle la tensione $v_{DB}(t)$ e la corrente $i_A(t)$; la tensione $v_R(t)$ è ora uguale a $-v_i(t)$; si ottiene pertanto:

$$\begin{cases} v_{DA}(t) = 2v_i(t) \\ v_R(t) = -v_i(t) \end{cases} \quad (2.2.1.8)$$

La tensione media sul resistore R è data da:

$$V_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V = 0,9 V \quad (2.2.1.9)$$

cioè un valore doppio di quello del caso precedente. Si osservi che i due diodi vanno dimensionati per una tensione doppia rispetto a quella che si ottiene ai terminali del resistore.

Essendo ancora δ_{VM} data dalla 2.2.1.3, k_0 diventa:

$$k_0 = \frac{\pi}{4}. \quad (2.2.1.10)$$

Raddrizzatore con ponte di Graetz. Il circuito precedente richiede l'utilizzazione di un trasformatore con presa centrale, il cui costo è normalmente assai maggiore di quello dei diodi. Le stesse forme d'onda di tensione e corrente nel resistore R si possono ottenere con il circuito di Figura 2.2.1.3, che comprende quattro diodi connnessi nella configurazione nota come *ponte di Graetz monofase*. All'alternarsi della polarità della tensione del generatore entrano in conduzione le coppie di diodi DA-DB'' e DB'-DA'', consentendo così il passaggio di una corrente unidirezionale nel resistore R. Quando $v_i(t)$ è positiva, le tensioni sui diodi DA' e DB'', rispettivamente $v_{DA'}(t)$ e $v_{DB''}(t)$, sono nulle insieme con le correnti $i_{DA'}(t)$ e $i_{DB''}(t)$; la tensione $v_R(t)$ è uguale a $v_i(t)$. Quando la tensione $v_i(t)$ è negativa, diventano nulle le tensioni $v_{DB'}(t)$ e $v_{DA''}(t)$ insieme con le correnti $i_{DA''}(t)$ e $i_{DB'}(t)$; la tensione $v_R(t)$ è uguale a $-v_i(t)$.

Il valore medio V_m e il fattore di ondulazione k_0 sono ancora espressi dalla (2.2.1.9) e dalla (2.2.1.10). Il circuito richiede quattro diodi con tensioni nominali pari alla metà di quelle dei due diodi del circuito con trasformatore.

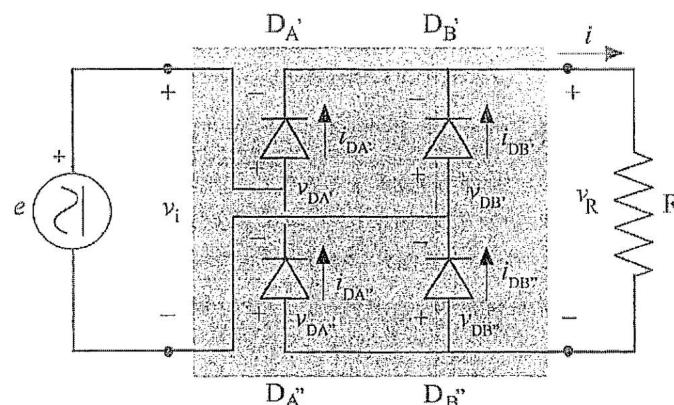


Figura 2.2.1.3

2.2.2 Raddrizzatore trifase

Per ottenere forme d'onda di tensione sul carico con fluttuazioni più contenute è conveniente partire da una rete di alimentazione trifase o polifase. Con particolari accorgimenti una alimentazione trifase può anche essere resa equivalente ad un sistema polifase (esafase o dodecafase), ottenendo una ulteriore riduzione delle fluttuazioni (un numero di fasi ancora più elevato è teoricamente possibile, ma non produce ulteriori vantaggi).

2.2.2.1 Raddrizzatori polifasi a gruppi di commutazione

Disponendo di un'alimentazione polifase con neutro, si possono utilizzare i circuiti a *gruppi di commutazione*, che si ottengono connettendo un diodo al terminale di ogni fase di ingresso.

La Figura 2.2.2.1a illustra il caso trifase ($q = 3$), con una stella di generatori di f.e.m. ideali simmetriche. Le tensioni stellate di alimentazione e la tensione di uscita sono mostrate in Figura 2.2.2.1b; in ogni istante la tensione d'uscita $v_R(t)$ è uguale alla tensione stellata in ingresso che presenta il valore massimo, in quanto solo il diodo corrispondente entra in conduzione. Ad ogni commutazione un diodo entra in interdizione e un altro entra in conduzione; nel periodo T avvengono tante commutazioni quante sono le fasi; nel caso di Figura 2.2.2.1 le commutazioni si succedono a intervalli di $2\pi/q = 2\pi/3$ radianti (120 gradi).

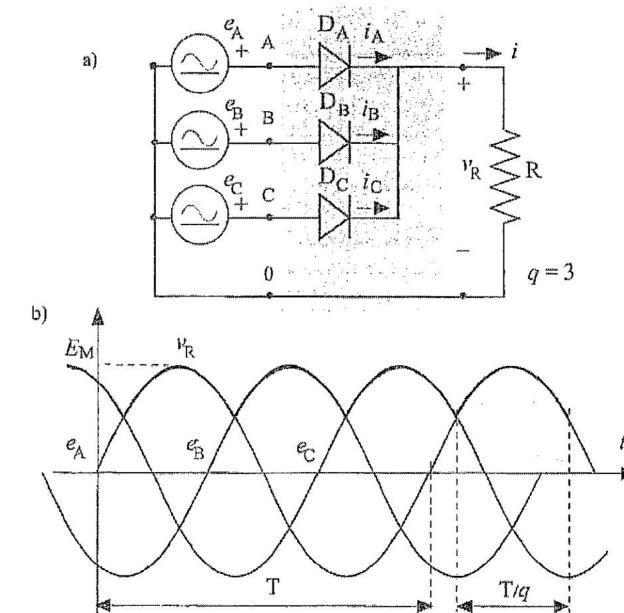


Figura 2.2.2.1

Nel caso generale di un sistema di alimentazione polifase, indicato con q il numero delle fasi del sistema (in genere è $q = 3k$, con k numero naturale), si può ricavare la seguente relazione tra il valore medio V_m della tensione $v_R(t)$ e il valore massimo delle tensioni stellate E_M :

$$V_m = \frac{1}{T/q} \int_{-T/2q}^{T/2q} E_M \cos \frac{2\pi}{T} t dt = E_M \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} \quad (2.2.2.1)$$

L'ampiezza dell'ondulazione δ_{VM} vale:

$$\delta_{VM} = E_M \left(1 - \cos \frac{\pi}{q} \right) \quad (2.2.2.2)$$

mentre il fattore di ondulazione k_0 è dato da:

$$k_0 = \frac{1}{2} \frac{\delta_{VM}}{V_m} = \frac{\pi}{2q} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2q} \quad (2.2.2.3)$$

con $q = 3$ si ottiene $k_0 \approx 0,3$, mentre con $q = 6$ si ottiene $k_0 \approx 0,07$.

2.2.2.2 Raddrizzatori polifasi a ponte di Grætz

Molto più usati dei raddrizzatori a gruppi di commutazione sono quelli basati sul *ponte di Grætz polifase*, che non richiedono il collegamento del neutro; lo schema nel caso trifase è illustrato in Figura 2.2.2.2a, mentre la Figura 2.2.2.2b ne mostra le tensioni di ingresso e di uscita. Le tensioni stellate sono rappresentate con linee nere, mentre le tensioni concatenate sono in grigio.

In ogni istante solamente una coppia di diodi risulta in conduzione e la tensione in uscita risulta uguale alla massima tensione concatenata (differenza tra due stellate in ingresso, $e_i - e_j$). Durante il periodo T avvengono sei commutazioni, in ciascuna delle quali un diodo si porta in conduzione ed uno entra in interdizione; nel periodo T sono ciclicamente in conduzione le sei diverse coppie di diodi e le commutazioni si succedono a intervalli di $2\pi/2q = \pi/3$ radianti elettrici (60 gradi, essendo ancora $q = 3$ le fasi dell'alimentazione). Ad esempio, nell'istante t^* di Figura 2.2.2.2b si ha $v_R = e_A - e_B = v_{AB}$, in quanto la tensione stellata più alta è e_A e la tensione stellata più bassa è e_B , e perciò sono in conduzione i diodi $D_A' - D_B''$.

La tensione risultante ha l'andamento mostrato in Figura 2.2.2.2b, da cui il nome che viene dato spesso al ponte di Grætz trifase: *raddrizzatore a sei impulsi*.

In generale, considerando q il numero delle fasi del sistema di alimentazione, per i ponti di Grætz si hanno le seguenti relazioni tra V_m , E_M , δ_{VM} e k_0 :

$$V_m = \sqrt{3} E_M \frac{2q}{\pi} \sin \frac{\pi}{2q} \quad (2.2.2.4)$$

$$\delta_{VM} = \sqrt{3} E_M \left(1 - \cos \frac{\pi}{2q} \right) \quad (2.2.2.5)$$

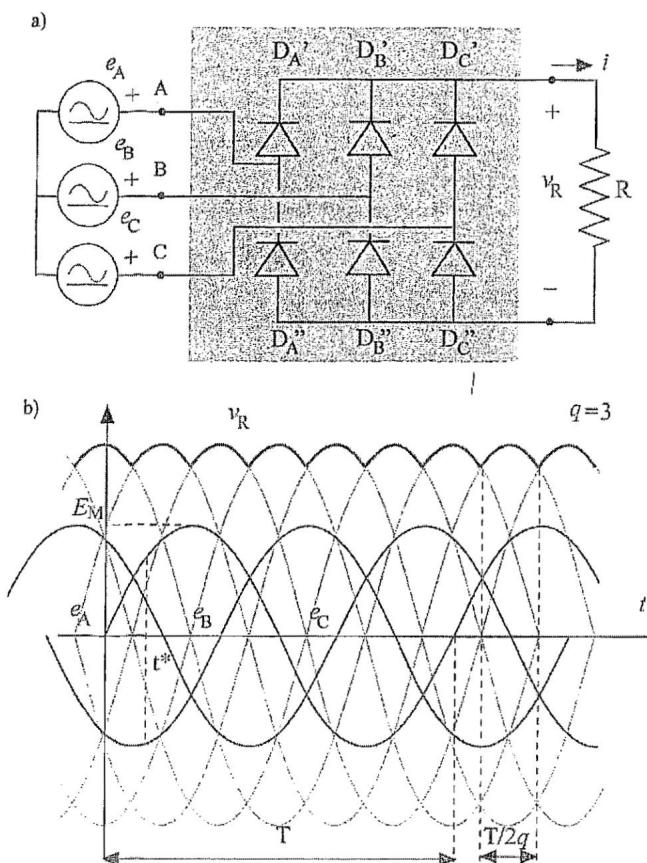


Figura 2.2.2.2

$$k_0 = \frac{1}{2} \frac{\delta_{VM}}{V_m} = \frac{\pi}{4q} \operatorname{tg} \frac{\pi}{4q} \quad (2.2.2.6)$$

Si ottiene pertanto $k_0 \approx 0,07$ con $q = 3$, mentre con $q = 6$ e $q = 12$ si ottengono rispettivamente $k_0 \approx 0,017$ e $k_0 \approx 0,004$.

Raddrizzatore a dodici impulsi ($q = 6$): questo circuito presenta $2q = 12$ commutazioni nel periodo T , che si succedono ogni $2\pi/2q = \pi/6$ radianti elettrici (30 gradi). Esso si può ottenere da un'alimentazione trifase ricorrendo ad un trasformatore trifase con due secondari collegati uno a stella ed uno a triangolo (Fig. 2.2.2.3),

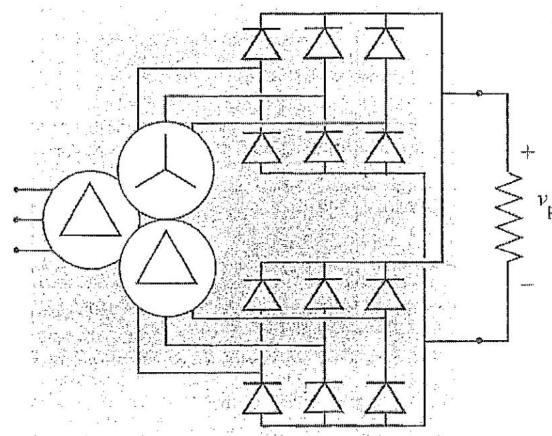


Figura 2.2.2.3

i quali abbiano tensioni concatenate di uguale ampiezza ma reciprocamente sfasate di 30° elettrici; in tal modo, alimentando con ciascuno di essi un ponte di Graetz trifase, si ha una tensione in uscita $v_R(t)$ con dodici impulsi nel periodo T . Il sistema quindi viene anche detto *raddrizzatore a dodici impulsi*.

2.2.3 Raddrizzatore controllato

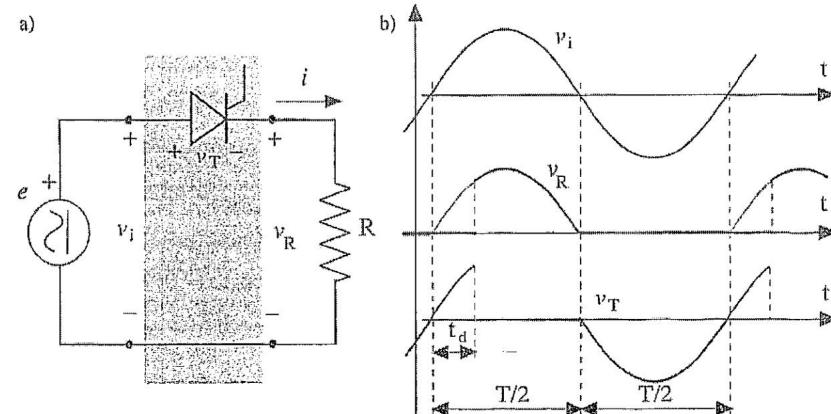


Figura 2.2.3.1

In tutti i circuiti precedenti, con alimentazione sia monofase che trifase, l'andamento temporale della tensione in uscita è rigidamente legato a quello delle tensioni di ingresso. Se in tali circuiti i diodi vengono sostituiti con tiristori, si ottengono *raddrizzatori controllati*, capaci di produrre tensioni in uscita unidirezionali di valore medio regolabile (in linea di principio tra zero ed i valori ottenibili con i circuiti a diodi).

Per illustrare il principio di funzionamento dei convertitori controllati, si può considerare il raddrizzatore a una semionda di Figura 2.2.1.1a, dal quale, sostituendo il diodo con un tiristore, si ottiene il circuito di Figura 2.2.3.1a. Le forme d'onda delle tensione $v_R(t)$ e della corrente $i(t)$ in uscita dipendono dal ritardo temporale t_d di accensione del tiristore rispetto all'istante di commutazione naturale (Fig. 2.2.3.1b); tale ritardo viene più spesso specificato dall'angolo elettrico $\alpha = \omega t_d$ ($0 \leq \alpha < \pi$), al variare del quale variano i valori medi nel periodo di tensione e corrente V_{media} e I_{media} .

Analoghe considerazioni valgono per tutti gli altri raddrizzatori monofasi e polifasi (q fasi) visti in precedenza; in generale l'angolo di ritardo vale $0 \leq \alpha < 2\pi/q$ per $q \geq 2$.

Si ricava per la tensione media in uscita V_{media} la seguente espressione in funzione di α e del valore medio V_m ottenuto usando i diodi (ovvero con ritardo nullo di accensione dei tiristori):

$$\begin{cases} V_{\text{media}} = V_m \frac{1 + \cos \alpha}{2} & \text{per } q < 3 \\ V_{\text{media}} = V_m \cos \alpha & \text{per } q \geq 3 \end{cases} \quad (2.2.3.1)$$

I raddrizzatori controllati richiedono, oltre ai circuiti di potenza qui considerati, anche circuiti di comando dei tiristori, per mezzo dei quali vengono applicati ai gate gli impulsi che li portano in conduzione negli istanti desiderati. Questi circuiti di comando richiedono tensioni dell'ordine di qualche volt e non vengono qui illustrati.

2.2.4 Transitori di commutazione

Nei paragrafi precedenti si sono considerati diodi e tiristori ideali, capaci di commutare istantaneamente. Tuttavia, per quanto esposto nel § 2.1.1.6, la commutazione dei diodi e dei tiristori reali non è istantanea e risultano contemporaneamente in conduzione sia il tiristore (o diodo) che sta entrando in conduzione che quello che sta per interdirsi, nel quale la corrente non si è ancora estinta. Di conseguenza, senza entrare nel dettaglio, si può dire che durante la commutazione i due tiristori (o diodi) cortocircuitano per un breve periodo il sistema di alimentazione, nel quale la corrente è limitata solo dalle impedanze interne (non rappresentate negli schemi semplificati considerati più sopra).

Di conseguenza si manifesta una caduta di tensione che riduce anche la tensione media in uscita V_{media} ; indicando con v l'angolo elettrico corrispondente all'intervento di tempo necessario per la commutazione, essa risulta, per $q \geq 3$:

$$V_{\text{media}} = V_m \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + v)}{2} \quad (2.2.4.1)$$

2.2.5 Filtraggio

A causa delle loro ondulazioni, le tensioni in uscita dai raddrizzatori sono periodiche con frequenza multipla di quella di alimentazione. Sviluppate in serie di Fourier (vedi App.A) esse presentano, oltre al termine costante pari a V_m o V_{media} , numerose armoniche con frequenze multiple della frequenza di alimentazione, le ampiezze delle quali risultano tanto più contenute quanto minori sono le ondulazioni. Esse danno luogo ad armoniche anche nelle correnti, dipendenti dalla natura del carico stesso (ohmico, ohmico-induttivo, capacitivo, ecc.).

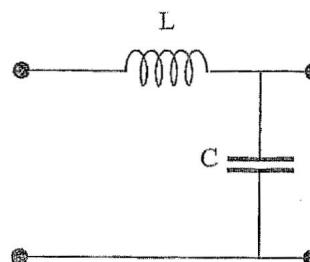


Figura 2.2.5.1

Ciò può produrre effetti deleteri sul carico e in generale è opportuno ridurre le armoniche (sia di tensione che di corrente di uscita) ricorrendo a filtri, che sono doppi bipoli inseriti tra l'uscita del convertitore e il carico, la cui struttura elementare è illustrata in Figura 2.2.5.1. La funzione dell'induttore L è di limitare le ondulazioni di corrente, mentre quella del condensatore C è di limitare le ondulazioni di tensione. Qualora siano necessari filtri particolarmente sofisticati vengono usati componenti non lineari ed anche componenti attivi.

■ 2.3 CONVERSIONE DC/AC: INVERTITORI

2.3.1 Invertitore a ponte

2.3.1.1 Schema di principio

Per capire come si possono ottenere tensioni e correnti alternate approssimativamente sinusoidali con frequenza arbitraria a partire da un'alimentazione in tensione e corrente continua, si può considerare lo schema di principio di Figura 2.3.1.1a. Se all'istante iniziale si chiudono gli interruttori ideali S_A' ed S_B'' lasciando aperti S_A'' ed S_B' , al carico viene applicata la tensione costante V_i e, se il carico è ohmico-induttivo, la corrente ha andamento esponenziale con costante di tempo $\tau = L/R$. Se, dopo un intervallo di tempo $T/2$, si aprono S_A' ed S_B'' e si chiudono S_A'' ed S_B' , la tensione applicata al carico si inverte e la corrente decresce, sempre con andamento esponenziale (Fig. 2.3.1.1b). Se queste due commutazioni vengono ripetute periodicamente a intervalli temporali $T/2$, dopo un tempo pari ad alcune costanti di tempo τ la corrente assume un andamento periodico alternato con periodo T e frequenza $f = 1/T$. Si ottengono quindi tensione $v(t)$ e corrente $i(t)$ in uscita periodiche alternate di uguale frequenza.

Con opportuni circuiti filtro è possibile trasformare queste grandezze alternate in tensioni o correnti sinusoidali o quasi sinusoidali. Infatti tensione e corrente, scomposte in serie di Fourier (vedi App.A), presentano ciascuna valore medio nullo, una prima armonica a frequenza f , detta *fondamentale*, e più armoniche superiori di frequenza multipla nf : i filtri cosiddetti "passa basso" permettono di eliminare, o almeno ridurre, tali armoniche superiori, in modo che rimanga solo

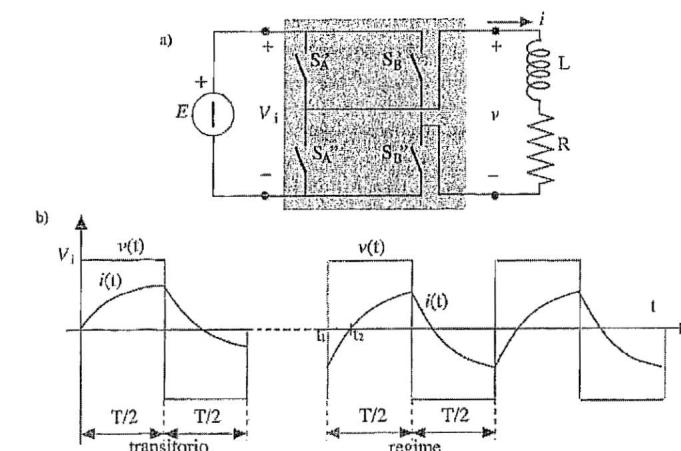


Figura 2.3.1.1

la fondamentale di periodo T. Si ricorre spesso a filtri "sintonizzati" su particolari frequenze o bande di frequenza; vengono anche usati filtri basati su componenti non lineari che consentono una migliore selettività.

La frequenza $f = 1/T$ della tensione e della corrente può essere variata con continuità selezionando l'intervallo $T/2$ di commutazione degli interruttori. L'ampiezza della tensione in uscita $v(t)$ non è invece regolabile, in quanto dipende solo da V_i .

2.3.1.2 Circuito reale

Invertitori reali basati su questo schema di principio possono venire realizzati utilizzando interruttori elettronici basati sui transistor, in quanto questi possono essere portati sia in conduzione che in interdizione in modo comandato. Peraltra, come si vede in Figura 2.3.1.1b, la corrente di ogni interruttore S inverte il segno

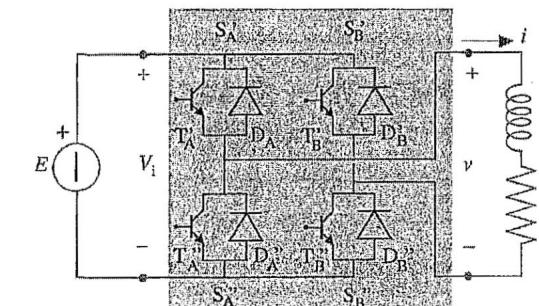


Figura 2.3.1.2

negli intervalli di tempo in cui questo è chiuso, mentre i transistor ammettono solo correnti unidirezionali. Pertanto ogni interruttore S_i viene realizzato ponendo in antiparallelo al *transistor T* un *diodo D* (Fig. 2.3.1.2), detto anche *di libera circolazione* (*free-wheeling*) che ha la funzione di condurre quando il transistor è comandato ma la corrente $i(t)$ dell'interruttore è ancora negativa, come avviene nell'intervallo $[t_1, t_2]$ di Figura 2.3.1.1b.

Per mezzo di un *circuito di comando* (non illustrato) i transistor vengono portati in conduzione o in interdizione a coppie, ad intervalli di tempo pari a $T/2$.

2.3.2 Invertitore a mezzo ponte

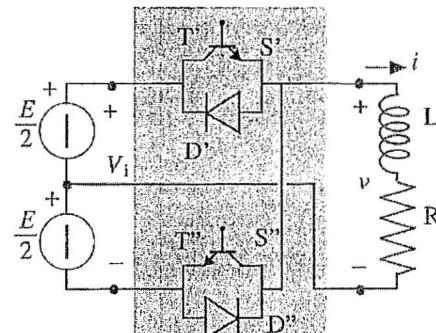


Figura 2.3.2.1

Un altro circuito che permette di ottenere tensioni e correnti alternate da tensioni e correnti continue è indicato in Figura 2.3.2.1. Esso impiega solo due interruttori S' e S'' , ciascuno costituito da un transistor e un diodo in antiparallelo, ma richiede un'alimentazione con punto intermedio accessibile. Le forme d'onda di corrente e tensione sono identiche a quelle viste negli schemi precedenti, con la differenza che l'ampiezza della tensione in uscita è $V_i/2$.

2.3.3 Invertitore trifase

Per ottenere un sistema trifase di tensioni per alimentare un carico trifase, tipicamente ohmico-induttivo equilibrato, si può utilizzare il circuito di Figura 2.3.3.1. Le coppie di gruppi transistor-diodo (tipo $S_i'-S_i''$) vengono comandate con

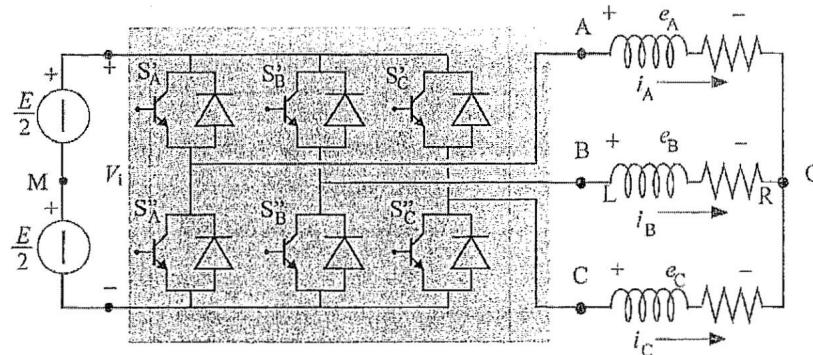


Figura 2.3.3.1

la frequenza voluta; i due elementi della coppia sono alternativamente in conduzione ed in interdizione con un periodo pari a 2π gradi elettrici; le tre coppie S_A , S_B ed S_C sono comandate con uno sfasamento reciproco di $2\pi/3$ gradi elettrici, e quindi le commutazioni delle tre coppie avvengono in sequenza ad uguali intervalli di tempo pari a $T/6$. Con riferimento alle grandezze indicate in Figura 2.3.3.1 valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} e_A = R i_A + L \frac{di_A}{dt} = V_{AM} - V_{OM} \\ e_B = R i_B + L \frac{di_B}{dt} = V_{BM} - V_{OM} \\ e_C = R i_C + L \frac{di_C}{dt} = V_{CM} - V_{OM} \end{cases} \quad (2.3.3.1)$$

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2.3.3.2)$$

Combinando le (2.3.3.1) e la (2.3.3.2) si ottiene:

$$V_{OM} = \frac{V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}}{3} \quad (2.3.3.3)$$

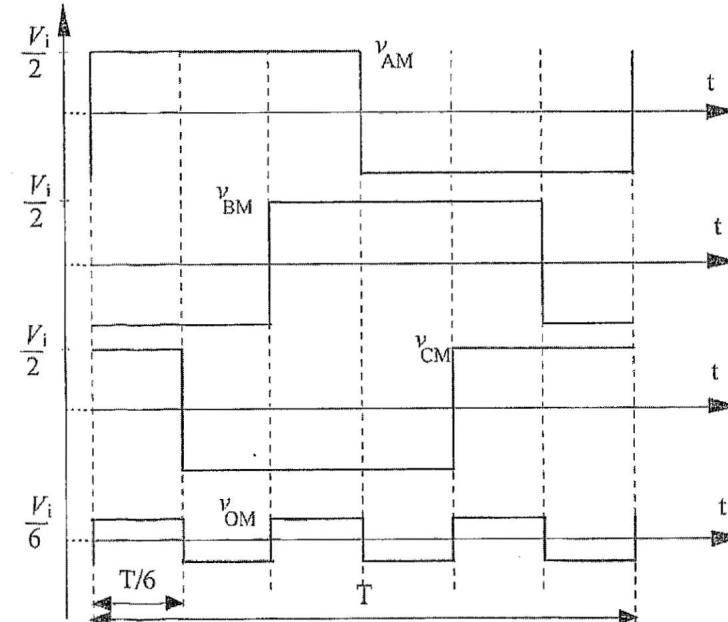


Figura 2.3.3.2

Gli andamenti temporali di v_{AM} , v_{BM} , v_{CM} e, conseguentemente, di v_{OM} , relativi ad un periodo delle tensioni alternate, sono mostrati in Figura 2.3.3.2.

Sempre dalle (2.3.3.1) si possono ricavare gli andamenti delle tensioni e_A , e_B ed e_C e, noti i parametri R ed L del carico, delle relative correnti i_A , i_B ed i_C . A titolo di esempio, in Figura 2.3.3.3 sono riportati gli andamenti di e_A ed i_A ; si può vedere come la forma d'onda della tensione, e quindi quella della corrente, siano più simili ad un'onda sinusoidale di quanto non accada per un invertitore monofase.

In Figura 2.3.3.4 è mostrato un inverter trifase con lo schema elettrico equivalente.

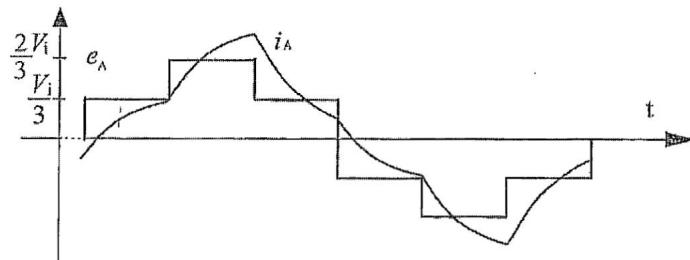


Figura 2.3.3.3

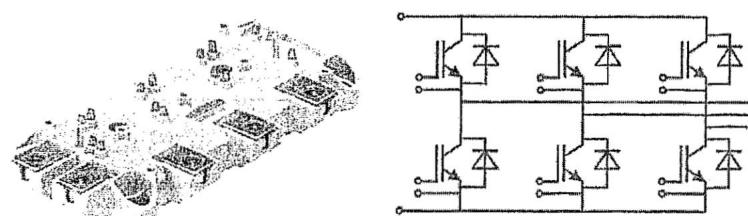


Figura 2.3.3.4

2.3.4 Modulazione di ampiezza

Con tutti gli invertitori monofase e trifase visti in precedenza è possibile variare la frequenza di commutazione dei transistori e quindi la frequenza delle grandezze alternate in uscita. Non è invece possibile variare l'ampiezza della tensione, che è legata al valore della tensione V_i in ingresso. Per produrre tensioni di uscita periodiche di ampiezza regolabile si ricorre a sequenze di comando dei transistori più complesse.

Un esempio di forme d'onda è illustrato in Figura 2.3.4.1, ottenibile con il circuito di Figura 2.3.1.1 grazie ad una più articolata sequenza di comando degli interruttori S_A' - S_B' ed S_A'' - S_B'' . Nell'intervallo $[t_0, t_1]$ vengono chiusi S_A' ed S_B' e aperti S_A'' ed S_B'' . All'istante t_1 gli interruttori vengono commutati e così rimangono fino all'istante t_2 , quando vengono di nuovo commutati (S_A'' ed S_B'' chiusi ed S_A' ed S_B'

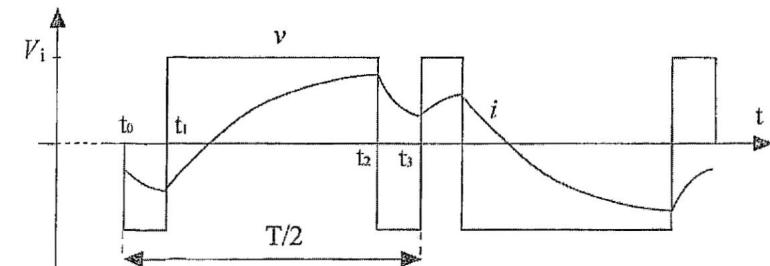


Figura 2.3.4.1

aperti). Cambiando la durata dell'intervallo $[t_1, t_2]$ a parità di semiperiodo $T/2$, si regola il valore medio della tensione in uscita. In linea di principio sono possibili variazioni da 0 a V_i in modo da ottenere l'ampiezza della fondamentale voluta. Se il carico è ohmico-induttivo, la corrente ha l'andamento qualitativamente mostrato in Figura 2.3.4.1.

Le tecniche realmente usate sono più complesse; in particolare si ricorre alla PWM (Pulse Width Modulation), in cui la commutazione degli interruttori avvienne varie centinaia di volte in un semiperiodo $T/2$: ciò permette di ottenere forme d'onda in uscita più prossime a sinusoidi, in quanto dotate di minor contenuto armonico o con armoniche superiori più facili da filtrare.

2.4 CHOPPER

Un chopper (Fig. 2.4.1) permette di convertire un'alimentazione in corrente continua a tensione fissa in una sempre in continua, ma a tensione regolabile.

Esso può essere realizzato in base allo schema di Figura 2.4.2a, che comprende l'interruttore elettronico S (che può essere un transistor o un tiristore) ed il diodo di libera circolazione D . Quando S è chiuso il carico è alimentato a tensione $v(t)=V_i$; quando S viene aperto la corrente $i(t)$ continua a fluire attraverso il diodo D , mentre la tensione del carico è nulla, $v(t) = 0$ (Fig. 2.4.2b); il funzionamento viene ripetuto ciclicamente nel periodo $T = T_1 + T_2$, con un intervallo di conduzione T_1 seguito da un intervallo di interdizione T_2 . Il valore medio della tensione sul carico è:

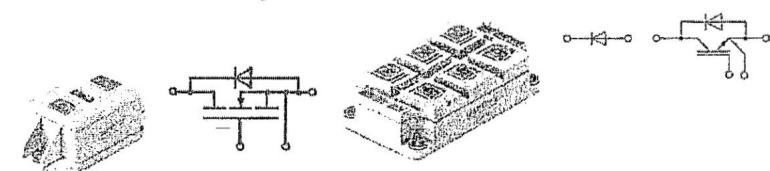


Figura 2.4.1 Moduli costituiti da diodi e transistori di potenza per chopper.

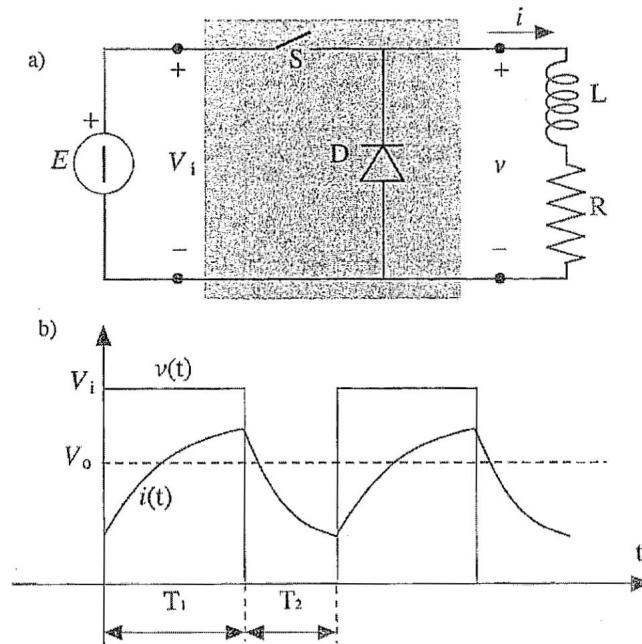


Figura 2.4.2

$$V_0 = V_i \frac{T_1}{T_1 + T_2} = V_i \delta, \quad (2.4.1)$$

ove $\delta = (T_1/T) \leq 1$ è il *fattore di intermittenza* (*duty cycle*). Con tensione di alimentazione costante, agendo sugli intervalli di conduzione ed interdizione è possibile regolare la tensione media sul carico, che risulta $V_0 \leq V_i$. Con carico ohmico-induttivo, la corrente è anch'essa sempre positiva, ma con andamento esponenziale in ciascun intervallo.

3

Capitolo

INTRODUZIONE ALLE MACCHINE ELETTRICHE ROTANTI

3.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

3.1.1 Generalità

Le macchine elettriche rotanti realizzano la conversione elettromeccanica dell'energia, già introdotta in (Cap.12 - Vol.1). Esse possono convertire potenza meccanica in potenza elettrica (funzionamento da generatore) ovvero potenza elettrica in potenza meccanica (funzionamento da motore); in molti casi, una stessa macchina può svolgere entrambe le funzioni.

Dal punto di vista meccanico, una macchina elettrica rotante è costituita da due parti: una fissa, detta *stator* ed una che può ruotare attorno ad un asse, detta *rotore*. Tra le due parti in movimento relativo è interposto uno spessore d'aria, detto *traferro*. Dal punto di vista elettromagnetico, le due parti, realizzate con materiale ad elevata permeabilità, svolgono la funzione di *induttore* e di *indotto*. Induttore, indotto e traferro compongono il circuito magnetico della macchina.

In alcune macchine l'induttore è nello statore e l'indotto è nel rotore, in altre è il contrario.

L'induttore ha la funzione di creare un campo magnetico, grazie alla *corrente di eccitazione* che scorre nei suoi *avvolgimenti* o grazie a *magneti permanenti*.

Nella grande maggioranza delle macchine elettriche rotanti di recente costruzione, il campo magnetico prodotto dall'induttore è rotante attorno all'asse della macchina. Peraltro, sono tuttora molto diffusi i *motori a corrente continua* e i *motori a collettore*, nei quali il campo magnetico di induttore ha direzione fissa nello spazio. Essi, pur presentando caratteristiche di funzionamento adatte a molte applicazioni, sono necessariamente dotati di un sistema di contatti strisciante (spazzole-collettore) che ne riduce il rendimento e richiede una frequente manutenzione. Grazie agli sviluppi nell'elettronica di potenza, essi sono progressivamente sostituiti da altri tipi di motori, alimentati da convertitori statici controllati (Cap. 6). Le macchine a corrente continua e le macchine a collettore non verranno perciò trattate in questa sede.

L'indotto è sede di forze elettromotorie create dal campo rotante di induttore e nei suoi avvolgimenti, chiusi in cortocircuito o collegati alla rete elettrica, scorrono le *correnti di indotto*. Esse, interagendo con il *campo magnetico di induttore*, danno luogo alla *coppia elettromeccanica* e quindi alla conversione dell'energia.

Il funzionamento delle maggior parte delle macchine elettriche rotanti si basa dunque sulla generazione di un campo magnetico rotante: nel prossimo paragrafo viene descritto in linea di principio come si possa creare un campo magnetico rotante, la cui realizzazione concreta verrà poi illustrata nei capitoli successivi, dedicati alle diverse tipologie di macchine rotanti.

3.1.2 Campo magnetico rotante

Esistono due modalità per la realizzazione di un campo magnetico rotante.

3.1.2.1 Campo prodotto da un magnete rotante

Il modo più semplice di produrre un campo magnetico rotante consiste nel dotare il rotore di un magnete avente asse magnetico ortogonale all'albero di macchina e metterlo in rotazione alla velocità angolare ω_r . Il magnete può essere costituito da un avvolgimento percorso da corrente continua (corrente di eccitazione) (Fig. 3.1.2.1a) oppure da un magnete permanente (Fig. 3.1.2.1b). Nel primo caso è ovviamente necessario portare all'avvolgimento rotante la corrente continua, prodotta da un generatore esterno fisso, tramite un sistema di contatti strisciati (§ 3.2.2). Il magnete realizza una coppia polare con un polo Nord e un polo Sud e quindi produce un campo magnetico rotante con l'albero alla velocità angolare $\omega = \omega_r$.

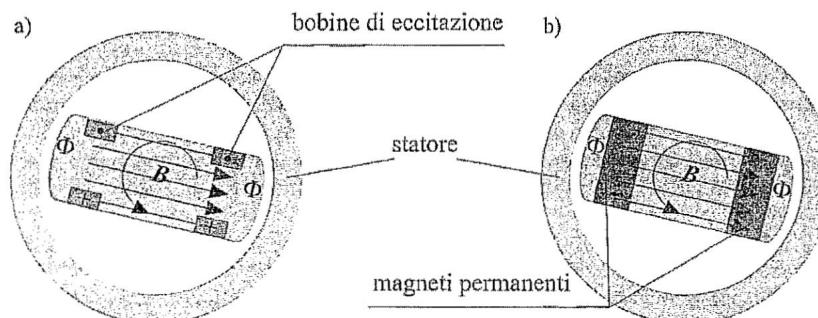


Figura 3.1.2.1

3.1.2.2 Campo prodotto da un sistema di elettromagneti fissi

Il campo rotante può anche essere prodotto da tre induttori fissi sullo statoro di macchina, percorsi da un sistema trifase equilibrato di correnti. In questo caso non è necessario il sistema di contatti strisciati. Il numero di induttori e di fasi può anche essere superiore a tre.

Si consideri un induttore rettilineo magneticamente isolato, percorso dalla corrente sinusoidale $i(t) = I_M \cos(\omega t)$. Esso produce, lungo il suo asse, un campo magnetico $H(t)$, cui corrisponde l'induzione $B(t)$ avente direzione assiale fissa e valore $B(t) = B_M \cos(\omega t)$ proporzionale al valore istantaneo della corrente ("campo alternativo").

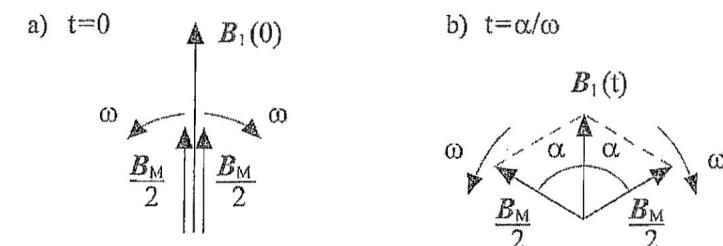


Figura 3.1.2.2

Questo campo magnetico può essere considerato come risultante di due vettori di ampiezza costante $B_M/2$, rotanti l'uno in senso orario e l'altro in senso antiorario, con velocità angolari costanti ω come illustra la Figura 3.1.2.2: in ogni istante i due vettori controrotanti si compongono dando luogo ad un vettore di direzione fissa, coincidente con l'asse dell'induttore, e di ampiezza variabile con legge sinusoidale e pulsazione ω .

Si considerino ora tre induttori uguali, fissi e simmetricamente disposti nello spazio, con gli assi complanari e convergenti nel punto P, a 120° l'uno dall'altro (Fig. 3.1.2.3), con tre versori u_1 , u_2 e u_3 paralleli agli assi.

I tre induttori siano percorsi da una terna simmetrica diretta di correnti:

$$\begin{cases} i_1(t) = I_M \cos(\omega t) \\ i_2(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.1.2.1)$$

Nell'intorno del punto P, i campi di induzione magnetica B_1 , B_2 e B_3 sono paralleli a u_1 , u_2 e u_3 , hanno intensità proporzionali ai valori istantanei delle correnti e sono quindi variabili nel tempo con legge sinusoidale di uguale ampiezza B_M e pulsazione ω :

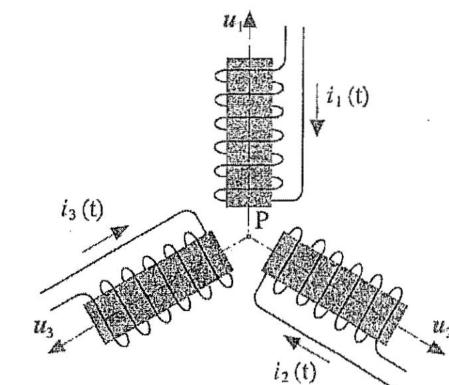


Figura 3.1.2.3

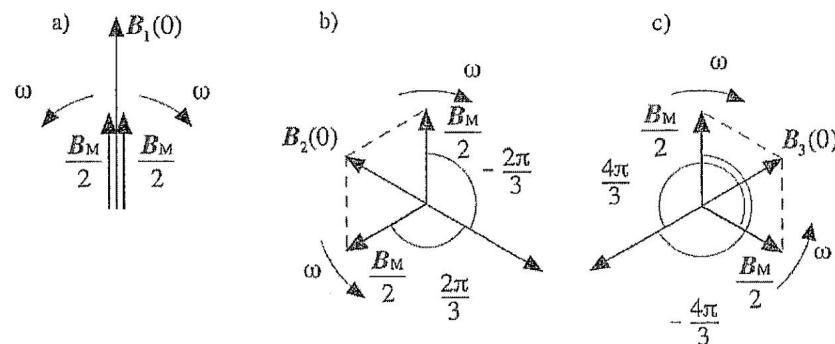


Figura 3.1.2.4

$$\begin{cases} B_1(t) = B_M \cos(\omega t) u_1 \\ B_2(t) = B_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) u_2 \\ B_3(t) = B_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) u_3 \end{cases} \quad (3.1.2.2)$$

A ciascuno di essi si può applicare la scomposizione in due vettori controrotanti come illustrato in Figura 3.1.2.2. Se il mezzo ha comportamento lineare, si può affermare che il campo complessivo è la risultante delle tre coppie di vettori. La Figura 3.1.2.4 mostra la situazione per $t = 0$:

- il vettore B_1 , parallelo all'asse della bobina 1, è composto dai vettori controrotanti che, all'istante $t = 0$, sono paralleli all'asse della bobina (Fig. 3.1.2.4a);
- il vettore B_2 , parallelo all'asse della bobina 2, è composto dai vettori controrotanti che sono in ritardo di $2\pi/3$ rispetto a quelli relativi alla bobina 1 e perciò, all'istante considerato $t = 0$, il vettore che ruota in senso orario forma un angolo di $-2\pi/3$ con l'asse della bobina 2, mentre il vettore che ruota in senso antiorario forma un angolo di $+2\pi/3$ con l'asse della bobina stessa; pertanto in $t = 0$ tali vettori rotanti sono rispettivamente paralleli agli assi delle bobine 1 e 3 (Fig. 3.1.2.4b);
- il vettore B_3 , parallelo all'asse della bobina 3, è composto dai vettori controrotanti che sono in ritardo di $4\pi/3$ rispetto a quelli relativi alla bobina 1 e perciò, all'istante considerato $t = 0$, il vettore che ruota in senso orario forma un angolo di $-4\pi/3$ con l'asse della bobina 3, mentre il vettore che ruota in senso antiorario forma un angolo di $+4\pi/3$ con l'asse della bobina stessa; pertanto in $t = 0$ tali vettori rotanti sono rispettivamente paralleli agli assi delle bobine 1 e 2 (Fig. 3.1.2.4c);

Il campo magnetico complessivo nell'intorno di P è dato dalla somma dei vettori B_1, B_2 e B_3 ; dalla sovrapposizione delle tre coppie di vettori rotanti si ottengono due terne di vettori: una costituita dai vettori rotanti sincroni in senso orario e l'altra costituita dai vettori rotanti sincroni in senso antiorario.

I tre vettori che ruotano in senso antiorario, essendo di uguale ampiezza e simmetricamente disposti a 120° , danno risultante nulla in ogni istante (Fig. 3.1.2.5a); invece i tre vettori che ruotano in senso orario con velocità angolare ω , avendo in ogni istante uguale ampiezza, direzione e verso (Fig. 3.1.2.5b), danno come risultante un vettore pure rotante in senso orario con velocità angolare ω e di ampiezza costante pari a $3B_M/2$ (Fig. 3.1.2.5c). È questo il campo di induzione magnetica complessivamente prodotto dalle tre bobine: si tratta di un campo magnetico rotante nel senso di successione ciclica delle fasi; per invertire il verso di rotazione del campo è sufficiente utilizzare una terna inversa di correnti, ovvero scambiare tra loro le correnti con cui sono alimentate due bobine (ad es.: i_2 con i_3).

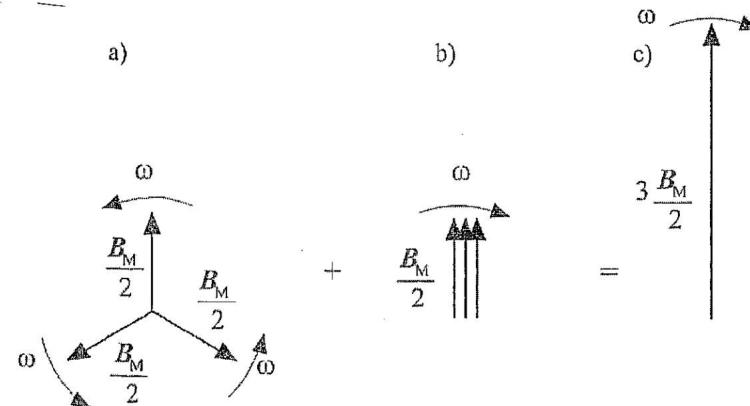


Figura 3.1.2.5

Come si vedrà dettagliatamente nel seguito, il principio qui illustrato viene applicato alle macchine elettriche rotanti con alcuni accorgimenti per migliorare l'efficienza. Consideriamo il caso più frequente, in cui lo statore sta all'esterno del rotore. Lo statore è una corona cilindrica fatta in modo da costituire un circuito magnetico ad elevata permeabilità, che canalizza efficacemente le linee di B . I tre avvolgimenti sono posizionati simmetricamente sulla faccia interna della corona cilindrica che costituisce lo statore. All'interno dello statore viene posto il rotore, che è un cilindro, costruito sempre con materiale ad elevata permeabilità.

Quando sono alimentati con una terna simmetrica di correnti, gli avvolgimenti producono a traferro una distribuzione di induzione B con direzione prevalentemente radiale e modulo della componente radiale di andamento pressoché sinusoidale lungo la coordinata angolare; la distribuzione di campo B ruota intorno all'asse della corona cilindrica con velocità angolare pari alla pulsazione ω delle correnti negli avvolgimenti; nel seguito la velocità angolare del campo magnetico rotante ottenuto in questo modo verrà indicato col simbolo ω_c .

3.1.2.3 Campo prodotto con più coppie polari

Oltre a quanto analizzato nel § 3.1.2.1, si può realizzare sul rotore, con elettromagneti o magneti permanenti, un numero di magneti (e quindi di coppie polari p) maggiore di uno, in tal caso il campo magnetico prodotto ruota ad una velocità angolare ω , legata a quella ω_r del rotore da:

$$\omega = \omega_r p$$

Analogamente, con riferimento al § 3.1.2.2, se lungo la coordinata angolare azimutale vengono posizionate in sequenza p terne di avvolgimenti (con p maggiore di uno), alimentate dalla stessa terna di correnti, si crea una distribuzione di induzione al traferro avente p periodi lungo la circonferenza; la velocità angolare del campo rotante ω_c è legata alla pulsazione ω delle correnti da:

$$\omega_c = \omega/p \quad (3.1.2.4)$$

dove p è sempre il numero di coppie polari.

3.2 STRUTTURA DELLE MACCHINE ELETTRICHE ROTANTI

Le macchine elettriche rotanti presentano geometrie e strutture notevolmente differenziate in funzione del tipo di macchina, della sua potenza nominale, dell'ambiente in cui opera e delle funzioni che deve svolgere. Alcune caratteristiche costruttive sono però comuni e verranno discusse nei seguenti paragrafi. Generalmente il rotore, calettato sull'albero che trasmette la potenza meccanica, è infilato nello statore (Fig. 3.2.1.1), che a sua volta è ancorato a un involucro metallico, o carcassa, sulla quale sono montati gli scudi di estremità; su questi stanno i cuscinetti che supportano albero e rotore¹.

3.2.1 Circuito magnetico, induttore ed indotto

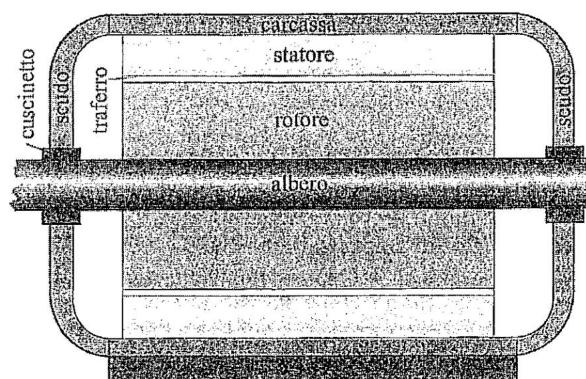


Figura 3.2.1.1

¹ Esistono anche disposizioni nelle quali il rotore è posto esternamente allo statore; questa soluzione viene adottata per ridurre il peso in alcuni veicoli elettrici leggeri (anche biciclette), nei quali il motore è montato direttamente all'interno della ruota.

Da un punto di vista magnetico, le due parti che costituiscono la macchina (statore e rotore) sono chiamate a svolgere due funzioni diverse. In una di esse (chiamata induttore) gli avvolgimenti vengono alimentati per produrre il flusso di eccitazione (in alternativa, prodotto da magneti permanenti); nell'altra (chiamata indotto) viene generata la tensione elettrica voluta (funzionamento come generatore) o viene fatta circolare una corrente (che può essere fornita da una rete di alimentazione elettrica esterna alla macchina o prodotta inducendo f.e.m. in avvolgimenti chiusi), in modo da sviluppare le azioni elettrodinamiche che consentono il funzionamento da motore.

In generale è indifferente quale delle due parti della macchina svolge le funzioni di induttore (e reciprocamente di indotto) e la scelta avviene in base al criterio di rendere meno complesse le configurazioni circuitali, di ridurre le perdite elettriche o meccaniche e ad altre considerazioni di carattere pratico.

Si è già osservato nel § 3.1.1 come lo statore, il rotore e il traferro realizzino il circuito magnetico di macchina. Per massimizzare il flusso Φ di ciascun polo, rotore e statore sono realizzati in ferro ad alta permeabilità e il traferro è il più sottile possibile, compatibilmente con il gioco necessario tra parti fisse e parti rotanti e tenuto conto delle esigenze funzionali della macchina; in tal modo si ottengono circuiti magnetici a bassa riluttanza, che canalizzano l'induzione magnetica e fanno in modo che essa attraversi il traferro in direzione prevalentemente radiale.

Nei tratti di circuito magnetico soggetti a induzione periodicamente variabile, per minimizzare le perdite per isteresi si utilizzano materiali ferromagnetici dolci (§ 10.1.8.2, Vol.1), mentre per minimizzare le perdite per correnti parassite essi vengono realizzati in acciaio lamellato (§ 14.12.1, Vol.1); si usano lamierini da $0,3 \div 0,5$ mm di spessore, con un contenuto del $2 \div 3\%$ di silicio, reciprocamente isolati; i lamierini sono impilati in pacchi, spessi $50 \div 100$ mm e più pacchi sono sovrapposti fino a raggiungere lo spessore complessivo voluto; l'insieme dei pacchi è compresso mediante dischi in acciaio e bulloni passanti ed isolati, alloggiati in specifici canali assiali. Nelle macchine di potenza elevata, tra i pacchi vengono interposti distanziatori per ottenere canali radiali di ventilazione, spessi circa 10 mm, destinati ad asportare il calore generato tanto nel ferro che nel rame degli avvolgimenti. I tratti di circuito magnetico soggetti ad induzione stazionaria non richiedono nuclei lamellati e vengono usualmente realizzati in acciaio massiccio ad elevata permeabilità.

3.2.1.1 Esempio di macchina con induttore rotante

L'induttore è realizzato con elettromagneti oppure con magneti permanenti: questi producono il campo di induzione che attraversa il traferro, alternativamente diretto dallo statore al rotore e viceversa lungo lo sviluppo azimutale del traferro; il numero delle alternanze definisce il numero $2p$ dei poli, ovvero il numero p delle coppie polari, che si susseguono con polarità alternate, come schematicamente illustra la Figura 3.2.1.2.

Le coppie polari, identiche tra di loro salvo che per la posizione angolare, sono caratterizzate dallo stesso valore di flusso polare Φ . Ciascun polo occupa un settore angolare cilindrico di lunghezza ℓ e di ampiezza angolare $2\pi/2p$: la lunghezza dell'arco al traferro $\tau = 2\pi r_p/2p$ è detta semipasso polare. Pertanto si considerano i seguenti parametri geometrici (Fig. 3.2.1.2):

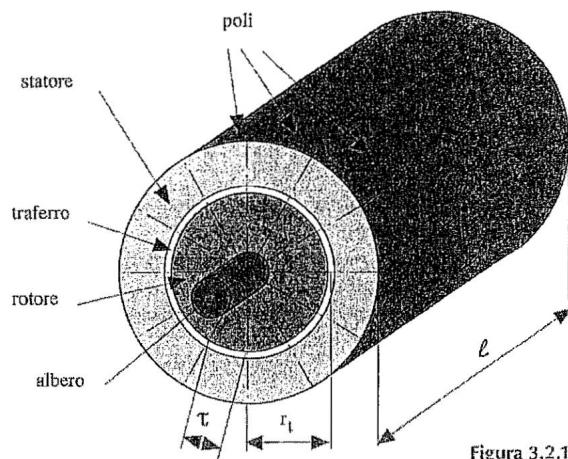


Figura 3.2.1.2

- l = lunghezza utile del circuito magnetico in direzione assiale;
- r_t = raggio (medio) al traferro;
- p = numero di coppie polari;
- τ = semipasso polare.

Utilizzando tali parametri, il flusso polare può essere espresso come prodotto della superficie al traferro di un polo per il valore medio dell'induzione B_m :

$$\Phi = \tau l B_m \quad (3.2.1.1)$$

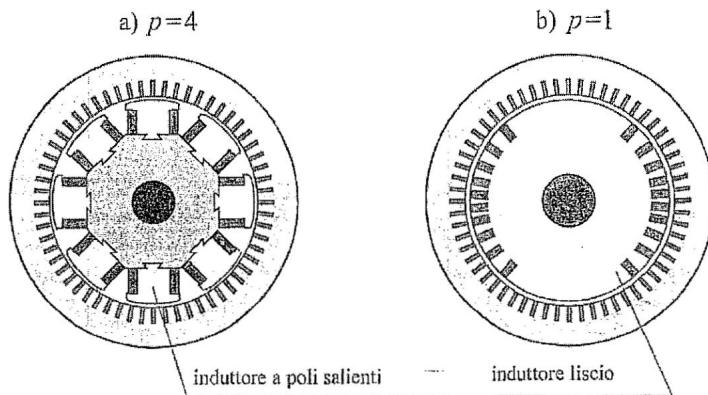


Figura 3.2.1.3

L'induttore, in base al suo profilo al traferro, può avere due diverse geometrie, schematizzate in Figura 3.2.1.3:

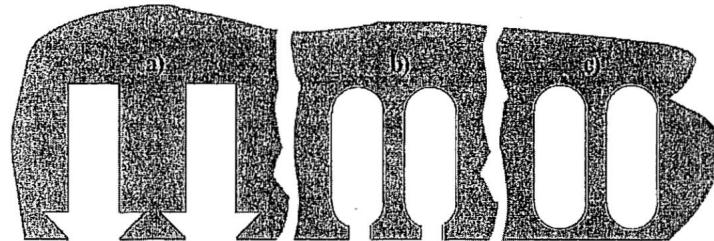


Figura 3.2.1.4

- *Induttore a poli salienti o sporgenti* (Fig. 3.2.1.3a) che presenta $2p$ poli tra loro identici, ciascuno costituito da un *nucleo polare* e da una *scarpa (o espansione) polare*; sui nuclei polari sono montate le bobine di eccitazione, oppure i nuclei sono costituiti da magneti permanenti.
- *induttore liscio o isotropo* (Fig. 3.2.1.3b) di forma cilindrica; lungo la sua superficie laterale, affacciata al traferro, sono presenti scanalature longitudinali (*cave di indotto*), in cui sono alloggiati i conduttori dell'avvolgimento di eccitazione, oppure i magneti permanenti.

L'indotto è sempre di tipo liscio (Fig. 3.2.1.3) ed è costituito da più conduttori di indotto alloggiati in scanalature longitudinali (dette *cave di indotto*) realizzate in corrispondenza della superficie del ferro rivolta al traferro. Gli avvolgimenti di indotto (o di armatura) sono ottenuti dall'interconnessione dei conduttori di indotto per mezzo dei collegamenti di testata.

Le cave, tanto di indotto che di induttore, possono presentare forme diverse: in Figura 3.2.1.4 sono esemplificate cave di tipo: aperto (a), semichiuso (b) e chiuso (c). Le cave aperte e semiaperte permettono l'inserimento di matasse preformate, realizzate con conduttori di sezione maggiore nel primo caso e minore nel secondo. Nel caso di cave chiuse le matasse devono essere realizzate direttamente in cava. Il tipo di cava, più o meno inglobata nel ferro, influenza sul comportamento magnetico dell'avvolgimento.

3.2.2 Contatti striscianti

Per connettere a componenti fermi i conduttori presenti nel rotore (tanto che costituiscano l'induttore oppure l'indotto), si ricorre a contatti striscianti costituiti da anelli, realizzati in materiale conduttore e calettati sull'albero, da esso isolati e connessi ai terminali degli avvolgimenti posti nel rotore (Fig. 3.2.2.1a), e spazzole (blocchetti di grafite o metalgrafite sinterizzata solidali con lo statore, Fig. 3.2.2.1b). Le spazzole sono dotate di elementi elastici che esercitano pressione contro gli anelli per minimizzare la caduta di tensione nel contatto (Fig. 3.2.2.1c) e di corde in rame per il collegamento con i terminali (Fig. 3.2.2.1b). I contatti striscianti producono perdite per attrito e perdite per effetto Joule; inoltre, richiedono una frequente manutenzione, con sostituzione delle spazzole e rettifica o sostituzione degli anelli. Perciò, nelle macchine di maggiori dimensioni, in particolare negli alternatori (§ 4.1), sono talvolta sostituiti da un sistema senza contatto, costi-

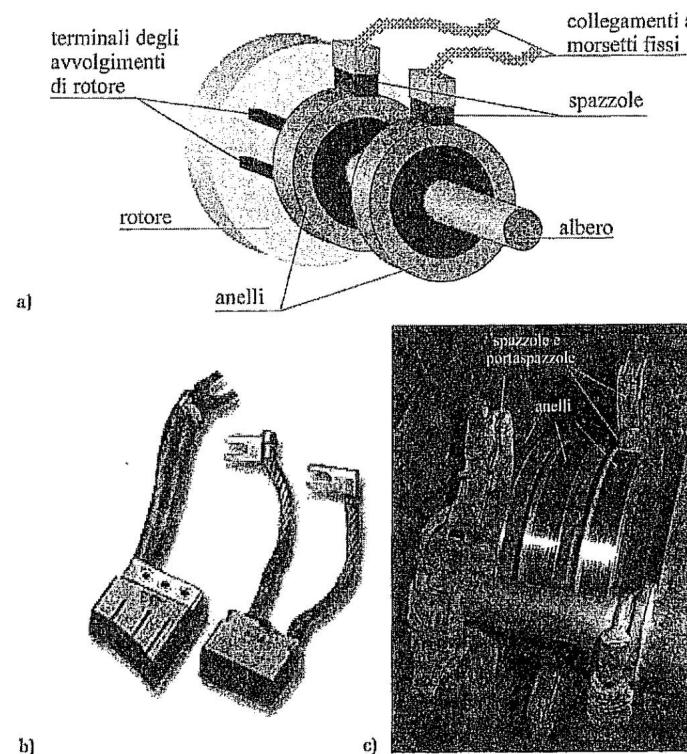


Figura 3.2.2.1

tuito da una macchina elettrica ausiliaria di piccola potenza; il rotore di quest'ultima è calettato sull'albero di macchina e nei suoi avvolgimenti sono indotte correnti sinusoidali, che vengono raddrizzate da un ponte a diodi installato nel rotore e quindi inviate agli avvolgimenti di eccitazione.

3.2.3 Aspetti funzionali

3.2.3.1 Potenze e perdite

Le macchine elettriche rotanti sono dei convertitori elettromeccanici. La potenza meccanica P_{mecc} è trasmessa attraverso l'albero di macchina e vale sempre:

$$P_{\text{mecc}} = C \omega_r \quad (3.2.3.1)$$

La potenza elettrica è trasmessa attraverso la morsettiera. La conversione elettromeccanica riguarda la potenza attiva P , che vale rispettivamente:

$$\begin{aligned} P &= VI && \text{per una macchina in corrente continua} \\ P &= VI \cos \varphi && \text{per una macchina monofase} \\ P &= \sqrt{3} VI \cos \varphi && \text{per una macchina trifase} \end{aligned} \quad (3.2.3.2)$$

Nel § 12.3 del Vol.1 è stato illustrato come, in un convertitore elettromeccanico, la potenza elettrica convertita P_g è uguale alla potenza meccanica convertita P_m . A causa di diversi fenomeni di perdita, la potenza elettrica ai morsetti è diversa dalla potenza elettrica convertita, $P \neq P_g$; analogamente la potenza meccanica scambiata attraverso l'albero è diversa dalla potenza meccanica convertita, $P_{\text{mecc}} \neq P_m$.

Queste perdite di potenza possono essere così classificate:

- P_{Cu-i} perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di indotto;
- P_{Cu-e} perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di induttore;
- P_{Fe} perdite per correnti parassite e per isteresi nel ferro di indotto e di induttore;
- P_{attr} perdite meccaniche di attrito ai cuscinetti ed eventualmente ai contatti strisciati;
- P_{ven} perdite meccaniche di ventilazione.

La somma di tali potenze può essere indicata con P_{diss} ; essa fa sì che la potenza erogata (potenza utile P_u , sia essa meccanica o elettrica) sia sempre inferiore a quella assorbita P_a (elettrica o meccanica).

3.2.3.2 Rendimento del generatore

Nel funzionamento da generatore, la potenza utile è la potenza attiva erogata ai terminali, $P_u = P$, e la potenza assorbita è la potenza attiva fornita dal motore primario, $P_a = P_{\text{mecc}}$. Quindi il rendimento vale:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P}{P_{\text{mecc}}} = \frac{P}{P + P_{\text{diss}}} \quad (3.2.3.3)$$

3.2.3.3 Rendimento del motore

Nel funzionamento da motore la potenza utile è quella meccanica fornita all'utenza, $P_u = P_{\text{mecc}}$, e la potenza assorbita è la potenza attiva assorbita ai terminali, $P_a = P$. Quindi il rendimento vale:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_{\text{mecc}}}{P} = \frac{P_{\text{mecc}}}{P_{\text{mecc}} + P_{\text{diss}}} \quad (3.2.3.4)$$

Sia nel funzionamento da generatore che da motore, il rendimento è generalmente tanto maggiore quanto maggiore è la potenza nominale. Inoltre tipologie diverse di macchina presentano rendimenti diversi, a parità di potenza nominale.

3.2.3.4 Raffreddamento

Per smaltire la potenza dissipata P_{diss} , le macchine rotanti sono provviste di dispositivi di ventilazione che permettono di raffreddare il ferro e il rame tanto di rotore che di statore e di asportare le perdite meccaniche. A tal fine le macchine di

potenza nominale medio-alta sono dotate dei canali radiali di ventilazione descritti in § 3.2.1. Talvolta sono anche realizzati canali di ventilazione assiali, paralleli all'asse di rotazione.

Le macchine di piccola potenza non richiedono particolari dispositivi, essendo il moto del rotore sufficiente ad assicurare la circolazione dell'aria; quelle di potenza media sono dotate di ventilatori calettati sull'albero; le macchine di grande potenza sono provviste di complessi sistemi di raffreddamento forzato e nelle più grandi si usano come fluidi refrigeranti anche gas diversi dall'aria (ad esempio idrogeno) associati a scambiatori di calore.

Capitolo

4

MACCHINE SINCRONE

4.1 GENERALITÀ

La macchina sincrona è una macchina elettrica rotante in cui la velocità di rotazione del rotore è strettamente legata alla frequenza delle tensioni presenti ai terminali degli avvolgimenti di statore.

Una macchina sincrona che funziona normalmente da generatore è detta *alternatore*, mentre una macchina che funziona normalmente da motore è detta *motore sincrono* (Fig. 4.1.1). Tuttavia non esistono differenze fondamentali tra macchine costruite per l'una o l'altra modalità di funzionamento e la stessa macchina può funzionare sia da alternatore che da motore. In generale le macchine sincrone più diffuse sono i generatori, con potenze nominali che possono superare il gigavoltampere (GVA). Tuttavia, dopo l'enorme sviluppo dagli anni '80 dei convertitori basati su componenti allo stato solido, che consentono di controllare facilmente la tensione e la frequenza di alimentazione, anche i motori sincroni sono ora molto diffusi, sia per la loro elevata efficienza energetica, sia perché consentono il recupero dell'energia meccanica durante le frenate.

Solitamente nelle macchine sincrone l'induttore è posto nel rotore e l'indotto nello statore e a tale disposizione si fa riferimento nel seguito (Fig. 4.1.2 e 4.1.3).

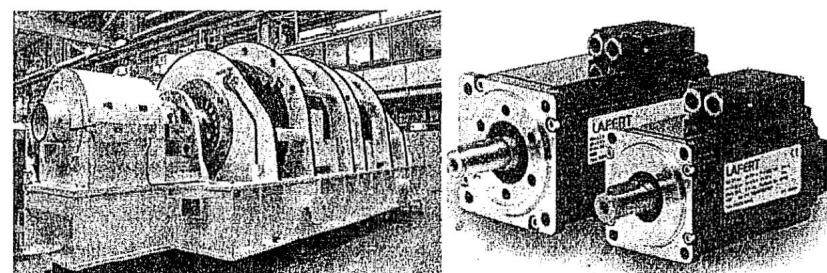


Figura 4.1.1 Grande alternatore ad asse orizzontale e motori sincroni medio-piccoli.

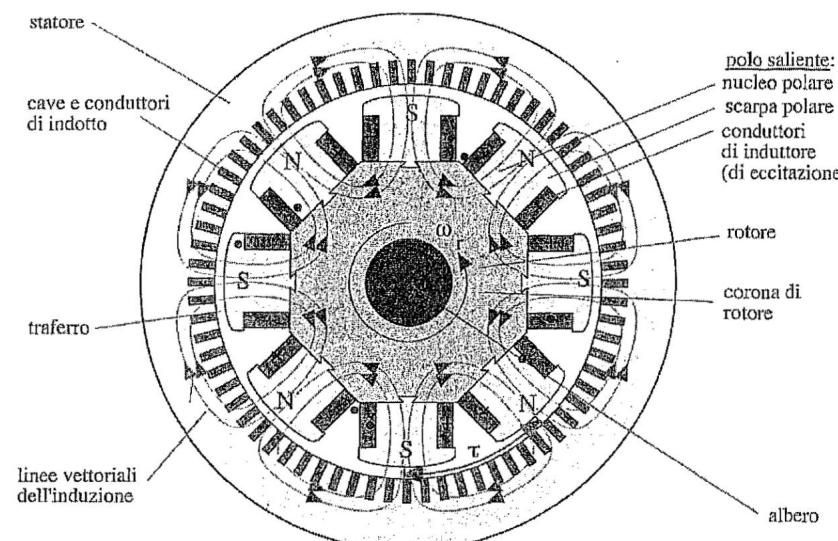


Figura 4.1.2 Sezione trasversale di una macchina sincrona avente $p = 4$ coppie polari.

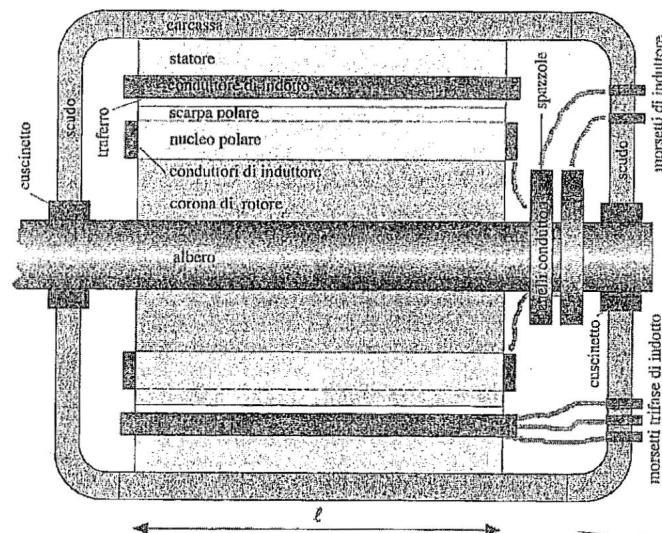


Figura 4.1.3 Sezione longitudinale di una macchina sincrona, la lunghezza utile dello statore e del rotore viene denominata l .

4.1.1 Rotore

Il rotore è realizzato in modo da generare una configurazione di campo magnetico stazionario, che ruota in modo solidale al rotore quando questo è in rotazione, investendo anche lo statore.

Nel rotore sono presenti avvolgimenti percorsi da corrente continua, chiamati *avvolgimenti di eccitazione*, oppure magneti permanenti costituiti da *materiali magnetici duri*. Gli avvolgimenti o i magneti permanenti sono resi solidali all'albero dal nucleo magnetico, realizzato con materiale ad elevata permeabilità magnetica, disposto in modo da produrre un intenso campo magnetico radiale a traferro.

Il numero di *coppie polari* N-S del nucleo magnetico viene denominato p . In tal modo, il rotore costituisce una struttura magnetica periodica avente un numero di poli pari a $2p$ (Fig. 4.1.2). Il nucleo magnetico del rotore, essendo sede di un campo magnetico costante, è normalmente di acciaio massiccio; le macchine sincrone possono avere il *rotore a poli salienti*, in genere per $2p \geq 6$, oppure il *rotore liscio*, di solito per $2p \leq 4$ (Fig. 4.1.4).

Nel caso del rotore a poli salienti, i conduttori degli avvolgimenti di eccitazione sono disposti intorno ai nuclei polari, formando $2p$ bobine identiche tra loro. Nel caso del rotore liscio, i conduttori degli avvolgimenti di eccitazione sono disposti in cave longitudinali e connessi tra di loro sulle due testate di macchina; la distribuzione delle cave e le connessioni tra i conduttori sono tali da realizzare due (o quattro) bobine identiche.

Gli avvolgimenti di eccitazione sono connessi in serie e vengono alimentati tramite due anelli con contatti strisciante (spazzole, vedi Fig. 4.1.3), spesso mediante uno specifico generatore in corrente continua denominato *dinamo eccitatrice*, che viene calettata sullo stesso albero.

Le macchine in cui il rotore viene magnetizzato per mezzo di magneti permanenti (invece che con avvolgimenti di eccitazione) sono prive di anelli e spazzole e vengono chiamate *brushless* (vedi § 6.2.2).

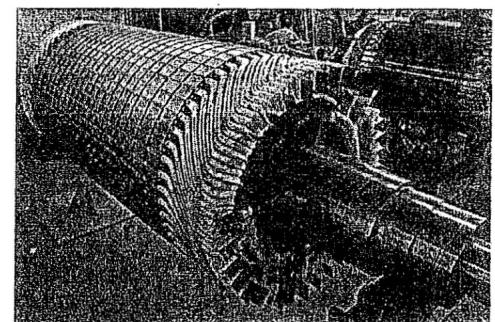
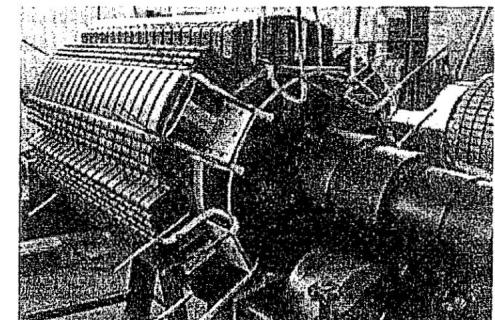


Figura 4.1.4 Rotore a poli salienti e rotore liscio di alternatori.

4.1.2 Statore

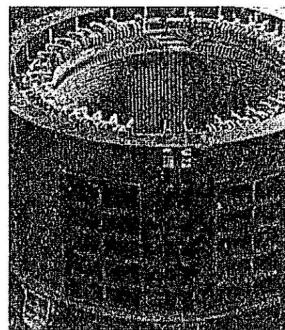


Figura 4.1.5 Statore di grande alternatore ad asse verticale.

Lo statore è la parte fissa della macchina e ha la forma di un cilindro cavo (Fig. 4.1.5). È costituito di materiale ferromagnetico, attraverso il quale si richiudono le linee del campo magnetico prodotto dal rotore. Essendo sede di induzione magnetica periodicamente variabile, è costituito da un pacco di lamierini di acciaio al silicio. Sulla faccia interna dello statore sono presenti cave longitudinali uniformemente spaziate, che alloggiano i conduttori di indotto, collegati sulle due testate di macchina per realizzare tre avvolgimenti. I terminali degli avvolgimenti sono connessi (a stella o a triangolo) ad una rete in regime sinusoidale trifase. Si può anche realizzare un alternatore monofase collegando un solo avvolgimento ad una rete in regime sinusoidale monofase.

4.1.3 Conduttori di induttore e di indotto

I conduttori di induttore e di indotto sono generalmente in rame, per minimizzare le perdite per effetto Joule. Nell'induttore (che funziona in DC) possono venire impiegati conduttori di sezione elevata; nell'indotto (che funziona in AC), per ridurre la dissipazione per effetto pelle, si ricorre a più conduttori sottili, reciprocamente isolati, che vengono trasposti (ossia scambiati periodicamente di posizione, in modo che tutti siano sottoposti alla stessa induzione media) e connessi in parallelo alle estremità.

4.1.4 Valori nominali

I valori nominali di una macchina sincrona individuano i livelli delle principali grandezze ai quali si ottiene il funzionamento ottimale della macchina.

I principali valori nominali della macchina sincrona sono elencati in Tabella 4.1.1.1.

P_n	potenza nominale [VA, W]
V_n	tensione concatenata nominale di indotto [V]
I_n	corrente nominale di indotto [A]
f_n	frequenza nominale [Hz]
I_e	corrente di eccitazione [A]
V_e	tensione di eccitazione [V]
n_n	velocità nominale di rotazione [giri/minuto]
C_n	coppia nominale all'albero [Nm]

Tabella 4.1.1.1

Tensione e corrente nominali di indotto hanno significato di valori efficaci. Nel caso degli alternatori la potenza nominale ha significato di potenza elettrica apparente erogata ed è espressa in VA; nel caso dei motori ha invece significato di potenza resa all'albero ed è espressa in W.

Per gli alternatori trifasi vale la relazione:

$$P_n = \sqrt{3} V_n I_n ; \quad (4.1.4.1)$$

Invece per i motori sincroni si ha:

$$P_n = C_n \frac{2\pi}{60} n_n . \quad (4.1.4.2)$$

4.2 F.E.M. DELLA MACCHINA SINCRONA TRIFASE

La trattazione seguente fa riferimento ad un alternatore trifase con collegamento delle fasi di statore a stella: la sezione di una macchina di tale tipo con $p = 4$ coppie polari è stata schematizzata in Figura 4.1.2.

4.2.1 Induzione al traferro dovuta all'induttore

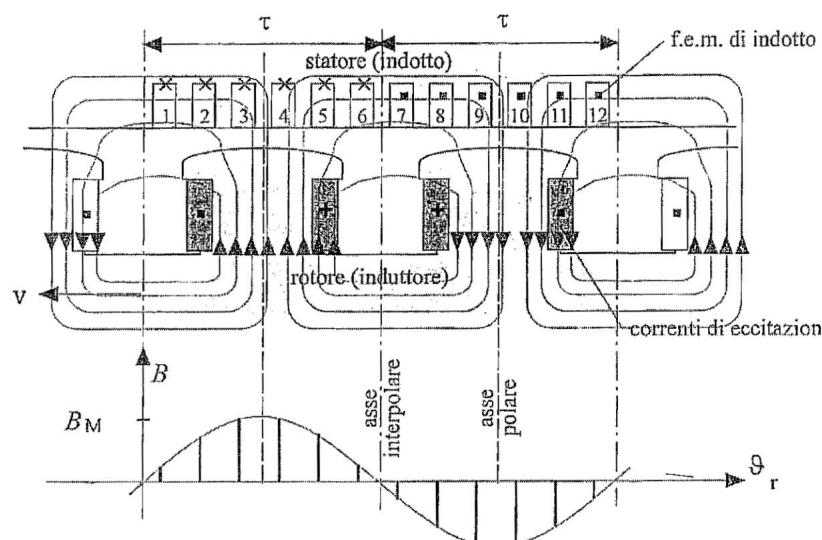
4.2.1.1 Induzione al traferro nelle macchine a poli salienti

L'induttore è alimentato a corrente di eccitazione I_e costante; ciascuna delle $2p$ bobine di eccitazione, aventi N_e spire percorse dalla corrente di eccitazione I_e , produce la f.m.m. di eccitazione $N_e I_e$. Dato che le bobine sono uguali e collegate in anti-serie, nel circuito magnetico costituito da rotore, traferro e statore, esse producono un'induzione B con linee vettoriali come quelle mostrate in Figura 4.1.2 e in Figura 4.2.1.1.

La Figura 4.2.1.1 rappresenta un settore (rettificato) corrispondente ad una coppia di poli di una macchina sincrona (θ_r è la coordinata angolare di un sistema di riferimento solidale con il rotore).

Ciascuna linea vettoriale si sviluppa nel ferro di rotore e di statore attraversando due volte il traferro e concatena la f.m.m. $2N_e I_e$. Poiché la permeabilità del ferro è molto maggiore di quella dell'aria, la tensione magnetica lungo i tratti in ferro si può trascurare, perciò ciascuno dei due tratti di traferro è sottoposto alla tensione magnetica $N_e I_e$. Il profilo delle scarpe polari di rotore (Fig. 4.1.2) è sagomato in modo che le linee vettoriali nei tratti di traferro abbiano lunghezze $t = t(\theta_r)$ tali da fornire un andamento dell'induzione magnetica $B(\theta_r)$ pressoché sinusoidale lungo l'angolo $\Delta\theta_r = 2\pi/p$, quindi con p periodi lungo l'intera circonferenza di traferro; essa è quindi esprimibile come:

$$B(\theta_r) = B_M \sin(p\theta_r); \quad (4.2.1.1)$$



Simboli di f.e.m e correlati: x = entranti positive; • = uscenti positive

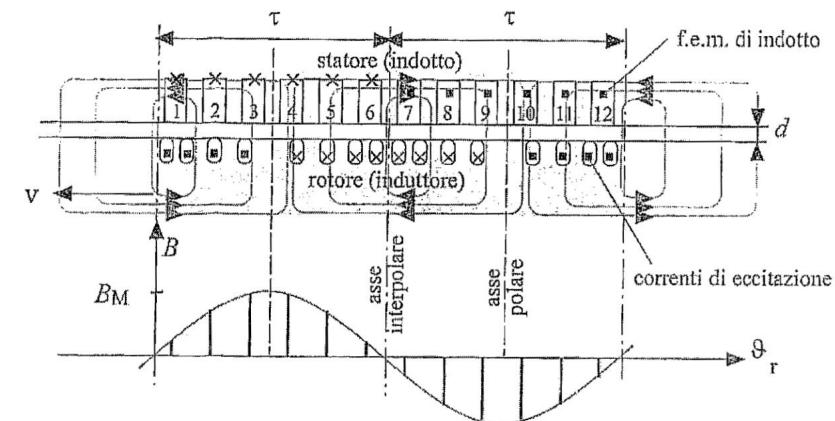
Figura 4.2.1.1 Profilo rettificato di una macchina sincrona con rotore a poli salienti.

B_M è il valore massimo, che si presenta in corrispondenza dell'asse di simmetria di ciascun polo, detto *asse polare*, ove il traferro ha spessore minimo. L'induzione si annulla in corrispondenza dell'asse mediano tra due poli, detto *asse interpolare*. La distanza tra due assi interpolari successivi, misurata lungo il traferro, viene denominata *semi-passo polare* τ . La distribuzione della componente radiale dell'induzione al traferro è illustrata in Figura 4.2.1.1.

4.2.1.2 Induzione al traferro nelle macchine a rotore liscio

Nelle macchine a rotore liscio lo spessore del traferro risulta costante lungo la coordinata angolare θ_r . La Figura 4.2.1.2 illustra un settore (rettificato) corrispondente ad una coppia di poli in una macchina a rotore liscio e mostra come le linee vettoriali dovute alle f.m.m. di eccitazione si sviluppano nel ferro attraversando due volte il traferro.

In questo caso la lunghezza d dei tratti di linee al traferro non varia con θ_r , essendo il rotore liscio. Tuttavia, come si vede dalla Figura 4.2.1.2, linee vettoriali diverse concatenano f.m.m. diverse e la distribuzione dei conduttori di induttore alloggiati nelle cave non è uniforme; ciò produce un andamento di $B(\theta_r)$ pressoché sinusoidale, espresso ancora dalla relazione (4.2.1.1).



Simboli di f.e.m e correlati: x = entranti positive; • = uscenti positive

Figura 4.2.1.2 Profilo rettificato di una macchina sincrona con rotore liscio.

4.2.2 F.e.m. indotte

4.2.2.1 F.e.m. indotta negli avvolgimenti di statore

Consideriamo un rotore avente una velocità di rotazione n (giri/min), corrispondente ad una velocità angolare $\omega_r = 2\pi n/60$ (rad/sec). Per valutare le interazioni elettromagnetiche tra rotore e statore si può notare che l'induzione magnetica prodotta dal rotore dà luogo ad un flusso che si concatena con ciascuno dei tre avvolgimenti di statore.

Gli avvolgimenti dello statore sono costituiti da spire conduttrici isolate, raggruppate in *matasse*, distribuite nelle cave di statore secondo schemi simili a quelli rappresentati in Figura 4.2.2.1, in modo che ogni spira ricopra una superficie di lunghezza ℓ e di larghezza pari ad un semi-passo polare τ .

Quando il rotore ruota, il flusso concatenato con ciascuno degli avvolgimenti di statore ha quindi un andamento variabile nel tempo con legge sinusoidale $\varphi_0(t)$ ed ha una fase dipendente dalla posizione angolare delle spire dell'avvolgimento considerato. Dato che ogni spira dell'avvolgimento di statore copre una superficie pari al semi-passo polare τ per la lunghezza della macchina ℓ , il massimo flusso concatenato con una spira risulta pari al flusso di un polo di induttore (*flusso polare*) Φ_{0M} :

$$\Phi_{0M} = \tau \ell B_m = \tau \ell B_M \frac{2}{\pi}; \quad (4.2.2.1)$$

dove B_M è il massimo dell'induzione al traferro mentre, con andamento sinusoidale, $B_m = B_M/2\pi$ è il valor medio dell'induzione magnetica su un semipasso polare τ . Per effetto della rotazione del rotore, il flusso concatenato con ogni spira situata sullo statore varia in maniera sinusoidale con pulsazione $\omega = 2\pi f$.

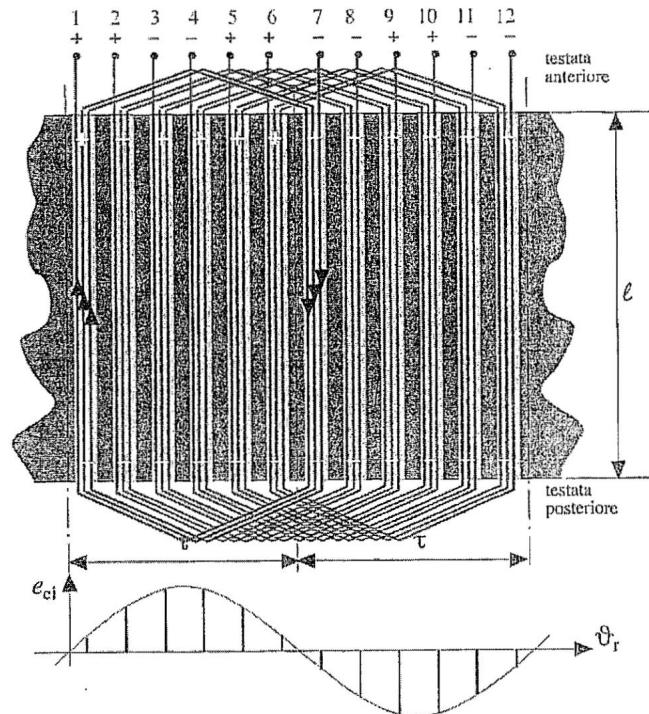


Figura 4.2.2.1

In una macchina avente una sola coppia polare ($p = 1$), il flusso concatenato con una spira compie una sinusoide completa ad ogni giro del rotore e quindi la pulsazione del flusso e della f.e.m. indotta $\omega = 2p f$ coincide con la velocità di rotazione angolare del rotore ω_r . Se invece il numero di coppie polari è $p > 1$, le sinusoidi complete sono p per ogni giro, e la pulsazione elettrica ω dipende dalla velocità angolare di rotazione del rotore ω_r e dal numero di coppie polari p secondo la relazione:

$$\omega = 2\pi f = \omega_r p. \quad (4.2.2.2)$$

Di conseguenza, la f.e.m. indotta in uno degli avvolgimenti di statore, ottenuto collegando in serie le matasse appartenenti ad una fase, è sempre esprimibile come funzione sinusoidale:

$$e(t) = \sqrt{2} E_{10} \sin(\omega t + \alpha) = -\frac{d k_s N_s \Phi_0(t)}{dt} = \sqrt{2} \omega k_s N_s \Phi_0 \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.2.2.3)$$

dove Φ_0 è il valore efficace pari a $\Phi_{0M} / \sqrt{2}$, N_s è il numero totale dei conduttori delle matasse dell'avvolgimento di statore collegate in serie e il coefficiente adimensionale k_s tiene conto della distribuzione spaziale delle diverse matasse, dato che le spire di cui è costituito un avvolgimento non concatenano tutte il flusso Φ_{0M} nel medesimo istante.

Definendo poi un fasore rappresentativo del flusso polare $\bar{\Phi}_0 = \Phi_0 e^{j0}$, si può esprimere la tensione indotta in uno degli avvolgimenti in forma fasoriale come:

$$\bar{E}_{10} = -j\omega k_s N_s \bar{\Phi}_0 \quad (4.2.2.4)$$

Le tensioni indotte nei tre avvolgimenti dello statore saranno sfasate di 120° tra loro, cosicché:

$$\begin{cases} \bar{E}_A = -j\omega k_s N_s \bar{\Phi}_0 e^{j0} = \bar{E}_{10} e^{j0} \\ \bar{E}_B = -j\omega k_s N_s \bar{\Phi}_0 e^{-j\frac{2}{3}\pi} = \bar{E}_{10} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \bar{E}_C = -j\omega k_s N_s \bar{\Phi}_0 e^{-j\frac{4}{3}\pi} = \bar{E}_{10} e^{-j\frac{4}{3}\pi} \end{cases} \quad (4.2.2.5)$$

Dato che di solito si esprime la velocità di rotazione, invece che in rad/sec, in giri/min $n = 60\omega_r/2\pi$, si può dedurre che tra frequenza $f = \omega/2\pi$ delle f.e.m. di indotto e velocità di rotazione del campo rotante (e del rotore) n sussiste il legame:

$$n = \frac{60f}{p}. \quad (4.2.2.6)$$

Se la frequenza vale $f = 50$ Hz, la velocità di rotazione è fissata dal numero di coppie polari, $n = 3000/p$, come illustra la Tabella 4.2.2.1.

p	1	2	3	4	5
n	3000	1500	1000	750	600

Tabella 4.2.2.1 Velocità di rotazione delle macchine sincrone in funzione del numero di coppie polari, nel funzionamento a $f = 50$ Hz.

4.3 FUNZIONAMENTO A VUOTO

Il funzionamento a vuoto si realizza quando la macchina è eccitata ($I_e \neq 0$) e sono nulle le correnti di indotto. Il flusso polare Φ_0 dipende solo dalla corrente di eccitazione I_e (ovvero dalla f.m.m. dei magneti di rotore), come mostrato in Figura 4.3.1.

Per piccoli valori della corrente I_e , il materiale ferromagnetico di rotore e statore presenta elevata permeabilità, e quindi il flusso Φ_0 e la tensione E_{10} , che sono tra loro proporzionali, in accordo con la relazione (4.2.2.4), crescono linearmente con la corrente I_e . Infatti, in tali condizioni la riluttanza del circuito magnetico è determinata essenzialmente dal traferro ed è costante (caratteristica di traferro).

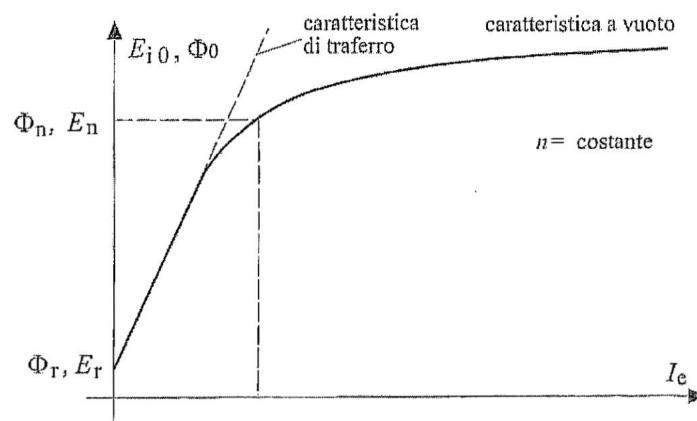


Figura 4.3.1 Caratteristica di eccitazione.

Maggiori correnti di eccitazione producono flussi polari ed induzioni più elevate, e quindi tensioni a vuoto E_{i0} più grandi. In tali condizioni, tuttavia, la saturazione del ferro ne riduce la permeabilità e la relazione tra tensione E_{i0} e corrente I_e diventa marcatamente non lineare.

Se la macchina ha funzionato almeno una volta, il magnetismo residuo dovuto al comportamento isteretico del materiale ferromagnetico produce un flusso residuo sufficiente a generare una piccola tensione a vuoto E_r anche con $I_e = 0$. Per tale motivo la caratteristica non parte dall'origine degli assi.

4.4 FUNZIONAMENTO A CARICO

4.4.1 Correnti di indotto

Il funzionamento a carico si ottiene connettendo i terminali di statore ad una rete in regime sinusoidale trifase, in modo che si producano correnti sinusoidali; avendo assunto gli avvolgimenti di indotto collegati a stella, la terna delle correnti degli avvolgimenti, o *correnti di indotto*, è data da una terna di correnti sfasate dell'angolo ϕ rispetto alla corrispondente f.e.m. a vuoto.

4.4.2 Effetti delle correnti di indotto e reattanza sincrona

Le correnti di indotto applicano al circuito magnetico una terna di f.m.m. che prende il nome di *reazione di indotto* e che si somma a quella di eccitazione, modificando la distribuzione spaziale dell'induzione al traferro: la distribuzione risultante di $B(9)$ rimane comunque approssimativamente sinusoidale con periodicità 2π e sincrona con il rotore, ma risulta deformata in funzione dell'intensità e dello sfasamento delle correnti di indotto.

Nel funzionamento a carico, tenendo conto che il flusso polare Φ_0 viene modificato, sia in modulo che in fase, per effetto del *flusso di reazione di indotto* Φ_r , la f.e.m. indotta, calcolata a vuoto nella sezione precedente (4.2.2.4), diviene:

$$\bar{E}_i = -j\omega k_s N_s \bar{\Phi} \quad \text{con} \quad \bar{\Phi} = \bar{\Phi}_0 + \bar{\Phi}_r \quad (4.4.2.1)$$

Con buona approssimazione, la *reazione di indotto* corrisponde ad una f.e.m. addizionale in ritardo temporale di un angolo elettrico pari a $\pi/2$ rispetto alla corrente di indotto. Pertanto la f.e.m. indotta risulterà essere esprimibile come l'effetto di un'opportuna *reattanza equivalente di reazione di indotto* X_i :

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{i0} - jX_i \bar{I} \quad (4.4.2.2)$$

A tale effetto si somma ovviamente quello della resistenza elettrica degli avvolgimenti R e quello della reattanza relativa al *flusso di dispersione* $X = \omega L$ (corrispondente alla quota di flusso prodotto dalle correnti di indotto che non si concilia con l'induttore). Pertanto la tensione risultante su una fase nel funzionamento a carico è esprimibile in forma fasoriale come:

$$\bar{E} = \bar{E}_i - (R + jX) \bar{I} = \bar{E}_{i0} - jX_i \bar{I} - (R + jX) \bar{I} \quad (4.4.2.3)$$

Definendo *reattanza sincrona* X_s la somma $X + X_i$, dalla (4.4.2.3) risulta che la tensione ai capi di un avvolgimento di statore a carico, è esprimibile semplicemente come:

$$\bar{E} = \bar{E}_{i0} - (R + jX_s) \bar{I} \quad (4.4.2.4)$$

Essendo sempre la resistenza $R \ll X_s$, risulta anche, con buona approssimazione,

$$\bar{E} = \bar{E}_{i0} - jX_s \bar{I} \quad (4.4.2.5)$$

La (4.4.2.5) costituisce un'espressione semplificata della tensione ai terminali degli avvolgimenti di indotto della macchina sincrona, la quale evidenzia che la tensione differisce dalla f.e.m. a vuoto per effetto della reazione di indotto, in modo dipendente dalle condizioni di carico.

4.5 COMPORTAMENTO ELETTRICO

4.5.1 Modello equivalente elettrico

In base alla (4.4.2.4), i tre avvolgimenti di indotto (collegati a stella) possono essere rappresentati come in Figura 4.5.1.1.

Se il comportamento della macchina trifase è simmetrico ed equilibrato, si può utilizzare lo schema equivalente monofase di Figura 4.5.1.2, al quale corrisponde il diagramma fasoriale di Figura 4.5.1.3, ove ϕ è lo sfasamento tra la tensione stellata \bar{E} e la corrente di linea \bar{I} . Da questo diagramma si deduce la relazione tra i valori efficaci della tensione a carico E ed a vuoto E_{i0} ; la differenza tra i due dipende dalle condizioni di carico (valore efficace I della corrente erogata e suo sfasamento ϕ), come illustrato in Figura 4.5.1.4. Analogamente a quanto osservato nel § 1.2.8.2 per i trasformatori, la tensione a carico può essere maggiore della tensione a vuoto

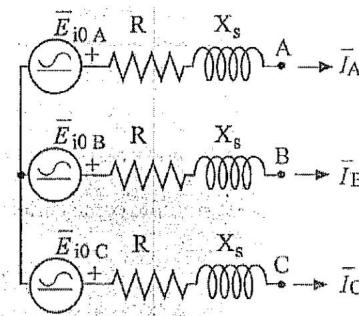


Figura 4.5.1.1

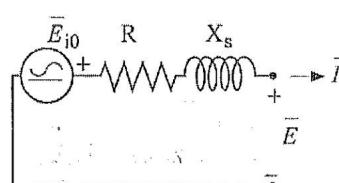


Figura 4.5.1.2

quando il carico è ohmico-capacitivo ($\varphi < 0$). Il comportamento della macchina, in funzionamento da generatore, è tanto migliore quanto più si avvicina a quello di un generatore ideale di tensione sinusoidale, nel quale la tensione erogata è indipendente dal carico. Per ottenere questo, la macchina è dotata di un regolatore che, acquisendo una misura di tensione ai terminali, regola in retroazione la corrente di eccitazione, che a sua volta modifica la E_{i0} in modo tale da riportare la E al valore desiderato.

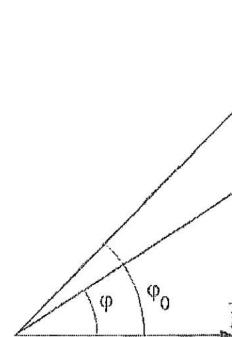


Figura 4.5.1.3

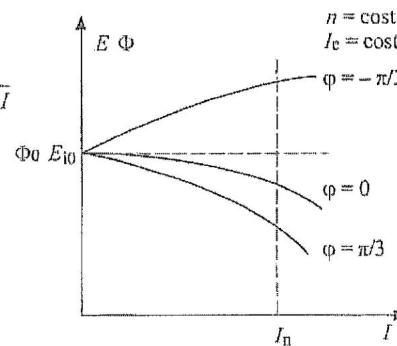


Figura 4.5.1.4

4.6 COMPORTAMENTO ELETROMECCANICO

4.6.1 Potenza elettrica erogata

Nel funzionamento a carico gli avvolgimenti di indotto scambiano potenza elettrica con la rete in regime sinusoidale alla quale sono connessi. Con riferimento allo schema equivalente di Figura 4.5.1.1, in funzionamento simmetrico ed equilibrato, le f.e.m. (4.2.2.4) e le relative correnti, danno luogo alla potenza elettrica generata (costante nel tempo):

$$P_g = 3 E_{i0} I \cos \varphi_0. \quad (4.6.1.1)$$

Questa *potenza elettrica* viene generata dalla conversione della *potenza meccanica* assorbita dalla macchina, la quale, trascurando gli attriti, è pari al prodotto della coppia elettromeccanica (resistente) per la velocità angolare di rotazione del rotore ω_r :

$$P_m = C \omega_r = P_g. \quad (4.6.1.2)$$

D'altra parte, la *potenza elettrica* (attiva e reattiva) erogata ai terminali della macchina vale rispettivamente:

$$P = 3 EI \cos \varphi; \quad Q = 3 EI \sin \varphi, \quad (4.6.1.3)$$

ove E è il valore efficace delle tensioni stellate e I quello delle correnti di linea.

Se trascuriamo anche le perdite per effetto Joule e per isteresi e correnti parassite interne alla macchina (percentualmente piuttosto piccole nelle macchine sincrone), la potenza elettrica generata P_g deve coincidere con la potenza attiva erogata P . Sotto tali ipotesi si ha dunque: $P_m \approx P_g \approx P$.

La coppia elettromeccanica resistente vale allora:

$$C = \frac{P_m}{\omega_r} \approx \frac{P_g}{\omega_r} \approx \frac{P}{\omega_r} = \frac{3EI \cos \varphi}{\omega_r}. \quad (4.6.1.4)$$

4.6.2 Rendimento

Nelle macchine sincrone, oltre alle perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di statore, alle perdite per isteresi e alle perdite per correnti parassite, occorre tener conto anche delle perdite P_{ecc} nella macchina eccitatrice che alimenta l'induttore. Tuttavia la potenza della macchina eccitatrice è sempre una frazione modesta della potenza nominale della macchina sincrona e di conseguenza le perdite P_{ecc} sono relativamente piccole.

Il rendimento dipende dalle dimensioni della macchina e anche dalle condizioni di carico, ossia dal valore efficace e dallo sfasamento φ della corrente di linea. A titolo di esempio, rendimenti a pieno carico e con fattore di potenza unitario per macchine di diversa potenza nominale sono indicati in Tabella 4.6.2.1.

P_n potenza nominale [kVA]	25	50	100	500	2.500	10.000
η rendimento [%]	89	91	92	94	95	98

Tabella 4.6.2.1

4.7 COMPORTAMENTO DINAMICO

4.7.1 Condizioni di funzionamento

Quando una macchina sincrona è connessa ad una rete trifase con tensione concatenata e frequenza imposte, si può considerare lo schema equivalente mo-

nofase (Fig. 4.5.1.2) e, trascurando la resistenza R , in accordo con la (4.4.2.5), si ottiene lo schema di Figura 4.7.1.1, ove la corrente ai terminali vale:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_{i0} - \bar{E}}{jX_s} = -j \frac{\Delta\bar{E}}{X_s}. \quad (4.7.1.1)$$

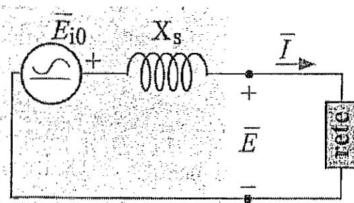


Figura 4.7.1.1



Figura 4.7.1.2

4.7.1.1 Funzionamento a vuoto

Se la f.e.m. indotta a vuoto \bar{E}_{i0} uguaglia la tensione \bar{E} della rete, (Fig. 4.7.1.2), per la (4.7.1.1) la corrente \bar{I} è nulla e nulle sono pure le potenze attiva e reattiva erogate. In questa condizione (trascurando le perdite), la potenza meccanica assorbita all'albero è nulla e l'eccitazione produce una terna di f.e.m. a vuoto pari alle tensioni stellate della rete.

4.7.1.2 Funzionamento da generatore

Se il generatore alimenta un carico resistivo, la corrente \bar{I} è in fase con \bar{E} (Fig. 4.7.1.3a), la f.e.m. indotta \bar{E}_{i0} anticipa sulla tensione stellata \bar{E} (angolo $\delta > 0$) e i due valori efficaci sono quasi uguali (Fig. 4.7.1.3a), cosicché la potenza erogata P è positiva e la macchina funziona da generatore. Per mantenere questa condizione di funzionamento con velocità angolare costante è necessario l'equilibrio delle coppie: essendo la coppia elettromeccanica resistente della macchina elettrica $C < 0$, al suo albero deve essere collegato un motore primo che, applicando un'uguale coppia motrice, tenga in rotazione la macchina, fornendo la potenza meccanica necessaria.

Le Figure 4.7.1.3c e 4.7.1.3d illustrano due esempi di macchina funzionante da generatore su carichi diversi: un carico ohmico-induttivo ha un effetto *magnetizzante*, per compensare il quale la macchina deve essere sovraeccitata aumentando \bar{E}_{i0} e la corrente di eccitazione I_e (come già osservato nel § 4.5.1).

Viceversa, un carico ohmico-capacitivo ha un effetto *magnetizzante*, per compensare il quale la macchina deve essere sottoeccitata riducendo \bar{E}_{i0} e la corrente di eccitazione I_e .

4.7.1.3 Funzionamento da motore

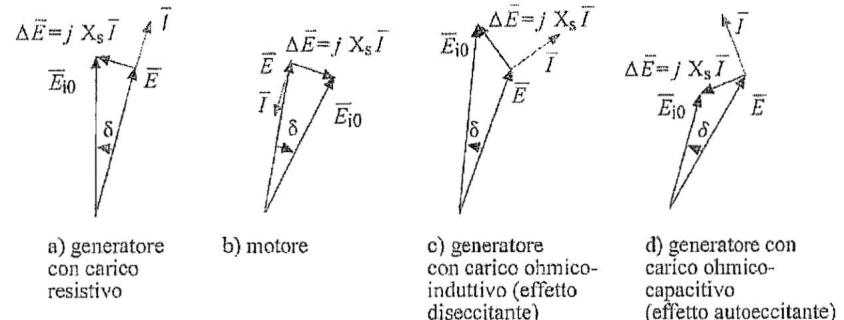


Figura 4.7.1.3

Se la f.e.m. indotta \bar{E}_{i0} ritarda sulla tensione stellata \bar{E} (angolo $\delta < 0$) e i due valori efficaci sono quasi uguali, (Fig. 4.7.1.3b), per la (4.7.1.1) la corrente \bar{I} risulta non nulla e circa in opposizione di fase rispetto a \bar{E} , cosicché la potenza erogata P è negativa e la macchina funziona da motore. Per mantenere questa condizione di funzionamento con velocità angolare costante è necessario l'equilibrio delle coppie: essendo la coppia elettromeccanica resistente della macchina elettrica $C < 0$, al suo albero deve essere collegato un carico meccanico che, applicando un'uguale coppia resistente, ne freni la rotazione, assorbendo la potenza meccanica che il motore rende disponibile.

4.7.2 Equilibrio meccanico e stabilità

Nella generica condizione di funzionamento illustrata dal diagramma fasoriale di Figura 4.7.2.1a, per i valori efficaci vale la relazione $\Delta E = X_s I$, ed inoltre si deduce $X_s I \cos \varphi = h = E_{i0} \sin \delta / X_s$, ovvero $I \cos \varphi = E_{i0} \sin \delta / X_s$; sostituendo nella (4.6.1.4) si ottiene una nuova espressione della coppia elettromeccanica resistente C :

$$C \approx \frac{3E_{i0} E}{\omega_r X_s} \sin \delta. \quad (4.7.2.1)$$

L'andamento della coppia elettromeccanica resistente in funzione dell'angolo δ è quindi del tipo illustrato in Figura 4.7.2.1b. La coppia meccanica fornita dal motore primo (nel funzionamento da generatore) o applicata dal carico meccanico (nel funzionamento da motore) è indipendente da δ ($dC/d\delta = 0$) ed è quindi rappresentata in figura da segmenti orizzontali. I due punti di equilibrio compresi nelle aree grigie sono punti di equilibrio stabile: infatti, una deviazione dall'equilibrio dovuta

ad una temporanea perturbazione è seguita da un ritorno nella posizione di equilibrio. Questo non avviene al di fuori delle aree grigie. Ciò significa che, nel campo di variazione di δ corrispondente all'area grigia ($-\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2$), ove $dC/d\delta > 0$, l'equilibrio è stabile.

4.7.2.1 Variazioni dell'equilibrio meccanico

Consideriamo una macchina funzionante da generatore, collegata ad una rete elettrica e tenuta in rotazione (a velocità costante $n = 60 f/p$ e angolo $0 < \delta < \pi/2$) mediante un motore primo esterno, ad esempio una turbina idraulica o a vapore. In tali condizioni il motore primo fornisce al rotore una coppia motrice positiva esattamente pari alla coppia elettromeccanica resistente (Fig. 4.7.2.1b) data dalla (4.7.2.1).

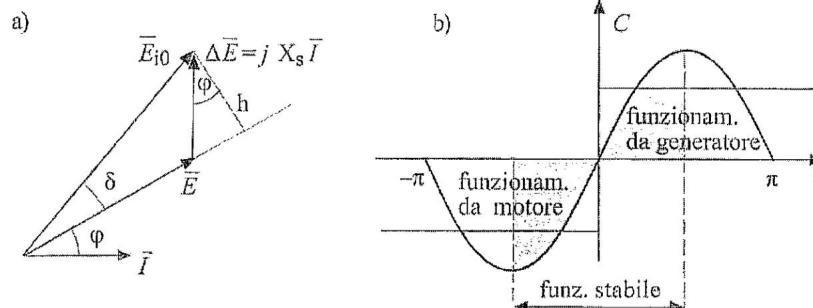


Figura 4.7.2.1

Se, per qualche ragione, la coppia motrice fornita dalla turbina aumenta, il rotore tende ad accelerare e l'angolo δ tra il vettore \bar{E}_{i0} e il vettore \bar{E} aumenta (Fig. 4.7.2.2a). Di conseguenza, aumenta anche la potenza elettrica attiva e così pure la coppia elettromeccanica resistente della macchina C , cosicché si raggiunge una nuova situazione di equilibrio. Questo è vero solamente se la coppia motrice rimane inferiore al valore massimo della coppia resistente (che si ottiene per $\delta = \pi/2$, Fig. 4.7.2.1); se la coppia motrice supera tale valore, la macchina *perde il sincronismo*, la coppia elettromeccanica si annulla e l'alternatore accelera fino all'intervento di una protezione.

Se invece la coppia motrice fornita dalla turbina diminuisce, il rotore tende a decelerare, δ diminuisce e si instaura nuovamente una situazione di equilibrio con una coppia resistente più bassa.

Nel funzionamento da motore, invece, lo statore viene alimentato con una terna di correnti trifasi e si instaura un campo magnetico rotante, che *trascina* il flusso di rotore, il quale risulta in ritardo. L'angolo δ tra il vettore \bar{E}_{i0} e il vettore \bar{E} risulta negativo ($\delta < 0$) (Fig. 4.7.2.2b), la macchina produce una coppia motrice uguale alla

coppia meccanica resistente entrambe negative, (Fig. 4.7.2.1b). In tali condizioni la macchina assorbe potenza elettrica e la converte in potenza meccanica, mantenendo in rotazione l'albero a velocità costante.

Se C_m aumenta, l'angolo δ diviene ancor più negativo. Di conseguenza la coppia C cresce in valore assoluto e si raggiunge una nuova situazione di equilibrio, in cui la macchina assorbe una potenza elettrica maggiore. Questo è vero solamente se la coppia meccanica resistente rimane in modulo inferiore al valore massimo della coppia elettromeccanica (che si ottiene per $\delta = -\pi/2$, Fig. 4.7.2.1); se la coppia resistente supera in modulo tale valore, la macchina *perde il sincronismo*, la coppia elettromeccanica si annulla e il motore si ferma.

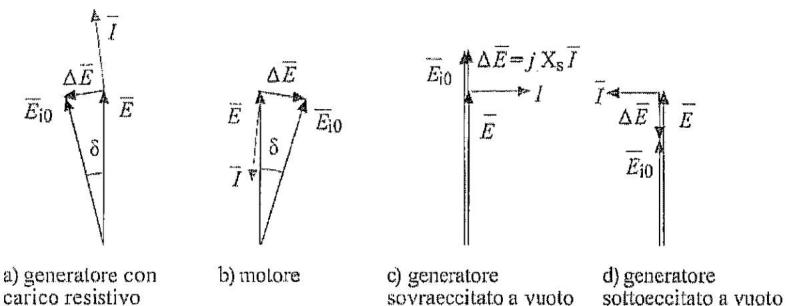


Figura 4.7.2.2

4.7.2.2 Variazioni dell'equilibrio elettrico

Si supponga ora (per semplicità) che la macchina stia funzionando a vuoto e che, per qualche ragione, la corrente di eccitazione venga aumentata: \bar{E}_{i0} aumenta rimanendo in fase con \bar{E} e pure $\Delta\bar{E}$ risulta in fase con \bar{E} (Fig. 4.7.2.2c). La corrente I , che per la (4.7.1.1) è comunque in quadratura in ritardo su $\Delta\bar{E}$, risulta in ritardo anche su \bar{E} ($\varphi \cong \pi/2$): la reazione di indotto ha effetto smagnetizzante, tale da opporsi all'incremento di f.e.m.

Se viceversa la corrente di eccitazione diminuisce, \bar{E}_{i0} riduce il valore efficace e la tensione $\Delta\bar{E}$ risulta in opposizione di fase su \bar{E} (Fig. 4.7.2.2d); La corrente I risulta in quadratura in anticipo su \bar{E} ($\varphi \cong -\pi/2$): la reazione di indotto ha effetto magnetizzante, tale da opporsi al decremento di f.e.m.

Quindi la macchina, entro i limiti indicati, è stabile sia rispetto all'equilibrio meccanico che all'equilibrio elettrico, perché ad ogni variazione reagisce portandosi spontaneamente in una nuova condizione di equilibrio. In particolare l'adeguamento ad un nuovo equilibrio meccanico avviene attraverso un transitorio nel quale la velocità di rotazione presenta fluttuazioni smorzate intorno alla velocità di sincronismo n (dette *oscillazioni pendolari*).

4.7.3 Regolazione dell'alternatore

Per quanto illustrato nel precedente paragrafo, variando lo sfasamento δ tra le terne di f.e.m. indotte a vuoto e di tensioni ai terminali, è possibile variare la potenza meccanica convertita in elettrica o viceversa e quindi la potenza attiva scambiata. Invece variando la corrente di eccitazione, e quindi il valore efficace della f.e.m. indotta a vuoto, è possibile variare la potenza reattiva scambiata.

Gli alternatori sono tipicamente connessi a reti trifasi che ammettono limitate variazioni nei livelli di tensione e ancora più limitate variazioni di frequenza; si può quindi assumere che frequenza e tensione ai terminali dell'alternatore siano fissate. Tali vincoli impongono due condizioni:

- equilibrio meccanico: la potenza meccanica fornita dal motore primo e convertita in potenza elettrica generata P_g deve essere adeguata alla potenza elettrica $P = \sqrt{3} V I \cos \phi$ erogata ai terminali, in base alle esigenze di carico;
- equilibrio elettrico: la f.e.m. indotta a vuoto, e quindi la corrente di eccitazione, devono essere regolate in modo da ottenere i particolari valori di I e ϕ imposti dalle esigenze di carico.

La macchina sincrona permette di modificare con ampia flessibilità la potenza elettrica scambiata. Dato che in generale le condizioni di carico (cioè le potenze attiva e reattiva richieste) variano in continuazione, tali regolazioni devono essere garantite con continuità tanto al motore primo che all'eccitatrice.

4.7.4 Avviamento

Dato che la velocità di rotazione della macchina sincrona è proporzionale alla frequenza, $n = 60 f/p$, essa deve essere costante quando i terminali sono connessi ad una rete in corrente alternata a frequenza fissata. In tal caso la macchina sincrona può essere avviata accoppiandola meccanicamente ad un motore che la acceleri fino alla velocità di sincronismo, dopo di che essa può essere collegata alla rete (*manovra di parallelo*). Nel caso degli alternatori questa funzione è svolta dallo stesso motore primo che fornisce la potenza meccanica (ad esempio una turbina).

I motori sincroni non possono essere avviati mediante connessione diretta alla rete, in quanto, a rotore fermo o a velocità inferiore a quella di sincronismo, la coppia elettromeccanica è nulla.

In passato i motori sincroni venivano avviati facendoli funzionare come macchine asincrone (vedi Cap. 5) oppure mediante un piccolo motore ausiliario. In entrambi i casi si trattava di soluzioni decisamente poco pratiche.

Attualmente la quasi totalità dei motori sincroni sono alimentati tramite inverter trifasi, che forniscono tensioni alternate di frequenza variabile: incrementando tale frequenza da zero fino al valore desiderato, si ottiene una velocità di sincronismo che cresce progressivamente.

Inoltre, a motore avviato, la regolazione della frequenza permette di variare a piacere la velocità di regime. Regolando il valore efficace e la fase delle tensioni sia durante l'avviamento che a regime, si ottengono coppie di valore voluto alle diverse velocità; il funzionamento del motore sincrono risulta così molto flessibile e trova importanti applicazioni, ad esempio nella trazione ferroviaria e negli azionamenti delle macchine utensili e dei robot.

4.8 CONDENSATORE ROTANTE

Se una macchina sincrona è sovrecitata (Fig. 4.7.2.2c), essa eroga potenza reattiva positiva, $Q > 0$, ovvero assorbe potenza reattiva negativa: si comporta quindi come un carico capacitivo nel quale la potenza reattiva capacitiva può essere regolata, a parità di valore efficace delle tensioni ai terminali, sovrecitandola opportunamente.

In tali condizioni di funzionamento, un generatore sincrono può fungere da *condensatore rotante* contribuendo al rifasamento delle reti trifasi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica.

MACCHINE ASINCRONE

5.1 GENERALITÀ

Le *macchine asincrone* sono macchine elettriche rotanti che possono funzionare sia come generatori che come motori. Tuttavia, a motivo delle caratteristiche di semplicità costruttiva e robustezza, l'applicazione di gran lunga più importante e diffusa è quella come motore, che viene anche denominato *motore ad induzione* (Fig. 5.1.1).

Le macchine asincrone sono basate sul concetto di campo magnetico rotante. Esse sono tipicamente trifasi e possono raggiungere potenze fino a diversi megawatt. Nel caso di potenze modeste (da pochi watt fino ad alcune centinaia di watt), si utilizzano spesso un'alimentazione monofase e accorgimenti tecnologici atti a realizzare comunque un campo magnetico rotante. La trattazione sviluppata nel seguito fa specifico riferimento ai motori trifasi, mentre i motori monofasi sono trattati nel § 5.3.

5.1.1 Statore

Lo *statore* è del tutto simile allo statore delle macchine sincrone: è laminato e presenta lungo la superficie interna le cave che alloggiano i tre *avvolgimenti di statore* (Fig. 5.1.2 e 5.1.3). La periodicità di questi determina il numero p di coppie polari (e $2p$ di poli). A differenza di quanto avviene nelle macchine sincrone, nelle macchine asincrone l'avvolgimento di statore costituisce di norma l'*induttore*; a tale disposizione si fa riferimento nel seguito.

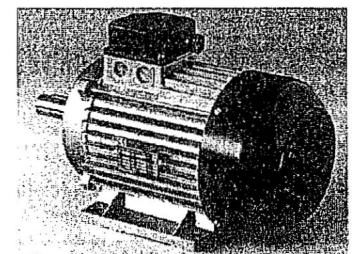


Figura 5.1.1 Motore asincrono di potenza medio-piccola (5,5 kW).

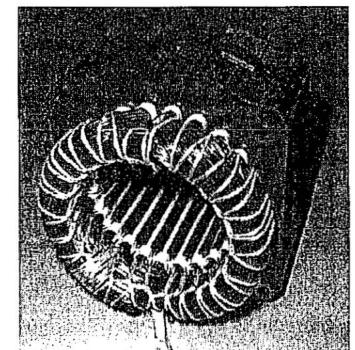
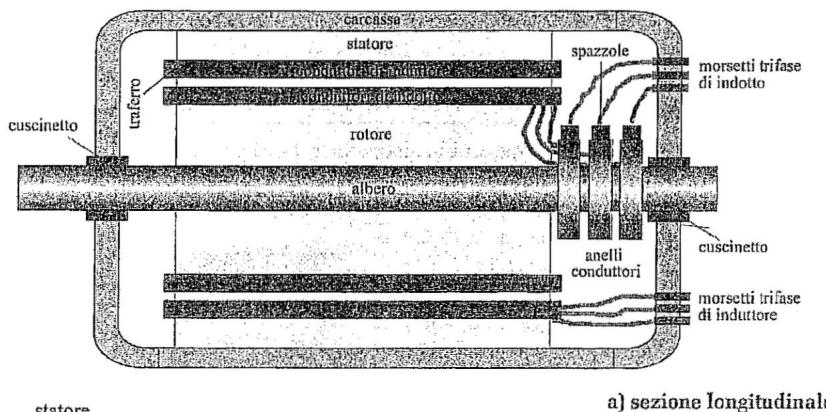


Figura 5.1.2 Statore di macchina asincrona.

5.1.2 Rotore

Il rotore è pure laminato e presenta lungo la superficie esterna le cave che alloggiano gli *avvolgimenti di rotore o di indotto*. Il *traferro* ha spessore che varia da qualche decimo di millimetro, per piccoli motori, fino a qualche millimetro per motori di elevata potenza. In relazione alla tipologia dell'avvolgimento di rotore, le macchine asincrone possono essere a *rotore avvolto* o a *gabbia di scoiattolo*.

5.1.2.1 Rotore avvolto



a) sezione longitudinale

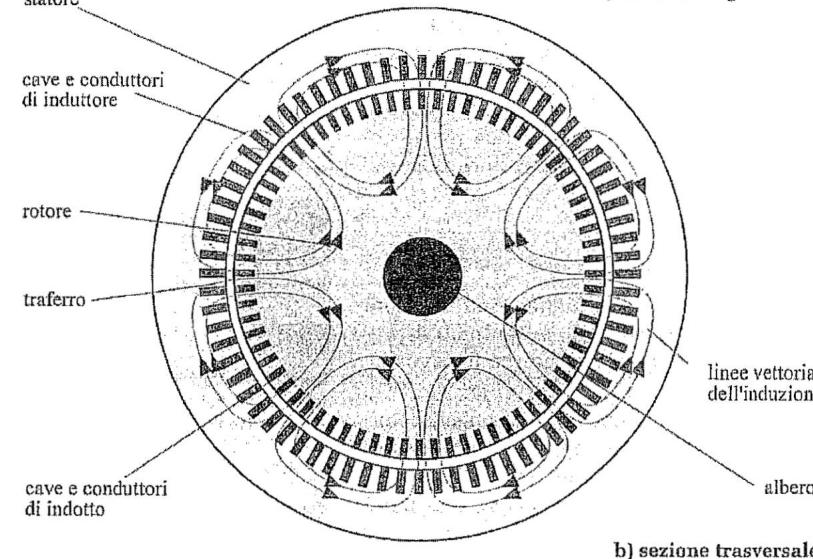


Figura 5.1.3 Schema concettuale di una macchina asincrona avente $p = 4$.

In questo tipo di macchina il rotore contiene tre avvolgimenti analoghi a quelli di statore, con uguale numero di poli. I tre avvolgimenti sono connessi a stella e i tre terminali liberi possono essere collegati in cortocircuito, oppure a tre *anelli metallici*, calettati sull'albero (Fig. 5.1.3), i quali, tramite tre *spazzole* e relativi contatti strisciante, consentono di collegare gli avvolgimenti di rotore ad un *reostato di avviamento* (§ 5.2.8).

5.1.2.2 Rotore a gabbia di scoiattolo

In questo tipo di rotore ogni cava alloggia un conduttore o *sbarra*, normalmente in alluminio pressofuso. Tutte le sbarre sono collegate tra loro in corrispondenza di ciascuna testata mediante due anelli che le chiudono permanentemente in cortocircuito. Questo tipo di rotori viene denominato a *gabbia di scoiattolo* (Fig. 5.1.4 e 5.1.5a).

Talvolta in ciascuna cava sono alloggiate due sbarre, una esterna di piccola sezione e una interna di sezione molto maggiore, realizzando così due gabbie coassiali (Fig. 5.1.5b). Tutte le sbarre sono collegate tra loro in corrispondenza delle testate mediante anelli che le chiudono permanentemente in cortocircuito. Questo tipo di rotore viene denominato a *doppia gabbia*.

In generale, le macchine asincrone a gabbia di scoiattolo sono preferite a quelle a rotore avvolto per la loro semplicità costruttiva e robustezza.

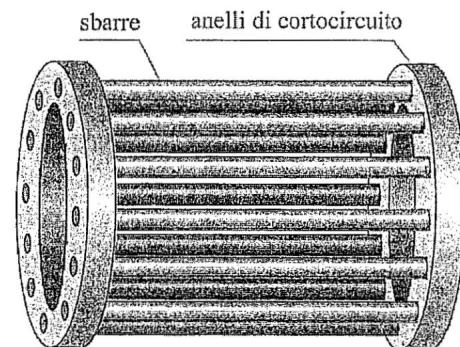
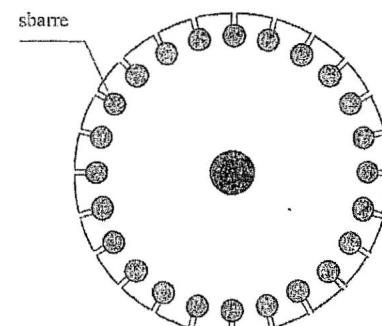
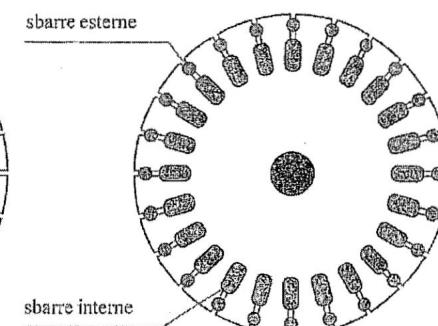


Figura 5.1.4 Sbarre conduttrici in un rotore a gabbia di scoiattolo.



a) rotore a gabbia singola



b) rotore a doppia gabbia

Figura 5.1.5

5.1.3 Valori nominali

Anche in una macchina asincrona i valori nominali individuano i parametri operativi ai quali corrisponde il funzionamento ottimale della macchina.

I principali valori nominali della macchina asincrona sono elencati in Tabella 5.1.1.1.

P_n	potenza nominale [W]
$V_n = \sqrt{3}E_n$	tensione concatenata nominale [V]
I_n	corrente nominale [A]
$\cos\varphi_n$	fattore di potenza nominale
f_n	frequenza nominale [Hz]
p	numero di coppie polari
n_n	velocità nominale di rotazione [giri/minuto]
C_n	coppia nominale all'albero [Nm]

Tabella 5.1.1.1

Tensione e corrente nominali hanno significato di valori efficaci; la potenza nominale ha significato di potenza elettrica convertita in potenza meccanica (è pertanto misurata in W). Trascurando le perdite, valgono le relazioni:

$$P_n = \sqrt{3} V_n I_n \cos\varphi_n = 3 E_n I_n \cos\varphi_n = C_n \frac{2\pi}{60} n_n \quad (5.1.1.1)$$

5.2 MACCHINA ASINCRONA TRIFASE

Si considera nel seguito una macchina asincrona trifase avente numero di coppie polari pari a p e rotore avvolto. Assumiamo che gli avvolgimenti statorici e rotorici siano collegati a stella.

5.2.1 Campo magnetico rotante

Quando i tre avvolgimenti statorici (aventi p coppie polari) sono alimentati con una terna simmetrica di correnti sinusoidali di pulsazione ω , essi danno origine ad una distribuzione complessiva di induzione magnetica avente periodicità pari al passo polare 2π (Fig. 5.1.3), che ruota rigidamente, ossia senza deformarsi, in direzione azimutale con velocità angolare:

$$\omega_c = \frac{\omega}{p}; \quad (5.2.1.1)$$

tal distribuzione, che prende il nome di *campo magnetico rotante*, è la stessa che abbiamo considerato per effetto delle correnti di indotto nelle macchine sincrone.

La velocità di rotazione del campo magnetico rotante (o velocità di sincronismo) si esprime normalmente in giri al minuto:

$$n_c = 60 \frac{\omega_c}{2\pi} = 60 \frac{\omega}{2\pi p} = \frac{60}{p} f, \quad (5.2.1.2)$$

ove $f = \omega/2\pi$ è la frequenza di alimentazione. Dunque il campo ruota tanto più lentamente quanto maggiore è il numero di poli; la massima velocità di rotazione si ottiene con una macchina a due poli per la quale risulta $n_c = 3000$ giri/minuto alla frequenza industriale $f = 50$ Hz.

5.2.2 Rotore fermo: circuito equivalente a vuoto e in cortocircuito

Consideriamo inizialmente una macchina con rotore fermo e avvolgimenti rotorici aperti, in modo che le correnti di indotto siano nulle. In modo analogo a quanto illustrato per lo statore delle macchine sincrone, il campo magnetico rotante, prodotto dagli avvolgimenti di statore alimentati con una terna simmetrica di correnti a frequenza f , induce sia negli avvolgimenti di statore che in quelli di rotore un sistema di f.e.m. sinusoidali a frequenza f , esprimibili, in accordo con la (4.4.2.1), come:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{is} &= -j\omega k_s N_s \bar{\Phi} \\ \bar{E}_{ir} &= -j\omega k_r N_r \bar{\Phi}, \end{aligned} \quad (5.2.2.1)$$

dove:

- ω pulsazione di alimentazione,
- Φ flusso polare,
- N_s numero di conduttori in serie per fase di statore,
- N_r numero di conduttori in serie per fase di rotore,
- k_s fattore di avvolgimento di statore,
- k_r fattore di avvolgimento di rotore.

Le (5.2.2.1) mostrano che le f.e.m. indotte stanno tra loro in rapporto costante. Pertanto la macchina asincrona trifase, a rotore fermo, si comporta come un trasformatore trifase i cui primari e secondari sono costituiti rispettivamente dagli avvolgimenti di statore e di rotore.

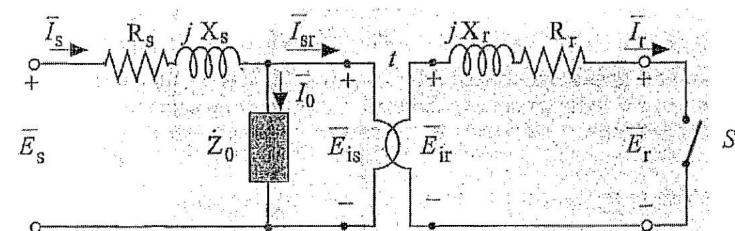


Figura 5.2.2.1 Circuito equivalente di una macchina asincrona a rotore fermo.

In tale condizione, il funzionamento della macchina asincrona è descrivibile mediante lo schema equivalente monofase di Figura 5.2.2.1, con l'interruttore S aperto, del tutto identico a quello di un trasformatore a vuoto. In esso \bar{E}_s ed \bar{E}_r rappresentano le tensioni stellate, presenti ai terminali dell'avvolgimento di statore (il primario) e dell'avvolgimento di rotore (il secondario), R_s e R_r sono le resistenze, $X_s = \omega L_{sd}$ e $X_r = \omega L_{rd}$ le reattanze di dispersione degli avvolgimenti rispettivamente di statore e di rotore; Z_0 è l'impedenza a vuoto di statora.

Può quindi essere definito il rapporto di trasformazione del motore asincrono con avvolgimenti statorici e rotorici trifasi:

$$t = \frac{\bar{E}_{is}}{\bar{E}_{ir}} = \frac{k_s N_s}{k_r N_r} \quad (5.2.2.2)$$

Avendo assunto gli avvolgimenti rotorici aperti, si ha $\bar{I}_s = \bar{I}_{sr} = 0$ e la corrente di statora, detta corrente a vuoto, vale:

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_{is}}{Z_0}; \quad (5.2.2.3)$$

la corrispondente tensione stellata applicata all'avvolgimento statorico è quindi:

$$\bar{E}_s = \bar{E}_{is} + (R_s + jX_s)\bar{I}_s. \quad (5.2.2.4)$$

Le precedenti considerazioni valgono anche per il rotore a gabbia di scoiattolo. In questo caso ciascuna sbarra costituisce una singola fase. Detto m_r il numero di sbarre di rotore in corrispondenza di un passo polare, che è quindi anche il numero di fasi rotoriche, essendo $N_r = 1$ e $k_r = 1$, la seconda delle (5.2.2.1) diventa $\bar{E}_{ir} = -j\omega\bar{\Phi}$ e il rapporto di trasformazione (5.2.2.2) diventa

$$t = \frac{\bar{E}_{is}}{\bar{E}_{ir}} = \frac{3k_s N_s}{m_r} \quad (5.2.2.5)$$

Se si mantiene fermo il rotore e si cortocircuitano gli avvolgimenti rotorici (interruttore S chiuso), dal circuito equivalente di Figura 5.2.2.1 si deduce che la corrente negli avvolgimenti di rotore vale:

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{E}_{ir}}{R_r + jX_r}; \quad (5.2.2.6)$$

Questo vale anche nel caso di rotore a gabbia di scoiattolo, nel quale le sbarre sono connesse a stella in corrispondenza di un anello e cortocircuitate in corrispondenza dell'altro.

5.2.3 Rotore in moto: scorrimento e circuito equivalente

Le correnti che si manifestano negli avvolgimenti rotorici (correnti di indotto) interagiscono con l'induzione magnetica generando forze elettrodinamiche e una coppia elettromeccanica che, coerentemente con la legge di Lenz, tende a ridurre

la variazione del flusso concatenato e quindi a far ruotare il rotore nella direzione del campo magnetico rotante.

Se il rotore è libero di ruotare, esso viene accelerato e tende a portarsi al *sincronismo*, ossia a raggiungere una velocità di rotazione uguale a quella del campo rotante: in questa condizione gli avvolgimenti di rotore non sono più sottoposti a variazioni di flusso concatenato e quindi si annullano tanto le loro f.e.m. che le loro correnti; si realizza così ancora una condizione simile al *funzionamento a vuoto* di un trasformatore.

Per analizzare il comportamento della macchina alla generica *velocità di rotazione del rotore* (indicata con n_r se espressa in giri al minuto e con ω_r se espressa in radienti al secondo) è utile introdurre un parametro denominato *scorrimento*, che esprime la differenza relativa tra la velocità del campo rotante n_c e quella del rotore n_r :

$$s = \frac{n_c - n_r}{n_c} = \frac{\omega_c - \omega_r}{\omega_c} \quad (5.2.3.1)$$

tenuto conto della (5.2.1.1) si ottiene anche:

$$n_r = n_c(1-s), \quad \omega_r = \omega_c(1-s) = \frac{\omega_c}{p}(1-s) \quad (5.2.3.2)$$

Tra la velocità di rotazione del rotore e lo scorrimento sussistono le seguenti relazioni, valide in condizioni particolari:

$$\begin{cases} \text{con rotore fermo} & n_r = 0 \Leftrightarrow s = 1 \\ \text{alla velocità di sincronismo} & n_r = n_c \Leftrightarrow s = 0 \end{cases} \quad (5.2.3.3)$$

Quando il rotore è in moto, la velocità relativa tra rotore e campo magnetico determina la frequenza f_s con cui varia l'induzione nel rotore stesso; tale frequenza può essere espressa in funzione dello scorrimento con la relazione:

$$f_s = sf \quad (5.2.3.4)$$

Le f.e.m. indotte nel rotore e le reattanze di dispersione secondarie, essendo proporzionali alla frequenza, sono pure esprimibili in funzione dello scorrimento:

$$\begin{cases} \bar{E}_{ir} \text{ (in moto)} = s \bar{E}_{ir} \text{ (fermo)} \\ X_r \text{ (in moto)} = s X_r \text{ (fermo)} \end{cases} \quad (5.2.3.5)$$

Di conseguenza, il circuito equivalente della macchina asincrona con rotore fermo di Figura 5.2.2.1 si modifica, con rotore in rotazione, come mostrato in Figura 5.2.3.1.

Usando semplici identità algebriche, la corrente rotorica può essere riscritta anche come:

$$\bar{I}_r = \frac{s \bar{E}_{ir}}{R_r + j s X_r} = \frac{\bar{E}_{ir}}{\frac{R_r}{s} + j X_r} = \frac{\bar{E}_{ir}}{R_r + R_r \frac{1-s}{s} + j X_r} \quad (5.2.3.6)$$

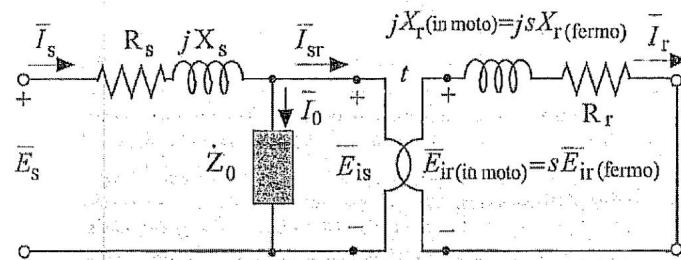


Figura 5.2.3.1 Circuito equivalente di una macchina asincrona con avvolgimenti di rotore in cortocircuito e rotore in movimento.

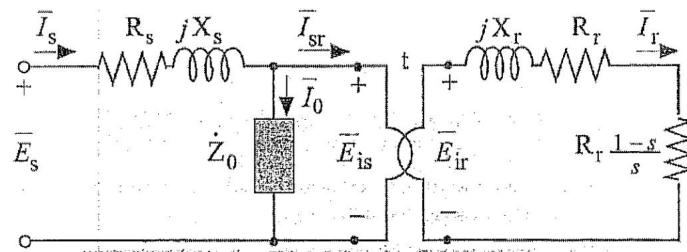


Figura 5.2.3.2 Circuito equivalente di una macchina asincrona con avvolgimenti di rotore in cortocircuito e rotore in movimento.

e perciò il comportamento della macchina asincrona è descritto anche dal circuito equivalente di Figura 5.2.3.2.

Confrontando questo circuito equivalente con quello della Figura 5.2.2.1 si deduce che il funzionamento con rotore in moto è descritto da una rete equivalente simile a quella con rotore fermo e in cortocircuito, ma dove si è introdotta una resistenza aggiuntiva rotorica pari a $R_r \frac{1-s}{s}$. La corrente di statore vale:

$$\bar{I}_s = \bar{I}_0 + \bar{I}_{sr} = \bar{I}_0 + \frac{1}{t} \bar{I}_r \quad (5.2.3.7)$$

Come per il trasformatore statico, lo schema equivalente può essere riportato al primario, eliminando il trasformatore ideale e sostituendo alla resistenza e reattanza del rotore le corrispondenti grandezze riportate a statore:

$$R_{sr} = t^2 R_r; \quad X_{sr} = t^2 X_r; \quad R_{sr} \frac{1-s}{s} = t^2 R_r \frac{1-s}{s} \quad (5.2.3.8)$$

Si ottiene allora la rete equivalente monofase riportata a primario mostrata in Figura 5.2.3.3.

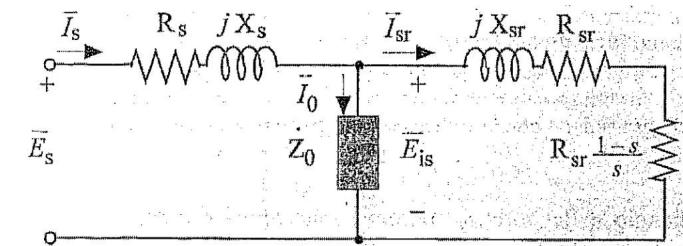


Figura 5.2.3.3

Dei due termini resistivi che compongono le (5.2.3.8), il primo, indipendente da s , costituisce la resistenza dell'avvolgimento rotorico; il secondo, $R_{sr}(1-s)/s$, dipende dallo scorrimento s , e quindi dalla velocità di rotazione del rotore. Si verifica facilmente che:

- quando il rotore è in moto alla velocità di sincronismo ($n_r = n_c$, $s = 0$), $R_{sr}(1-s)/s$ diverge e quindi la corrente secondaria si annulla: si ritrovano lo schema e le condizioni di funzionamento a vuoto descritti nel paragrafo precedente;
- quando il rotore è fermo ($n_r = 0$, $s = 1$), $R_{sr}(1-s)/s$ risulta nulla e quindi la macchina è in cortocircuito: si ritrovano lo schema e le condizioni di funzionamento in cortocircuito, pure descritti nel paragrafo precedente.

5.2.4 Circuito equivalente semplificato

Come nel caso del trasformatore statico, trascurando la caduta di tensione dovuta alla circolazione della corrente a vuoto \bar{I}_0 nell'impedenza di statore $\dot{Z}_s = R_s + jX_s$, il circuito equivalente monofase di Figura 5.2.3.3 può essere semplificato, portando l'impedenza \dot{Z}_0 a monte dell'impedenza \dot{Z}_s , ottenendo quindi lo schema di Figura 5.2.4.1.

Ne conseguire che la corrente di rotore riportata a statore vale:

$$\bar{I}_{sr} = \frac{\bar{E}_s}{R_s + R_{sr} + R_{sr} \frac{1-s}{s} + j(X_s + X_{sr})} \quad (5.2.4.1)$$

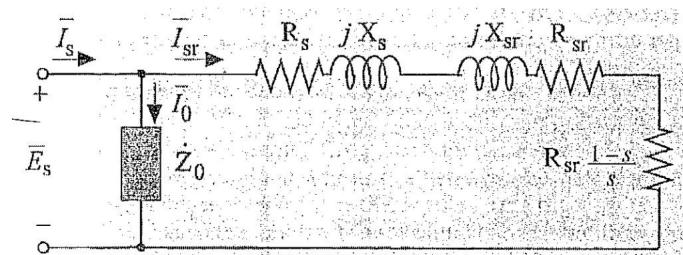


Figura 5.2.4.1 Circuito equivalente monofase semplificato di una macchina asincrona.

In una macchina asincrona la corrente a vuoto \bar{I}_0 risulta percentualmente più elevata di quella di un trasformatore statico di pari potenza, a causa della presenza del traferro, che comporta un più elevato valore di riluttanza del circuito magnetico e quindi un minor valore di reattanza a vuoto. Pertanto la semplificazione introdotta è più grossolana che in un trasformatore, ma viene generalmente considerata accettabile.

5.2.5 Bilancio delle potenze, potenza meccanica e coppia erogate da una macchina asincrona

In generale, la potenza elettrica assorbita da una macchina asincrona trifase dipende dai valori efficaci della tensione e della corrente ai terminali di alimentazione E_s , I_s , e dall'angolo di sfasamento φ secondo l'espressione:

$$\begin{cases} P = 3 E_s I_s \cos \varphi \\ Q = 3 E_s I_s \sin \varphi \end{cases} \quad (5.2.5.1)$$

Dal circuito equivalente sopra descritto, si deduce che la frazione di potenza attiva che va perduta per isteresi e correnti parassite nel materiale ferromagnetico che costituisce lo statore ed il rotore vale:

$$P_{Fe} = 3 E_s I_0 \cos \varphi \quad (5.2.5.2)$$

Inoltre le potenze che vengono dissipate negli avvolgimenti statorici e rotorici valgono rispettivamente:

$$\begin{cases} P_{Cus} = 3 R_s I_{sr}^2 \\ P_{Cur} = 3 R_{sr} I_{sr}^2 \end{cases} \quad (5.2.5.3)$$

Considerando il bilancio delle potenze, la potenza elettrica apparentemente assorbita dalla resistenza virtuale $R_{sr}(1-s)/s$, che vale:

$$P_m = 3 R_{sr} \frac{1-s}{s} I_{sr}^2 \quad (5.2.5.4)$$

non corrisponde ad alcuna perdita e perciò tale potenza P_m rappresenta la potenza elettrica che viene convertita in potenza meccanica. Trascurando le perdite meccaniche per attrito e ventilazione, essa coincide con la potenza meccanica erogata all'albero del rotore.

La (5.2.5.4) indica che la macchina asincrona può erogare potenza meccanica $P_m > 0$ per qualunque valore dello scorrimento s compreso tra $s=0$ ($n_r=n_c$) e $s=1$ ($n_r=0$). Nelle due condizioni di funzionamento estreme, a vuoto ($s=0$) e in cortocircuito ($s=1$), tale potenza si annulla, risultando rispettivamente $I_{sr}=0$ e $R_{sr}(1-s)/s=0$. Per ogni altro valore dello scorrimento risulta $P_m \neq 0$.

Pertanto, a differenza della macchina sincrona, nella macchina asincrona la velocità del rotore non è pari a quella del campo rotante; da tale caratteristica deriva il nome di macchina asincrona.

5.2.5.1 Coppia elettromeccanica

Come in qualunque macchina rotante, la coppia elettromeccanica C sviluppata è il rapporto tra la potenza meccanica P_m e la velocità angolare di rotazione ω_r ; utilizzando le relazioni (5.2.5.4), (5.2.4.1) e (5.2.3.2), C si può esprimere come:

$$C = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{\frac{3 R_{sr}}{s} I_{sr}^2}{\frac{\omega}{p} (1-s)} = \frac{3 p R_{sr} I_{sr}^2}{\omega s} \quad (5.2.5.5)$$

5.2.5.2 Rendimento

Avendo assunto che le perdite meccaniche siano trascurabili (potenza meccanica erogata all'albero coincidente con la potenza elettrica convertita in potenza meccanica), tenendo conto della dissipazione di potenza nel materiale ferromagnetico (5.2.5.2) e nei conduttori di statore e di rotore (5.2.5.3), il rendimento vale:

$$\eta = \frac{P_m}{P} = \frac{P_m}{P_m + P_{Fe} + P_{Cus} + P_{Cur}} \quad (5.2.5.6)$$

Rendimento e scorrimento dipendono dalle dimensioni della macchina e dalle condizioni di funzionamento. Valori tipici in condizioni di lavoro nominali sono elencati in Tabella 5.2.5.1.

Potenza nominale P_n [kW]	1	5	10	50	100	500
Scorrimento nominale s_n [%]	7	4,5	4	3	2,5	1,6
Rendimento η [%]	75	84	88	93	94	97

Tabella 5.2.5.1 Rendimenti e scorrimenti tipici di motori asincroni a 4 poli.

5.2.6 Diagramma circolare di Ossanna

Utilizzando la rete monofase equivalente semplificata di Figura 5.2.4.1, si può costruire un utile diagramma, detto *diagramma circolare* (o *polare*) di Ossanna, che permette di determinare le prestazioni e i parametri di funzionamento della macchina in ogni condizione di lavoro.

5.2.6.1 Tracciamento del diagramma circolare

Si rappresentano in un diagramma fasoriale (Fig. 5.2.6.1) la tensione di alimentazione stellata \bar{E}_s (che si assume indipendente dalla condizione di funzionamento), e le corrispondenti corrente a vuoto \bar{I}_0 e corrente di cortocircuito \bar{I}_{sc} (misurate da un amperometro rispettivamente con rotore alla velocità di sincronismo e con rotore bloccato), che verificano le equazioni:

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_s}{Z_0}, \quad \bar{I}_{sc} = \frac{\bar{E}_s}{Z_{sc}} \quad (5.2.6.1)$$

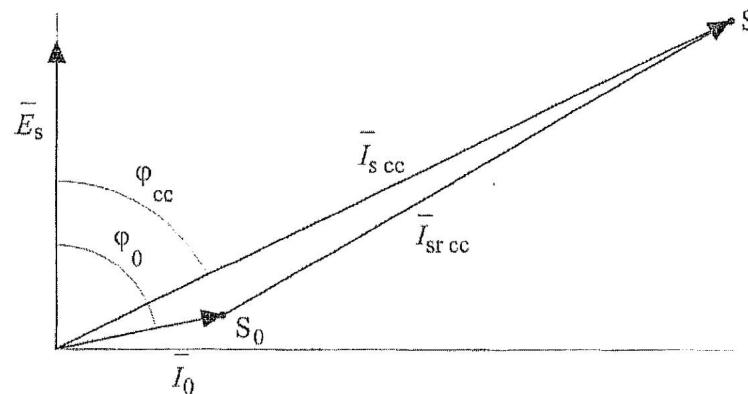


Figura 5.2.6.1

si può quindi tracciare anche la corrente secondaria di cortocircuito riportata al primario che, per la (5.2.3.2), vale $\bar{I}_{sr cc} = \bar{I}_{s cc} - \bar{I}_0$. I punti S_0 e S_1 caratterizzano le condizioni di lavoro della macchina quando lo scorrimento vale $s = 0$ e $s = 1$ rispettivamente.

In condizioni di funzionamento generico, chiamati $R(s) = R_s + R_{sr} + R_{sr}(1-s)/s$ e $X = X_s + X_{sr}$, dalla rete di Figura 5.2.4.1 si ricava:

$$\bar{E}_s = R(s) \bar{I}_{sr} + jX \bar{I}_{sr} \quad (5.2.6.2)$$

Dividendo tale espressione per jX si ottiene:

$$-j \frac{\bar{E}_s}{X} = \bar{I}_{sr} - j \frac{R(s)}{X} \bar{I}_{sr} \quad (5.2.6.3)$$

per qualsiasi valore di s , i due fasori a secondo membro sono tra loro ortogonali e la loro somma è costante e pari a $-j \bar{E}_s / X$; pertanto, i tre fasori costituiscono un triangolo rettangolo e il vertice del fasore \bar{I}_{sr} , al variare di s , descrive una semicirconferenza passante per S_0 e S_1 (Fig. 5.2.6.2). In pratica, il diagramma si costruisce con i seguenti passi:

- si traccia il fasore \bar{E}_s sull'asse y ;
- si traccia il fasore \bar{I}_0 ;
- si traccia il segmento $S_0 S_1$ che rappresenta il fasore $\bar{I}_{sr cc}$;
- si traccia la semiretta orizzontale avente origine in S_0 ;
- si traccia la semiretta ortogonale a $S_0 S_1$ e avente origine in S_1 ;
- il punto B_2 , intersezione di queste due semirette, individua il segmento $S_0 B_2$: questo è il diametro della semicirconferenza e corrisponde quindi al fasore $-j \bar{E}_s / X$ (il segmento $S_1 B_2$ corrisponde al fasore $-j \bar{I}_{sr cc} R(1)/X$).

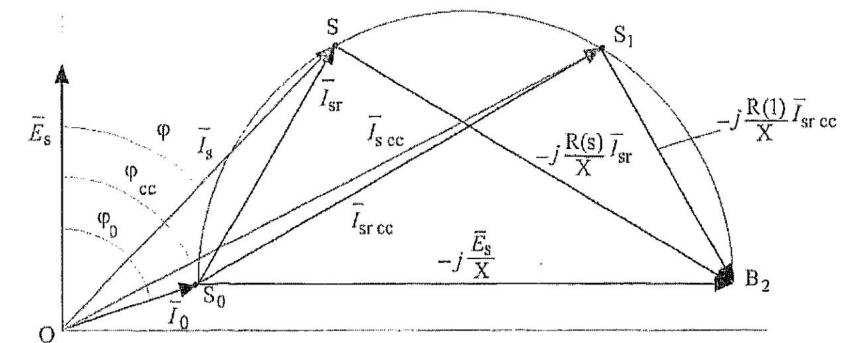


Figura 5.2.6.2

Ad ogni punto S della semicirconferenza corrisponde un diverso valore di corrente \bar{I}_{sr} e quindi un diverso valore dello scorrimento s .

Essendo $\bar{I}_s = \bar{I}_0 + \bar{I}_{sr}$, il fasore che congiunge l'origine degli assi O con il generico punto S del cerchio rappresenta la corrente \bar{I}_s assorbita ai morsetti del motore, che è quindi direttamente deducibile dal diagramma circolare. L'angolo tra il segmento OS e l'asse delle ordinate è pari allo sfasamento φ della corrente rispetto alla tensione stellata, da cui si ricava immediatamente il fattore di potenza $\cos\varphi$.

5.2.6.2 Potenze a vuoto ed in cortocircuito

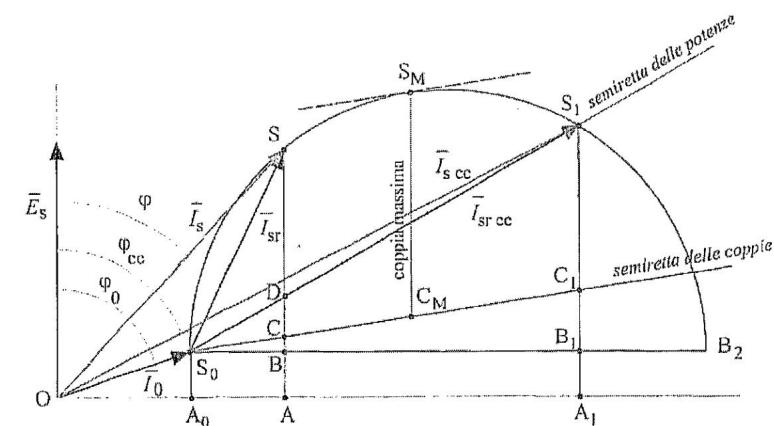


Figura 5.2.6.3

Dal diagramma circolare si possono dedurre anche le potenze messe in gioco nella macchina. Con riferimento al diagramma ridisegnato in Figura 5.2.6.3, la potenza attiva P_0 assorbita dalla macchina a vuoto ($s = 0$) può essere espressa come:

$$P_0 = 3E_s I_0 \cos\phi_0 \quad (5.2.6.4)$$

essa è quindi proporzionale al segmento $S_0 A_0$.

Analogamente la potenza attiva P_{cc} assorbita dalla macchina in cortocircuito ($s = 1$) è proporzionale al segmento $S_1 A_1$ tramite il medesimo fattore di scala:

$$P_{cc} = 3E_1 I_{1cc} \cos\phi_{cc} \quad (5.2.6.5)$$

Nell'approssimazione fatta, le perdite nel ferro (relative all'impedenza \dot{Z}_0) sono indipendenti dallo scorrimento^I, in cortocircuito esse sono rappresentate dal segmento $B_1 A_1 = S_0 A_0$, perciò il segmento $S_1 B_1 = S_1 A_1 - B_1 A_1$ rappresenta la potenza attiva $P_{cu_{cc}}$ dissipata complessivamente nel rame di statore e di rotore. Per ripartire tali perdite tra i due avvolgimenti, note la resistenza R_s di una fase statorica (determinabile con una misura in corrente continua) e la corrente di cortocircuito I_{srcc} , si individua lungo il segmento $S_1 B_1$ il punto C_1 tale per cui il segmento $C_1 B_1$ rappresenti la potenza dissipata nel rame di statore in cortocircuito:

$$P_{cu1_{cc}} = 3R_s I_{srcc}^2 \quad (5.2.6.6)$$

la potenza corrispondentemente dissipata nel rame di rotore risulta:

$$P_{cu2_{cc}} = 3R_{sr} I_{srcc}^2 \quad (5.2.6.7)$$

ed è rappresentata dal segmento $S_1 C_1$. Individuato C_1 , si può anche tracciare la semiretta avente origine in S_0 e passante per C_1 , denominata *semiretta delle coppie* per i motivi che illustreremo nel § 5.2.6.4.

5.2.6.3 Potenze in condizioni generiche

Dal generico punto S della semicirconferenza si può tracciare il segmento perpendicolare all'asse delle ascisse: esso individua i punti A , B , C e D (Fig. 5.2.6.3), per mezzo dei quali sono determinabili, nella generica condizione di funzionamento corrispondente al punto S , le potenze attiva e reattiva assorbite ai morsetti:

$$\begin{cases} P = 3E_s I_s \cos\phi \\ Q = 3E_s I_s \sin\phi \end{cases} \quad (5.2.6.8)$$

proporzionali rispettivamente ai segmenti SA e OA , e la potenza totale perduta nel ferro per isteresi e correnti parassite:

$$P_0 = 3E_s I_0 \cos\phi_0 \quad (5.2.6.9)$$

^I In realtà le perdite nel ferro di rotore diminuiscono al decrescere dello scorrimento (la velocità angolare relativa tra campo rotante e rotore diventa $2\pi sf$), ma crescono le perdite meccaniche e per ventilazione al crescere della velocità del rotore. In prima approssimazione si assume che la somma di tutte queste perdite sia costante.

Si può anche dimostrare^{II} che le potenze totali dissipate negli avvolgimenti statorici e rotorici,

$$\begin{cases} P_{cus} = 3R_s I_{sr}^2 \\ P_{cur} = 3R_{sr} I_{sr}^2 \end{cases} \quad (5.2.6.10)$$

sono proporzionali rispettivamente ai segmenti CB e DC . Il segmento $SD = SA - DA$, pari alla differenza tra la potenza attiva assorbita e le perdite totali, rappresenta dunque la potenza elettrica convertita in meccanica P_m , che nello schema equivalente è assorbita dalla resistenza $R_{sr}(1-s/s)$:

$$P_m = 3R_{sr} \frac{1-s}{s} I_{sr}^2 \quad (5.2.6.11)$$

per questo motivo la semiretta che ha origine in S_0 e passa per S_1 , sulla quale giace il punto D , è detta *semiretta delle potenze*.

5.2.6.4 Rendimento, scorrimento e coppia

Per qualsiasi condizione di lavoro, sul diagramma circolare si possono individuare il rendimento e lo scorrimento:

$$\eta = \frac{P_m}{P_r} = \frac{SD}{SA} \quad (5.2.6.12)$$

$$s = \frac{3R_{sr} I_{sr}^2}{3R_{sr} \frac{1}{s} I_{sr}^2} = \frac{P_{cur}}{P_r} = \frac{DC}{SC} \quad (5.2.6.13)$$

essendo P_r la potenza totale trasferita al rotore, costituita dalla somma della potenza ivi dissipata nelle resistenze e di quella convertita in potenza meccanica P_m .

Tenuto conto della (5.2.6.11) la coppia elettromeccanica espressa dalla (5.2.5.5) risulta proporzionale alla potenza totale P_r trasferita al rotore:

$$C = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{P_r}{\omega} \quad (5.2.6.14)$$

^{II} Per il primo teorema di Euclide applicato ai triangoli rettangoli $S_0 SB_2$ e $S_0 S_1 B_2$, valgono rispettivamente le relazioni:

$$\begin{cases} I_{sr}^2 = (S_0 S)^2 = S_0 B \cdot S_0 B_2 \\ I_{sr cc}^2 = (S_0 S_1)^2 = S_0 B_1 \cdot S_0 B_2 \end{cases}$$

da cui, dividendo membro a membro e tenuto conto della similitudine dei corrispondenti triangoli, si ottiene:

$$\frac{I_{sr}^2}{I_{sr cc}^2} = \frac{S_0 B}{S_0 B_1} = \frac{CB}{C_1 B_1} = \frac{DC}{S_1 C_1}$$

Si vede quindi che i segmenti CB e DC rappresentano le potenze P_{cus} e P_{cur} dissipate rispettivamente nelle resistenze di statore e di rotore nella generica condizione di lavoro a scorrimento s .

^{III} Questa relazione assume che la potenza meccanica resa all'albero P_{mecc} sia uguale alla potenza meccanica convertita P_m e quindi che le perdite meccaniche per attriti e ventilazione siano nulle.

ed è dunque proporzionale al segmento SC_1 : per tale motivo la semiretta avente origine in S_0 e passante per C_1 prende il nome di *semiretta delle coppie*.

5.2.7 Caratteristica meccanica

Nel funzionamento da motore, la macchina asincrona presenta scorrimento compreso tra $s = 1$ ($n_r = 0$) e $s = 0$ ($n_r = n_c$); di essa è importante conoscere la *caratteristica meccanica*, vale a dire l'andamento della coppia elettromeccanica erogata $C(n_r)$ al variare della velocità del rotore n_r .

Per via grafica, dal diagramma circolare si può facilmente ricavare l'andamento della coppia in funzione dello scorrimento s , e quindi anche in funzione della velocità del rotore n_r , come illustrato dalla curva nera in Figura 5.2.7.1.

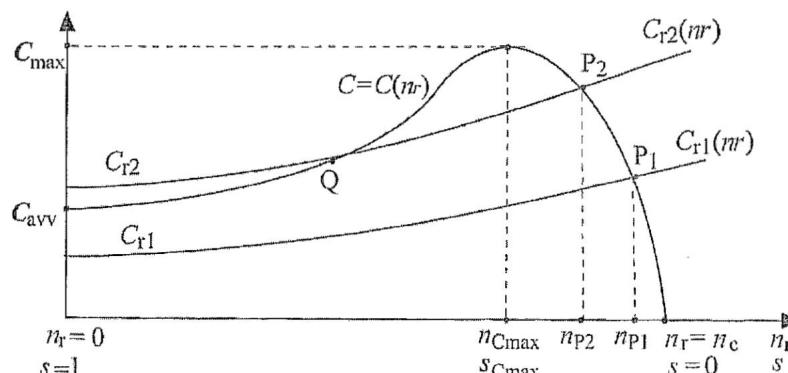


Figura 5.2.7.1

La coppia di avviamento C_{avv} ($s = 1$) è proporzionale al segmento S_1C_1 del diagramma circolare; la coppia massima C_{\max} è proporzionale al segmento $S_M C_M$, ottenuto sul diagramma circolare tracciando la retta parallela alla semiretta delle coppie e tangente alla semicirconferenza. Come già detto, la coppia alla velocità di sincronismo $n_r = n_c$ ($s = 0$) è nulla.

5.2.7.1 Equilibrio meccanico

In Figura 5.2.7.1 sono pure illustrati in grigio due andamenti tipici della coppia resistente $C_{r1}(n_r)$ e $C_{r2}(n_r)$ di carichi meccanici collegati al motore (ad esempio una pompa, un montacarichi, un veicolo elettrico, una macchina utensile etc., i quali tipicamente richiedono una coppia crescente con la velocità). Consideriamo dapprima il caso della coppia resistente C_{r1} . Quando il motore, a rotore fermo ($s = 1$), viene collegato alla rete di alimentazione, la coppia motrice C_{avv} è superiore alla coppia resistente e il motore si avvia con una accelerazione angolare:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = (C - C_r)/J \quad (5.2.7.1)$$

dove $C = C_{\text{avv}}$, $C_r = C_{r1}$ e J è la somma del momento di inerzia del rotore e di quello di tutte le masse rotanti ad esso collegate, riportato all'asse del rotore. Il rotore accelera fino a portarsi nel punto P_1 , dove le due coppie sono uguali. P_1 è un punto di equilibrio: il rotore ruota alla velocità costante n_{P1} .

Consideriamo adesso il caso della coppia resistente C_{r2} . Quando il motore, a rotore fermo ($s = 1$), viene collegato alla rete di alimentazione, la coppia motrice C_{avv} è inferiore alla coppia resistente e il motore non è in grado di avviarsi. Si può prevedere un meccanismo di frizione, per cui il carico viene scollegato meccanicamente dall'albero del motore prima di alimentare quest'ultimo. Il motore si avvia con l'accelerazione angolare data ancora dalla (5.2.7.1), dove $C_r = 0$. Superata la velocità corrispondente al punto Q , si inserisce il carico tramite la frizione: la coppia motrice è ora superiore alla coppia resistente e il rotore accelera secondo la (5.2.7.1), dove $C_r = C_{r2}$, fino a portarsi nel punto di equilibrio P_2 : il rotore ruota alla velocità costante n_{P2} , non molto diversa dalla n_{P1} del caso precedente. Infatti, il motore asincrono è caratterizzato da una velocità di rotazione debolmente dipendente dalla coppia resistente e comunque abbastanza vicina alla velocità di sincronismo n_c .

5.2.7.2 Analisi della stabilità dell'equilibrio

Consideriamo il caso di coppia resistente C_{r1} e assumiamo che il rotore stia ruotando alla velocità di equilibrio n_{P1} . Si supponga che, per qualunque motivo, il rotore subisca una piccola decelerazione (dovuta, ad esempio, ad un breve trattato a pendenza lievemente maggiore nella strada percorsa da un veicolo elettrico) portandosi per qualche istante ad una velocità leggermente inferiore a n_{P1} . Dalla Figura 5.2.7.1 si deduce che in questa situazione la coppia motrice risulta leggermente superiore alla coppia resistente e perciò, una volta cessata la causa della perturbazione del moto, il rotore si riporta alla velocità di equilibrio n_{P1} . Nel caso opposto di una perturbazione accelerante (lieve discesa breve), si ricava che la coppia motrice risulta inferiore a quella resistente e, cessata la causa della perturbazione, il rotore si riporta ancora all'equilibrio in P_1 . Il punto di equilibrio P_1 è dunque un *punto di equilibrio stabile*.

Nel caso della coppia resistente C_{r2} , considerazioni del tutto analoghe valgono per il punto di equilibrio P_2 ; se invece ci troviamo nel punto di equilibrio Q , l'analisi di stabilità ci dà un risultato opposto: una piccola perturbazione decelerante porta ad una situazione in cui la coppia resistente supera la coppia motrice e perciò il rotore decelera ulteriormente fino a fermarsi del tutto. Se invece la perturbazione è accelerante, succede il contrario, prevale la coppia motrice e il rotore accelera ulteriormente fino a portarsi alla nuova situazione di equilibrio in P_2 . Il punto di equilibrio Q è dunque un *punto di equilibrio instabile*. Per evitare che un motore operi in una condizione instabile, occorre che, in qualunque punto di lavoro, la pendenza della curva della coppia motrice $C(n_r)$ sia inferiore alla pendenza della curva della coppia resistente $C_r(n_r)$.

5.2.8 Avviamento del motore asincrono

Perché il motore si avvii, la coppia resistente del carico deve mantenersi minore della coppia elettromeccanica sviluppata dal motore fino al raggiungimento della velocità di rotazione nominale. Come discusso in § 5.2.7.1, l'avviamento non è

possibile se al motore è applicata una coppia resistente maggiore di quella di avviamento C_{avv} . Una possibile soluzione, come detto, consiste nel dotare il motore di una frizione. C'è una soluzione più efficace, che richiede però di utilizzare rotori avvolti (§ 5.1.2).

Dal diagramma circolare si deduce che è possibile aumentare la coppia di avviamento aumentando R_r (e quindi anche $R_{sr} = r^2 R_r$). Infatti (Fig. 5.2.6.2), ciò significa allungare il segmento $S_1 B_2$, cioè spostare verso sinistra il punto S_1 : ne consegue un aumento del coefficiente angolare della semiretta delle coppie e uno spostamento del punto di coppia massima verso sinistra, fino anche a coincidere con il punto relativo alla coppia di avviamento. Al crescere della resistenza R_r si ottengono caratteristiche meccaniche come quelle illustrate in grigio in Figura 5.2.8.1, che hanno tutte approssimativamente la stessa coppia massima C_{max} .

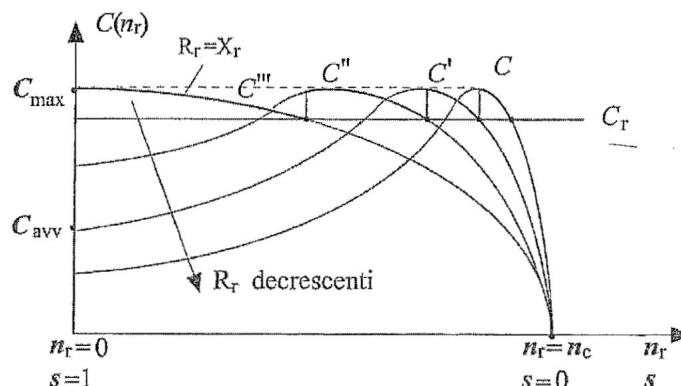


Figura 5.2.8.1

Tale soluzione richiede di collegare una terna di resistori addizionali in serie agli avvolgimenti di rotore e comporta un considerevole peggioramento del rendimento durante il normale funzionamento. Pertanto è applicabile solo utilizzando resistori aventi resistenza regolabile (*reostato di avviamento*) collegati agli avvolgimenti di rotore mediante anelli e spazzole strisciante. L'avviamento tramite reostato presenta un ulteriore vantaggio: la corrente di spunto, corrispondente al segmento OS_1 , viene notevolmente ridotta dallo spostamento di S_1 verso sinistra.

Una diversa soluzione applicata molto comunemente per migliorare le prestazioni all'avviamento è quella del rotore a doppia gabbia (Fig. 5.2.8.2a).

Dei due tipi di sbarre alloggiate nel rotore, quelle esterne, di piccola sezione, presentano resistenza maggiore di quelle interne, aventi sezione maggiore. Per contro le sbarre esterne, trovandosi in prossimità della superficie del traferro, presentano induttanza di dispersione minore delle sbarre interne.

Da un punto di vista circuitale le due gabbie sono in parallelo, essendo sottoposte alla medesima f.e.m. indotta, di valore efficace E_{in} , e in ciascuna di esse la corrente è governata da equazioni del tipo (5.2.3.6). All'avviamento ($n_r = 0, s = 1$) la frequenza applicata al rotore, $f_s = sf$, è massima e uguale a quella di alimentazione;

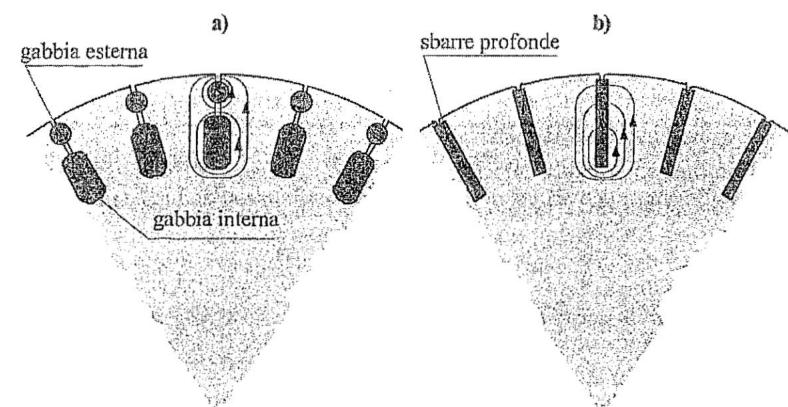


Figura 5.2.8.2 Disposizione delle sbarre di un rotore a gabbia.

la ripartizione di correnti tra le due gabbie risulta dettata dalle reattanze e pertanto la corrente è maggiore nella gabbia esterna che ha reattanza minore; il motore si avvia prevalentemente per l'azione di questa gabbia che, essendo dotata di resistenza maggiore, fornisce una elevata coppia di spunto. Man mano che il rotore accelera, decresce lo scorrimento e si riducono proporzionalmente le reattanze di dispersione modificando gradualmente la ripartizione delle correnti tra le due gabbie fino a raggiungere, in prossimità del sincronismo, una ripartizione dettata dal rapporto delle resistenze: la corrente è allora maggiore nella gabbia interna, dotata di modesta resistenza, perciò il rendimento del motore non ne risente. La caratteristica meccanica assume l'andamento mostrato in Figura 5.2.8.3.

Condizioni di funzionamento analoghe a quelle dei motori a doppia gabbia si possono anche ottenere realizzando motori a gabbia semplice ma dotati di sbarre profonde, vale a dire dotate di elevato sviluppo radiale (Fig. 5.2.8.2b); durante la

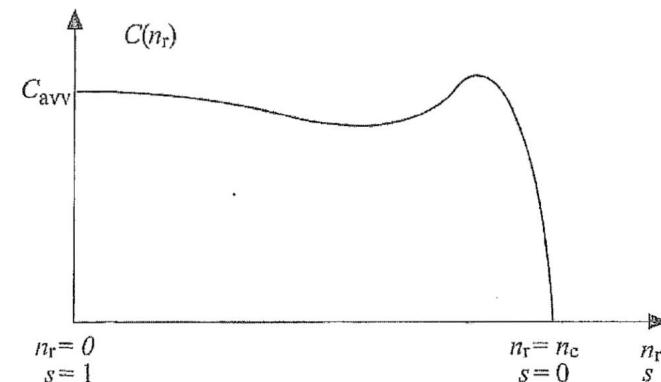


Figura 5.2.8.3

fase di avviamento la corrente di rotore, addensandosi in corrispondenza della parte di sezione più esterna della sbarra, produce un comportamento analogo a quello del motore a doppia gabbia.

5.2.9 Regolazione della velocità

Nel motore asincrono la velocità di rotazione n_r dipende dalla frequenza f , dal numero delle coppie polari p e dallo scorrimento s , come si deduce dalle (5.2.3.2):

$$n_r = n_c(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (5.2.9.1)$$

In condizioni di normale funzionamento esso lavora a velocità pressoché costante e prossima a quella di sincronismo n_c , dato che lo scorrimento è di norma assai piccolo e varia poco al variare delle condizioni di carico. Talvolta è tuttavia necessario poter variare la velocità di rotazione: in quasi tutte le applicazioni ciò si ottiene variando la frequenza di alimentazione.

5.2.9.1 Variazione della frequenza

La (5.2.9.1) indica che la velocità, essendo proporzionale alla frequenza, può venire controllata agendo sulla frequenza di alimentazione. Questo controllo può essere realizzato per mezzo di un inverter (Cap. 2) che permette di variare con continuità, oltre alla frequenza, e quindi la velocità, anche la tensione di alimentazione, e quindi la coppia, come si deduce dalle (5.2.5.5) e (5.2.6.2) (regolazione tensione/frequenza). Si ottengono in tal modo condizioni di funzionamento molto flessibili, con ampie possibilità di regolazione della caratteristica meccanica. In questo caso, non essendo necessarie regolazioni rotoriche, vengono utilizzati motori a gabbia di scoiattolo che, grazie all'assenza di spazzole ed anelli, sono più robusti ed economici e possono fornire potenze fino alle centinaia di chilowatt.

5.2.9.2 Inversione del senso di rotazione

L'inversione del senso di rotazione della macchina asincrona si può realizzare invertendo quello del campo magnetico rotante; ciò si ottiene scambiando tra loro le connessioni di due delle tre fasi di alimentazione.

A tal proposito va precisato che spesso ai motori è richiesto un ben definito senso di rotazione, individuato da una freccia marcata su uno scudo in prossimità dell'albero.

5.2.10 Generatore asincrono

Benché la macchina asincrona trovi principale impiego come motore, con scorrimento compreso tra $s = 1$ e $s = 0$, essa può essere anche impiegata come generatore (generatore asincrono). Se infatti, una volta raggiunto il punto di sincronismo a scorrimento $s = 0$, la macchina viene ulteriormente accelerata applicando all'albero una coppia motrice esterna con un motore di trascinamento (turbina idraulica, eolica o altro), essa supera la velocità di sincronismo ($n_r > n_c$); così lo scorrimento diventa negativo, $s < 0$.

La potenza attiva assorbita è negativa, ovvero la macchina eroga potenza elettrica e si comporta da generatore. La coppia elettromeccanica C sviluppata al rotore diviene negativa, vale a dire frenante, in modo da equilibrare la coppia motrice esterna. Il punto di funzionamento sta sulla semicirconferenza inferiore del diagramma circolare, non disegnata in Figura 5.2.6.3. Per $n_r > n_c$ la caratteristica meccanica si completa come in Figura 5.2.10.1, ove per $s > 0$ si presenta il funzionamento da motore e per $s < 0$ quello da generatore.

Questo impiego della macchina asincrona presenta l'inconveniente che per ogni punto S di funzionamento da generatore la macchina assorbe una ben definita potenza reattiva induttiva; contrariamente a quanto avviene per i generatori sincroni, non è quindi possibile regolare indipendentemente le potenze attiva e reattiva erogate. I generatori asincroni trovano applicazione nel campo dell'autogenerazione, tipicamente nel caso di generatori eolici, per potenze comunque limitate, grazie anche alle loro caratteristiche di economicità, affidabilità e semplicità di esercizio.

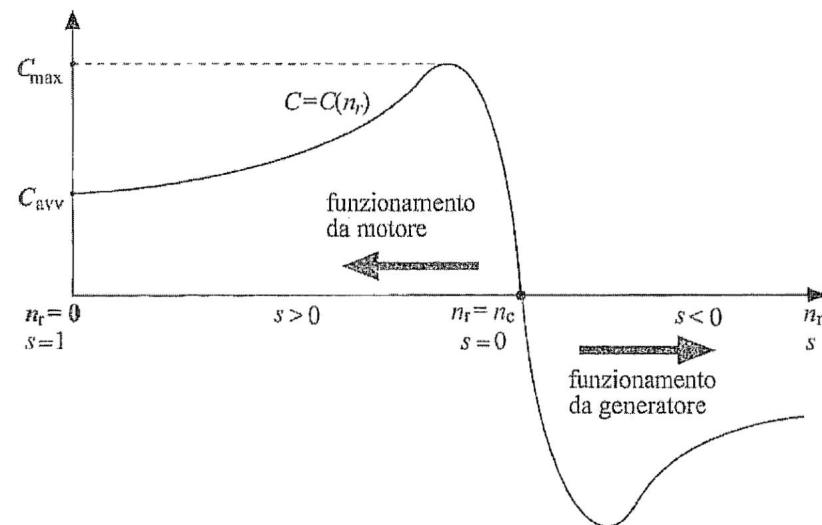


Figura 5.2.10.1

5.3 MOTORE ASINCRONO CON ALIMENTAZIONE MONOFASE

5.3.1 Campo al traferro e caratteristica meccanica

Per applicazioni di piccola potenza (da pochi watt fino ad alcune centinaia di watt) viene frequentemente utilizzato il *motore asincrono con alimentazione monofase*, nel cui stator, realizzato come quello di un motore asincrono trifase, due degli avvolgimenti sono connessi in serie e costituiscono l'*avvolgimento principale*, mentre il terzo può essere utilizzato come *avvolgimento ausiliario*.

Alimentando due avvolgimenti, a rotore fermo non si ottiene un campo magnetico rotante, ma un campo alternativo, che può essere considerato (§ 3.1.2.2) come

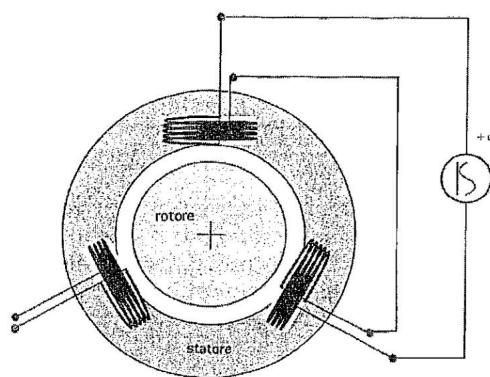


Figura 5.3.1.1 Motore trifase con alimentazione monofase.

Somma di due campi aventi entrambi ampiezza metà di quella del campo alternativo e rotanti con velocità opposte, $n_{cd} = n_c$ e $n_{ci} = -n_c$. In prima approssimazione, si può studiare il comportamento del motore sovrapponendo gli effetti che ciascuno dei due campi produce sul rotore agendo indipendentemente dall'altro. Se si suppone che il rotore sia in moto con velocità n_r , esso presenta velocità relative diverse rispetto ai due campi rotanti e quindi possono essere definiti due distinti scorimenti, s_d ed s_i :

$$s_d = \frac{n_{cd} - n_r}{n_{cd}} = 1 - \frac{n_r}{n_{cd}} = s, \quad s_i = \frac{n_{ci} - n_r}{n_{ci}} = 1 + \frac{n_r}{n_{ci}} = 2 - s \quad (5.3.1.1)$$

Essi assumono uguale valore $s_d = s_i = 1$ quando il rotore è fermo ($n_r = 0$), mentre risultano rispettivamente $s_d = 0$ e $s_i = 2$, quando il rotore ruota alla velocità di sincronismo n_{cd} o viceversa $s_d = 2$ e $s_i = 0$ quando il rotore ruota alla velocità di sincronismo n_{ci} . A ciascuno dei campi rotanti corrisponde una coppia elettromecanica con andamento in funzione della velocità analogo a quello di Figura 5.2.7.1.

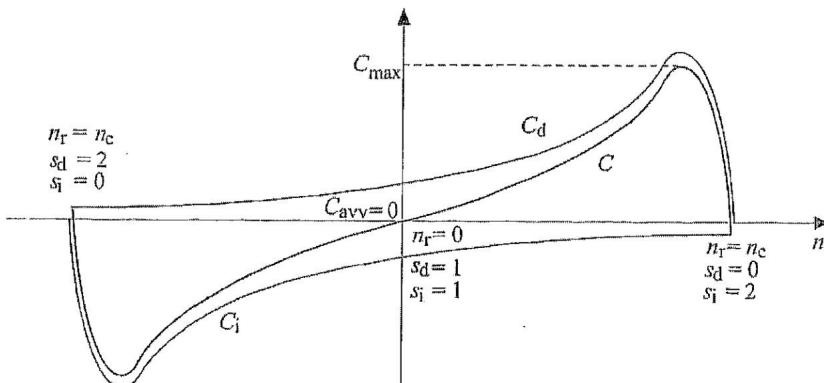


Figura 5.3.1.2

Le due coppie C_d e C_i , riportate in Figura 5.3.1.2 in funzione di n_r , possiedono andamento simmetrico rispetto all'origine; la coppia complessiva C è data dalla loro somma $C_d + C_i$ e risulta nulla a rotore fermo: $C_{ava} = C(0) = 0$.

5.3.2 Avviamento del motore monofase

5.3.2.1 Motore a condensatore

Essendo nulla la coppia di avviamento, il motore non riesce ad avviarsi spontaneamente. Tuttavia, quando è fermo, si trova in una condizione di equilibrio instabile: se viene posto in rotazione, anche lenta, in un verso o nell'altro, si sviluppa una coppia elettromeccanica non nulla che tende a farlo accelerare fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio stabile. Perché il motore possa avviarsi da solo è quindi sufficiente dotarlo di una coppia di avviamento ausiliaria. Questa coppia viene ottenuta producendo un campo magnetico ausiliario con andamento sinusoidale, spostato nello spazio e sfasato nel tempo rispetto al campo principale, che, sommandosi a questo, produce un campo rotante anche piccolo, ma sufficiente a creare la coppia di avviamento. Questo campo ausiliario viene prodotto semplicemente collegando il terzo avvolgimento di statore (avvolgimento ausiliario) attraverso un condensatore alla stessa alimentazione monofase (Fig. 5.3.2.1). Si produce quindi una corrente sfasata temporalmente rispetto a quella dell'avvolgimento principale. Ad avviamento avvenuto il terzo avvolgimento viene escluso aprendo un interruttore manualmente o in maniera automatica (per mezzo di un interruttore centrifugo).

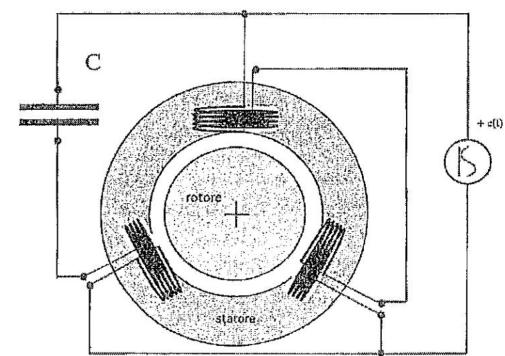


Figura 5.3.2.1

5.3.2.2 Motore a poli schermati

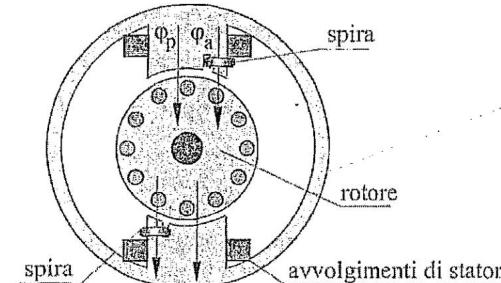
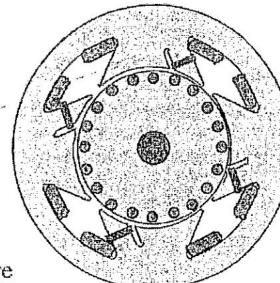


Figura 5.3.2.2



Per potenze fino a qualche decina di watt si usano anche motori a poli schermati, come quelli schematizzati in Figura 5.3.2.2.

Ciascun polo di statore è dotato di una cava, ove è alloggiata una spira conduttrice chiusa, che circonda una porzione del polo stesso. Tale spira può essere considerata come il secondario in cortocircuito di un trasformatore il cui primario è costituito dall'avvolgimento di statore. Il flusso alternato concatenato con la spira induce in essa una corrente sfasata rispetto a quella dell'avvolgimento principale, tale da generare un flusso ϕ_s , sfasato (in ritardo) rispetto al flusso principale ϕ_p che attraversa la rimanente parte del polo. Lo spostamento spaziale e lo sfasamento temporale tra i due flussi sono di modesta entità, ma normalmente sufficienti a garantire la coppia di spunto richiesta.

Capitolo 6

AZIONAMENTI ELETTRICI

6.1 GENERALITÀ

Gli *azionamenti elettrici* sono sistemi elettromeccanici ed elettronici destinati a muovere carichi meccanici controllando alcune grandezze quali posizione, velocità, forza (o coppia). Utilizzano sia motori elettrici "convenzionali", descritti nei capitoli precedenti, che alcuni tipi di *motori elettrici speciali*; impiegano anche convertitori statici (Cap. 2) e processori che permettono di controllare i motori in modo semplice, affidabile ed economico.

Sono utilizzati in molti processi industriali e in un grande numero di altre applicazioni, ad esempio negli elettrodomestici, nei computer, nei veicoli sia ferroviari che stradali, negli impianti a fune, nei velivoli, nelle navi e in apparecchiature elettroniche di largo consumo.

6.1.1 Caratteristiche di un azionamento

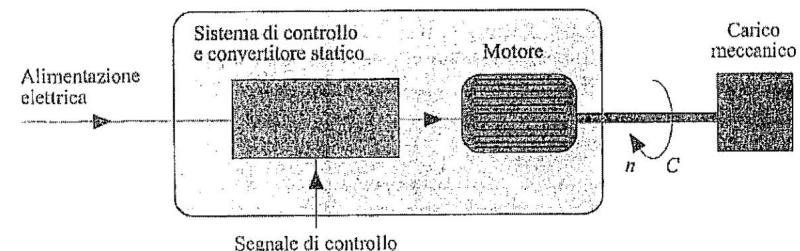


Figura 6.1.1.1

Un azionamento elettrico può essere rappresentato con lo schema a blocchi di Figura 6.1.1.1, dove ne sono evidenziati i componenti fondamentali:

- il *motore elettrico* fornisce la coppia motrice C alla velocità di rotazione n ;
- il *controllore* agisce sul *convertitore statico* per regolare la potenza scambiata (in generale, nei due sensi) tra la rete di alimentazione e il motore; il controllore riceve il segnale di controllo dall'esterno e lo confronta con un segnale di *retroazione* (o *feedback*) proveniente dal motore.

6.1.1.1 Caratteristica meccanica stazionaria dei carichi e dei motori

Ogni tipo di carico meccanico può essere descritto da una caratteristica meccanica $C_r = C_r(n)$, che esprime il valore della coppia resistente C_r necessaria a far ruotare il carico in funzione della velocità di rotazione n in condizioni stazionarie; C_r comprende sia la coppia necessaria a produrre il lavoro utile nel carico sia la coppia dovuta agli attriti; andamenti tipici per un ascensore, una pompa o ventilatore e un veicolo elettrico sono esemplificati in Figura 6.1.1.2. Talvolta, con alcuni tipi di carico, può succedere che esso richieda anche di essere frenato, come avviene ad esempio nei veicoli in discesa.

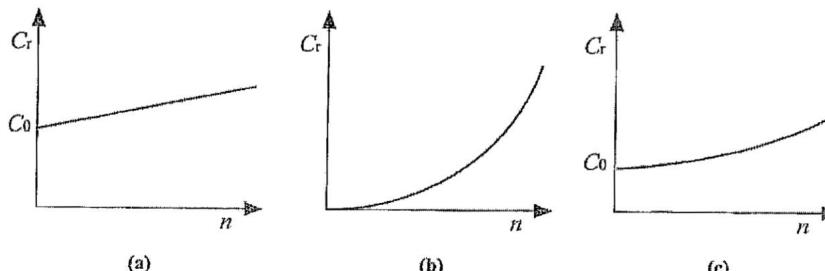


Figura 6.1.1.2 caratteristica meccanica di un ascensore (a), di un ventilatore o di una pompa per fluidi (b) e di un veicolo elettrico o di un compressore (c).

D'altra parte, la caratteristica meccanica $C = C(n)$ di un azionamento dipende dal motore impiegato, dal convertitore di alimentazione e dal sistema di controllo. In generale, per potere azionare tutti i possibili tipi di carico è necessario che l'azionamento sia in grado di invertire sia la coppia che il senso di rotazione; in tal caso sono possibili quattro distinte combinazioni di segno di coppia e velocità e si usa dire che l'azionamento è idoneo al *funzionamento in quattro quadranti* nel piano cartesiano (n, C) (Fig. 6.1.1.3).

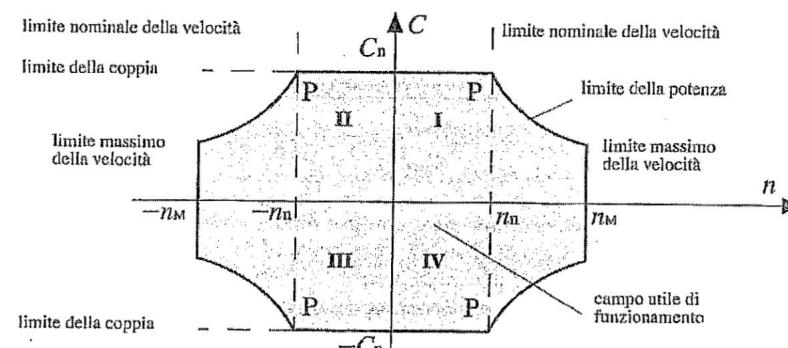


Figura 6.1.1.3

Quando la coppia e la velocità hanno uguale segno (I e III quadrante) il motore assorbe potenza elettrica e la converte in potenza meccanica; quando invece la coppia e la velocità hanno segno opposto (II e IV quadrante) la macchina funziona da generatore, assorbendo potenza meccanica e convertendola in potenza elettrica; esistono sistemi di alimentazione, detti reversibili, che permettono di immettere questa nella rete elettrica o in un accumulatore di energia (frenatura con recupero).

In ciascuno dei quattro quadranti, il campo di funzionamento è limitato dai *valori nominali*, costituiti da coppia nominale C_n , velocità nominale n_n e potenza nominale $P_n = \omega_n C_n = (2\pi/60)n_n C_n$. In alcune circostanze è possibile superare n_n , fino alla massima velocità n_M . I punti di lavoro ove si ottiene lo sfruttamento ottimale e continuativo dell'azionamento sono indicati con P in figura: in essi la coppia nominale viene sviluppata alla velocità nominale e quindi alla potenza nominale.

Esempio di funzionamento in quattro quadranti

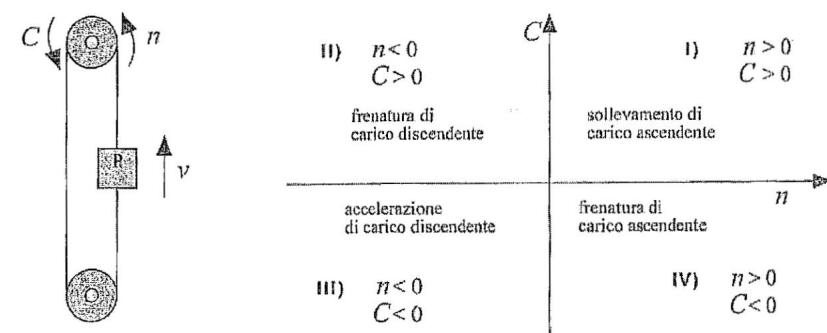


Figura 6.1.1.4

Per esemplificare il funzionamento in quattro quadranti si può considerare lo schema di Figura 6.1.1.4, ove un peso P (carico), in grado di muoversi verticalmente con velocità v , è azionato da una fune mossa da un motore.

Tra la coppia motrice C fornita dal motore e velocità di rotazione n , si possono presentare le quattro combinazioni seguenti:

- I quadrante:** $n > 0, C > 0$. La coppia elettromeccanica solleva il carico: il motore assorbe potenza elettrica ed eroga potenza meccanica.
- II quadrante:** $n < 0, C > 0$. La coppia elettromeccanica frena il carico in discesa: il motore assorbe potenza meccanica e la converte in elettrica.
- III quadrante:** $n < 0, C < 0$. La coppia elettromeccanica accelera il carico in discesa: il motore assorbe potenza elettrica ed eroga potenza meccanica.
- IV quadrante:** $n > 0, C < 0$. La coppia elettromeccanica frena il carico che sta salendo per effetto dell'inerzia: il motore assorbe potenza meccanica e la converte in elettrica.

Nella grande maggioranza delle situazioni, gli apparecchi di sollevamento funzionano nel I e nel II quadrante.

6.1.1.2 Stabilità del punto di funzionamento

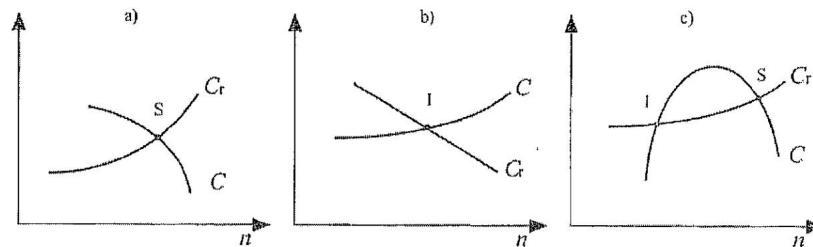


Figura 6.1.1.5

Condizioni stazionarie di lavoro si ottengono quando la coppia motrice C e la coppia resistente C_r sono tra loro in equilibrio e ciò avviene in corrispondenza dei punti di intersezione delle caratteristiche meccaniche, motrice e resistente, nel piano (n, C) . Tale equilibrio è *stabile* se (Fig. 6.1.1.5a):

- a seguito di una piccola perturbazione transitoria che provochi un piccolo aumento della velocità n , la coppia resistente supera quella motrice: allora lo squilibrio tra coppia resistente e coppia motrice provoca una decelerazione fino a riportare il sistema nel punto di lavoro iniziale, una volta cessata la perturbazione;
- viceversa, a seguito di una piccola perturbazione transitoria che provochi una piccola diminuzione della velocità n , la coppia motrice supera quella resistente: allora lo squilibrio tra coppia motrice e coppia resistente provoca un'accelerazione fino a riportare il sistema nel punto di lavoro iniziale, una volta cessata la perturbazione.

Se viceversa le condizioni sopra indicate non sono soddisfatte l'equilibrio risulta *instabile* (Fig. 6.1.1.5b): ogni piccola perturbazione della velocità comporta uno squilibrio delle coppie che tende ad esaltarsi con ulteriore allontanamento dalla condizione di equilibrio.

Se le due caratteristiche meccaniche si intersecano in due punti di equilibrio distinti, ad uno di essi corrisponde una condizione di lavoro instabile e all'altro stabile, come avviene rispettivamente nei punti I e S di Figura 6.1.1.5c.

La *condizione di stabilità* dell'equilibrio è espressa formalmente dalla relazione:

$$\left[\frac{dC_r}{dn} - \frac{dC}{dn} \right]_{\text{equilibrio}} > 0 \quad (6.1.1.1)$$

che impone, nel punto di equilibrio, una pendenza della caratteristica della coppia resistente maggiore di quella della coppia motrice.

Per ottenere buone condizioni di stabilità l'intersezione tra le due caratteristiche deve avvenire quanto più ortogonalmente possibile.

6.1.1.3 Stabilità dinamica

La condizione di stabilità (6.1.1.1) ha validità limitata al caso di piccole deviazioni dalle condizioni stazionarie (*azionamento a velocità costante*). Invece per analizzare il comportamento di un *azionamento a velocità variabile*, o in presenza

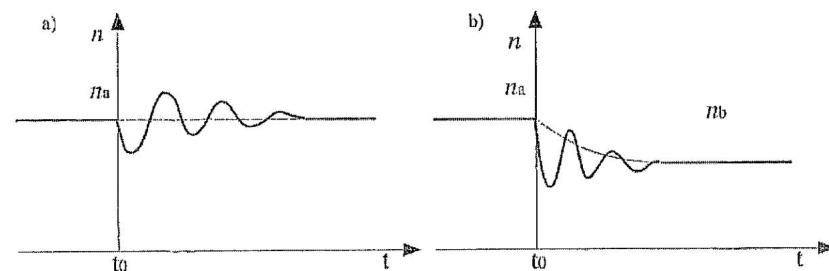


Figura 6.1.1.6

di transitori, è necessario considerare il comportamento dinamico del sistema, tenendo anche conto del termine inerziale $J d\omega_r / dt$, dove J è il momento di inerzia di tutte le masse rotanti più quello equivalente delle eventuali masse traslanti; l'equazione del moto diviene allora:

$$C = C_r + J \frac{d\omega_r}{dt} = C_r + J \frac{2\pi d n}{60 dt} \quad (6.1.1.2)$$

Lo studio della stabilità transitoria può essere condotto con i metodi dei controlli automatici; senza entrare qui nel dettaglio della trattazione si esemplificano due casi tipici:

- il primo caso (Figura 6.1.1.6a) consiste in un azionamento al quale viene applicata una coppia resistente a gradino all'istante t_0 ; se l'azionamento è progettato per lavorare a velocità n_a costante, indipendentemente dal carico, l'applicazione della coppia resistente provoca un'iniziale diminuzione della velocità, rilevata dal segnale di feedback, alla quale il controllore (Fig. 6.1.1.1) reagisce producendo un successivo assestamento attraverso una serie di oscillazioni; queste devono essere di ampiezza non eccessiva e smorzarsi in pochi periodi, in modo da ritornare rapidamente alla velocità n_a costante;
- il secondo caso (Fig. 6.1.1.6b) consiste in un azionamento a velocità n variabile, al quale all'istante t_0 , quando la velocità è n_a , viene modificato il segnale di controllo (Fig. 6.1.1.1) al fine di imporre una diversa velocità n_b ; a causa dell'inerzia, l'adeguamento avviene in maniera graduale attraverso una serie di oscillazioni; anche in questo caso esse devono essere di ampiezza non eccessiva e smorzarsi in pochi periodi.

6.2 AZIONAMENTI CON MOTORI CONVENZIONALI

I motori a campo magnetico rotante, asincroni e sincroni, hanno sempre trovato ampio impiego in applicazioni a velocità costante. A seguito dello sviluppo della conversione statica essi si sono affermati anche negli azionamenti a velocità variabile.

6.2.1 Motore asincrono

Il motore asincrono (Cap. 5) ha un ruolo fondamentale nei sistemi elettromecanici di tipo industriale, grazie alla sua robustezza, affidabilità ed economicità. Il reostato di avviamento (§ 5.2.8), in una macchina con rotore avvolto alimentata a tensione di valore efficace V costante, permette di ottenere la famiglia di caratteristiche meccaniche illustrata in Figura 6.2.1.1, che indica una buona flessibilità di esercizio. Tuttavia, anche se accoppiato ad un sistema di regolazione del reostato basato su componenti allo stato solido, il reostato di avviamento richiede comunque dei contatti strisciati e anelli sul rotore. Come anticipato in § 5.2.9, le possibilità di funzionamento sono assai più ampie se, in un azionamento, il motore asincrono viene alimentato tramite un inverter che fornisce tensioni sinusoidali di valore efficace V e frequenza f regolabili con continuità; ad esempio mantenendo V/f costante al variare di f si ottengono le caratteristiche meccaniche di Figura 6.2.1.2, che permettono il funzionamento stabile in un elevato campo di velocità. Quando il motore asincrono è alimentato da un inverter, il rotore è sempre a gabbia di scoiattolo, che garantisce maggior robustezza e assenza di manutenzione, oltre ad un costo inferiore. Tuttavia, a causa delle intense sollecitazioni dielettriche dovute ai transitori di tensione prodotti dalle commutazioni della corrente nell'inverter, l'isolamento degli avvolgimenti di statore deve essere rinforzato, per evitare che un cedimento precoce dell'isolamento provochi cortocircuiti tra i conduttori.

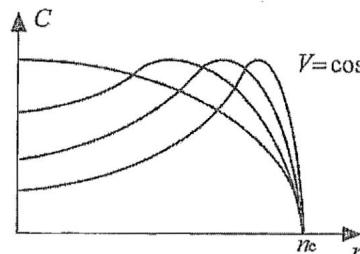


Figura 6.2.1.1

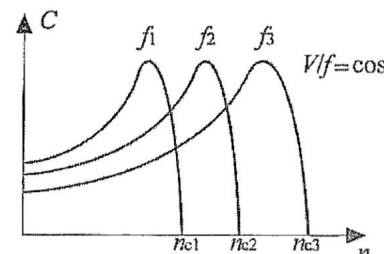


Figura 6.2.1.2

6.2.2 Motore sincrono

Il motore sincrono può produrre coppia meccanica in maniera stabile solo se la posizione del rotore è allineata entro un angolo elettrico di $\pm \pi/2$ rispetto alla direzione del campo magnetico rotante, che ruota ad un numero di giri pari a $n = 60/p$, perciò la velocità di rotazione del rotore deve essere rigidamente correlata alla frequenza di alimentazione f . Quindi, come anticipato in § 4.7.4, il motore può essere avviato solo se è alimentato tramite un inverter che fornisce tensioni sinusoidali di valore efficace V e frequenza f regolabili con continuità, partendo da valori molto bassi. Se la frequenza f è regolata dall'esterno, il motore è in grado di adeguare automaticamente la coppia motrice alla coppia resistente, tra zero e la coppia nominale C_n . L'avvolgimento di indotto è tipicamente alloggiato nelle cave di statore, come descritto nel Cap. 4; l'induttore può essere del tipi descritti qui di seguito.

6.2.2.1 Motore sincrono a rotore avvolto

Viene così chiamato un motore sincrono (Cap. 4) dotato di bobine di eccitazione poste nel rotore e alimentate in corrente continua (Fig. 6.2.2.2): variando la loro corrente è possibile regolare il flusso polare di eccitazione e quindi la potenza reattiva scambiata (§ 4.7.3).

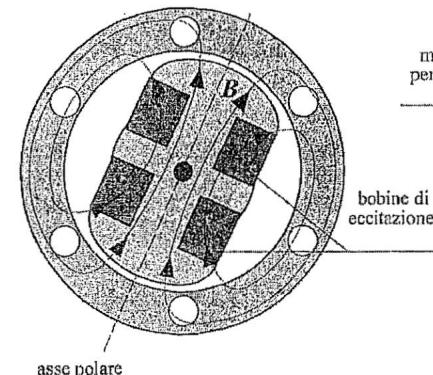


Figura 6.2.2.2

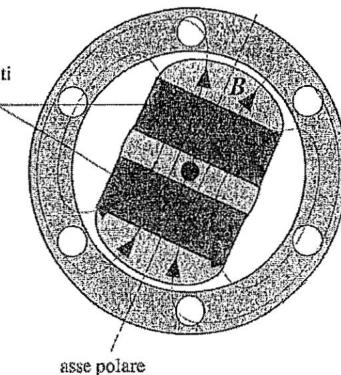


Figura 6.2.2.3

6.2.2.2 Motore sincrono a magneti permanenti (brushless)

Viene così chiamato un motore sincrono con rotore dotato di magneti permanenti, che forniscono un'eccitazione non regolabile (Fig. 6.2.2.3). Per ottenere un numero di coppie polari $p \geq 2$ si ricorre a rotori di tipo liscio, con magneti circonferenziali detti SPM (Surface Permanent Magnet, Fig. 6.2.2.4a) o radiali detti IPM (Interior Permanent Magnet, Fig. 6.2.2.4b), più adatti alle applicazioni ad alta velocità di rotazione.

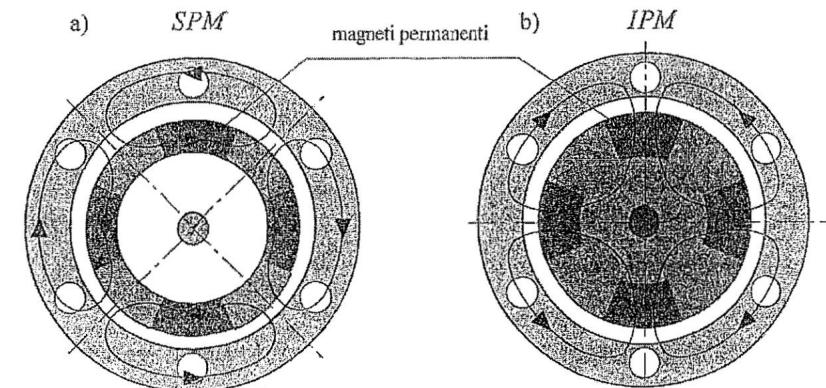


Figura 6.2.2.4

L'assenza di spazzole, anelli e contatti strisciati aumenta l'affidabilità e il rendimento e riduce le esigenze di manutenzione; essendo esclusi fenomeni di scintillio, il motore risulta inoltre idoneo all'impiego in atmosfera deflagrante. L'impiego di materiali magnetici speciali (Tab. 10.1.8.2, Vol.1) permette di ottenere motori molto compatti e leggeri, con un elevato rapporto C/J (coppia/momento di inerzia) che consente elevate prestazioni dinamiche; essi trovano impiego in robotica, nelle macchine utensili, nei veicoli stradali a trazione elettrica e ibrida ed anche in applicazioni speciali, quali quelle aeronautiche ed aerospaziali.

6.2.2.3 Controllo della frequenza nel motore sincrono

La frequenza f della tensione prodotta dall'inverter (Fig. 6.2.2.5) deve essere controllata in modo che il rotore ruoti sincrono con l'onda di f.m.m. statorica, a velocità $n = 60f/p$. Il complesso motore e inverter appare come una macchina alimentata in corrente continua. Si distinguono i seguenti due tipi di motori brushless.

- **Motore brushless DC.** In esso gli avvolgimenti statorici sono concentrati e le f.e.m. ivi indotte hanno forma pressoché trapezoidale; così risulta relativamente semplice il controllo dell'inverter, ma la coppia prodotta è caratterizzata da forti ondulazioni, che possono causare vibrazioni meccaniche.
- **Motore brushless AC.** In esso gli avvolgimenti statorici sono distribuiti e le f.e.m. ivi indotte hanno forma pressoché sinusoidale; così risulta più complesso il controllo dell'inverter, ma le prestazioni e il rendimento sono più elevati.

In ogni caso, l'azionamento funziona in catena chiusa (*feedback*), tramite un sistema di controllo che pilota le commutazioni dell'inverter in funzione della velocità e della posizione angolare del rotore rispetto al campo rotante; risulta così controllata anche la coppia motrice (Fig. 6.2.2.5). Nei motori brushless DC velocità e posizione del rotore sono rilevate per mezzo di sensori ottici o magnetici (*encoder ottici* oppure *sonde ad effetto Hall* sensibili al passaggio di piccoli magneti

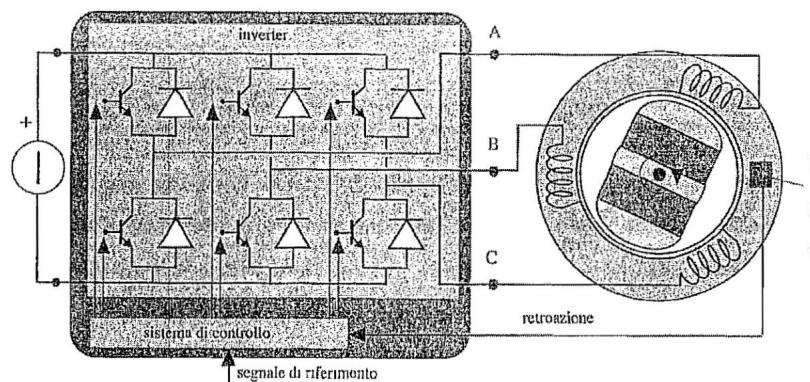


Figura 6.2.2.5

permanenti solidali all'albero, solitamente in numero di tre) che producono un segnale discretizzato. Nei motori brushless AC la posizione angolare viene rilevata mediante un *resolver*, che è un piccolo generatore sincrono bifase costituito da un magnete permanente solidale all'albero principale e da due piccoli avvolgimenti fissi, disposti a 90 gradi tra loro, che forniscono due tensioni sinusoidali in quadratura di fase da cui si deduce con precisione la posizione angolare del rotore.

Il motore brushless viene realizzato con soluzioni costruttive anche assai diverse da quella sopra descritta, in funzione del tipo di applicazione e della convenienza economica; per applicazioni particolari (ad esempio in alcuni veicoli elettrici) si fa anche ricorso a disposizioni con il rotore collocato esternamente rispetto allo statore.

6.3 AZIONAMENTI CON MOTORI SPECIALI

6.3.1 Motore sincrono a riluttanza variabile (synchronous reluctance motor)

In queste macchine, il rotore è magneticamente anisotropo, grazie a poli salienti oppure alla particolare forma del materiale magnetico che lo costituisce, come in Fig. 6.3.1.1. La riluttanza del tubo di flusso di *B* costituito da statore, traferro e rotore, e quindi anche l'induttanza dell'avvolgimento di statore, è funzione della posizione angolare del rotore. Come si è visto nel § 10.6, Vol. 1, le forze elettrodinamiche tendono a massimizzare l'induttanza, ovvero a minimizzare la riluttanza del tubo di flusso. Perciò le forze tendono ad allineare l'asse di simmetria del rotore alla direzione per la quale è massimo il campo prodotto dall'induttore, producendo una coppia. Il motore sincrono a riluttanza variabile (Fig. 6.3.1.1) sfrutta tale coppia dovuta all'anisotropia del rotore e si può considerare come un motore sincrono

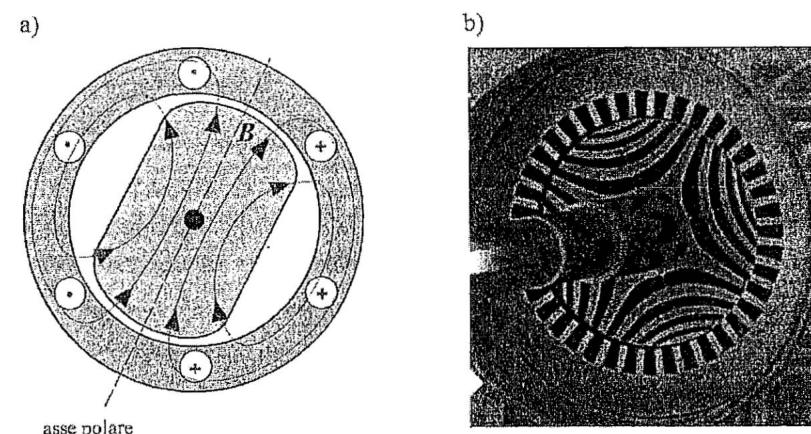


Figura 6.3.1.1

a poli salienti privo di bobine di eccitazione e di magneti permanenti. Nella Figura 6.3.1.1b è mostrato un rotore con $p = 2$, in cui l'anisotropia è ottenuta con "barriere" curve di materiale non ferromagnetico. Il flusso polare è integralmente fornito dallo statore cosicché il fattore di potenza risulta piuttosto basso, tipicamente $\cos\phi = 0,65 \div 0,75$ a piena potenza, tuttavia, grazie al fatto che non ci sono dissipazioni di potenza per effetto Joule nel rotore, il motore può raggiungere rendimenti e velocità di rotazione piuttosto elevate.

6.3.2 Motore a passo (stepping motor)

Esistono tre tipi fondamentali di motori a passo, che differiscono per il rotore, il quale in ogni caso è privo di bobine di eccitazione:

- il *motore a passo a riluttanza variabile* ha un rotore a poli salienti privo di magneti, analogo a quello della Figura 6.3.1.1a;
- il *motore a passo a magneti permanenti* ha un rotore liscio con magneti permanenti analogo a quello della Figura 6.2.2.4;
- il *motore a passo ibrido* ha un rotore anisotropo con magneti permanenti analogo a quello della Figura 6.2.2.3.

In ogni caso lo statore è dotato di poli salienti, attorno ai quali sono disposte bobine collegate a due a due in serie (come illustrano la Figura 6.3.2.1 per un motore ibrido e la Figura 6.3.2.2 per un motore a riluttanza variabile). Il numero di coppie polari di statore è diverso da quello di rotore (tipicamente lo statore possiede una coppia di poli in più del rotore); questo accorgimento permette l'avviamento del motore e consente il doppio senso di rotazione.

Quando una coppia di bobine dei poli statorici viene alimentata (ad esempio A e A' negli esempi delle due figure), essa genera linee di induzione alle quali il rotore tende ad allinearsi per effetto dei magneti permanenti o dell'anisotropia della riluttanza. Quando la corrente viene commutata da una coppia di bobine statoriche a quella successiva, il rotore avanza di un *passo* muovendosi da una posizione di equilibrio alla successiva; quindi il rotore può assumere soltanto un numero discreto di posizioni di equilibrio da cui il nome di *motore a passo*. Se le coppie di bobine statoriche vengono alimentate ciclicamente in sequenza, il rotore assume un moto chiamato *passo-a-passo* nel quale la velocità dipende esclusivamente dalla frequenza dei cicli di commutazione. Invertendo la sequenza il motore inverte il senso di rotazione.

Funzionamento a passo intero. Alimentando una sola coppia di bobine statoriche alla volta (come illustrato sopra), il rotore può assumere soltanto le posizioni di equilibrio allineate agli assi polari, che distano tra loro di un semipasso polare: si parla di *funzionamento a passo intero*. Ad esempio, nei motori delle Figure 6.3.2.1 e 6.3.2.2 sono possibili quattro posizioni, corrispondenti agli angoli $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 180^\circ$ e $\theta = 270^\circ$.

Funzionamento a mezzo passo. Se due coppie consecutive di bobine statoriche vengono alimentate contemporaneamente con correnti uguali, il rotore assume la posizione di equilibrio allineata con il loro asse interpolare. Pertanto, alimentando alternativamente una o due coppie di bobine statoriche, il rotore può assumere po-

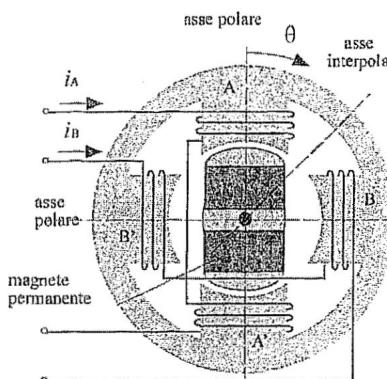


Figura 6.3.2.1

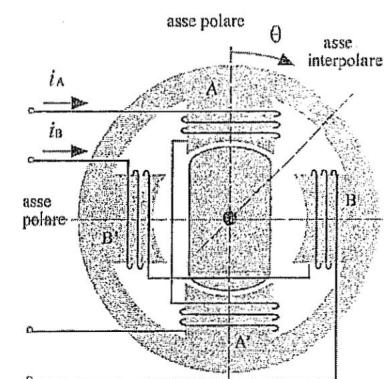


Figura 6.3.2.2

sizioni di equilibrio che distano mezzo semipasso polare: si parla di *funzionamento a mezzo passo*. Ad esempio, nei motori delle Figure 6.3.2.1 e 6.3.2.2 le posizioni possibili sono otto, corrispondenti agli angoli $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, ecc.

Il motore a passo risulta utile quando è richiesto un preciso avanzamento a partire da una data posizione: infatti questo è proporzionale al numero di impulsi con i quali vengono alimentate in sequenza le coppie di bobine statoriche. Trova perciò vasta applicazione nei sistemi in cui è necessario un controllo della posizione, come nei sistemi robotizzati di tipo industriale.

Il motore a passo presenta anche i seguenti vantaggi:

- non sussistono difficoltà di avviamento;
- la velocità può essere facilmente variata agendo sulla frequenza f con la quale si succedono gli impulsi di alimentazione delle bobine;
- il senso di rotazione può essere invertito invertendo la sequenza degli impulsi di alimentazione delle bobine;
- non sono richiesti sofisticati sistemi di controllo della posizione (encoder più retroazione) dato che ad ogni impulso il rotore si sposta di un angolo noto e prefissato.

6.3.2.1 Alimentazione

Le bobine statoriche vengono alimentate con impulsi di tensione interponendo tra il generatore in continua e il motore un dispositivo di commutazione comprendente interruttori elettronici (Cap.2), in genere comandati da un controllore in logica programmabile.

Motore a passo a magneti permanenti. Dato che questo motore contiene nel rotore i magneti permanenti, l'allineamento tra i poli rotorici e statorici richiede che i poli affacciati presentino polarità magnetiche opposte: per tale ragione le correnti delle bobine statoriche devono essere sia positive che negative e quindi il dispositivo

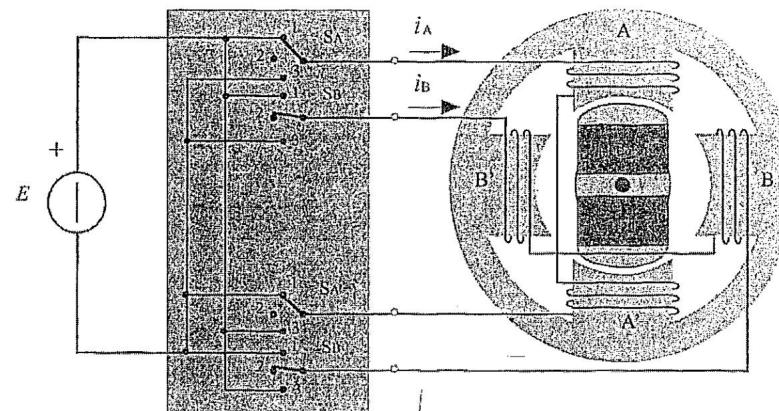


Figura 6.3.2.3

di commutazione deve consentire il funzionamento bidirezionale. Nell'esempio di Figura 6.3.2.3 gli interruttori permettono di alimentare le coppie di bobine con tale modalità ed inoltre in maniera indipendente, per consentire il funzionamento a mezzo passo. Quando il motore a passo a magneti permanenti non è alimentato, è comunque presente la *coppia di tenuta* ("cogging torque") che mantiene i due poli di rotore allineati con due poli di statore.

Motore a passo a riluttanza variabile. In questo motore l'allineamento tra poli di rotore e poli di statore si ottiene semplicemente alimentando le bobine statoriche, senza necessità di invertire la polarità. Nell'esempio di Figura 6.3.2.4, gli interruttori S_A e S_B del dispositivo di commutazione sono sufficienti ad alimentare le coppie di bobine statoriche in maniera indipendente, consentendo anche il funzionamento a mezzo passo.

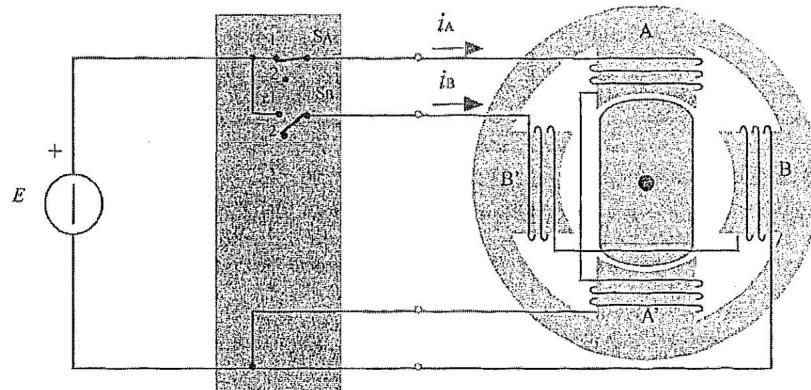


Figura 6.3.2.4

6.3.3 Motore switched reluctance

Il motore *switched reluctance* è una versione di elevata potenza derivata dal motore a passo a riluttanza e, come questo, ha numero di coppie polari di statore diverso da quello di rotore (Fig. 6.3.3.1). In esso la coppia motrice è dovuta esclusivamente all'anisotropia del rotore. Le bobine statoriche vengono alimentate tramite un dispositivo di commutazione ad interruttori elettronici controllato in corrente a catena chiusa, analogamente a quanto avviene nei motori brushless DC (§ 6.2.2.3); dato che il rotore non comprende magneti, sono sufficienti correnti unidirezionali e ciò comporta una notevole semplificazione nel dispositivo di commutazione. Questo applica ai poli statorici sequenze di impulsi di corrente tali da produrre un moto continuo alla velocità desiderata.

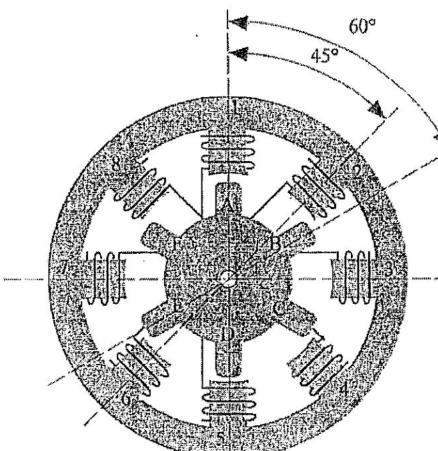


Figura 6.3.3.1

I motori *switched reluctance*, con potenze fino ad alcune centinaia di kW, arrivano a prestazioni, rendimento e costo comparabili con quelli dei motori sincroni e asincroni equivalenti, possono raggiungere velocità di rotazione elevatissime, ma presentano anche alcuni svantaggi, tra cui il principale consiste nelle fluttuazioni della coppia che provocano notevole rumorosità.

LINEE ELETTRICHE

7.1 GENERALITÀ

Le linee elettriche sono costituite da due o più conduttori metallici (fili, sbarre e funi o cavi flessibili) tra loro isolati, che consentono di interconnettere diverse apparecchiature elettriche tra loro.

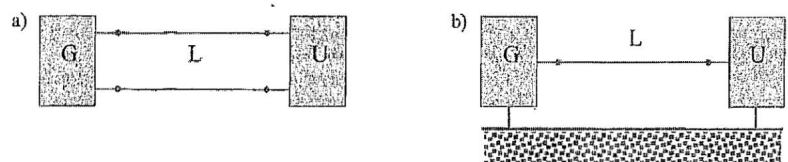
Trovano impiego sia per collegare generatori e carichi utilizzatori nei *sistemi elettrici di potenza* (in DC ed in AC, monofase e trifase) sia nei sistemi per la *trasmissione di segnali*, per collegare i dispositivi che generano informazioni e quelli che le ricevono (sistemi di misura, telefonia, linee dati). In entrambe le applicazioni si presenta una grande varietà di tipi di linee.

La trattazione svolta nel seguito fa specifico riferimento alle linee elettriche utilizzate nei sistemi elettrici di potenza, ma i concetti fondamentali rimangono validi anche per la trasmissione dei segnali.

7.2 TIPOLOGIE

Numero di conduttori. Nei *sistemi in DC* si impiegano *linee bifilari*, a due conduttori (Fig. 7.2.1a) e talvolta *linee unifilari*, a un solo conduttore (Fig. 7.2.1b); in tal caso la funzione di un conduttore può essere svolta da una struttura metallica che sostiene i dispositivi da collegare (ad esempio la scocca di una macchina utensile o di un'automobile) o anche dal terreno o dall'acqua.

Nei *sistemi in AC monofase* si impiegano *linee bifilari* (Fig. 7.2.1a) e, in applicazioni particolari, anche *unifilari* (Fig. 7.2.1b); i *sistemi in AC trifase* senza neutro e con neutro ricorrono rispettivamente a linee a tre o a quattro conduttori (Fig. 7.2.2).



G=generatore, U=utilizzatore, L=linea

Figura 7.2.1

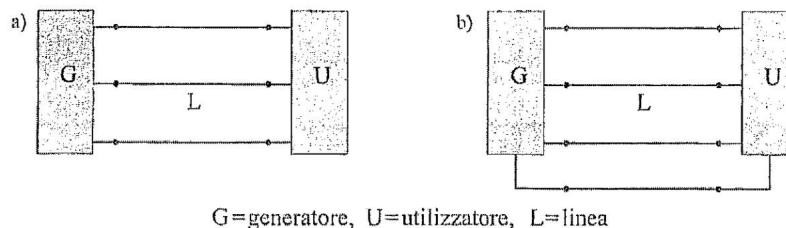


Figura 7.2.2

In genere la sezione dei conduttori dipende dalla corrente nominale della linea, e quindi dalla potenza termica che può essere smaltita, ma talvolta anche dalle sollecitazioni meccaniche previste (ad esempio dalla lunghezza della campata nelle linee aeree sospese).

Isolamento. Le linee aeree sospese impiegano conduttori nudi (privi di isolamento solido) opportunamente distanziati tra loro. Nelle linee *in cavo*, i singoli conduttori sono dotati di isolamento, che normalmente è solido, ma che in casi particolari può essere liquido (olio) o gassoso. Gli spessori dei dielettrici interposti (le distanze tra conduttori e verso terra per le linee aeree, ovvero gli spessori delle guaine per i cavi) dipendono dalla tensione nominale della linea.

7.2.1 Linee aeree sospese

Le linee aeree trovano impiego fondamentale nei sistemi elettrici di potenza in AC (linee aeree di trasmissione dell'energia elettrica, o elettrodotti, schematizzate in Fig. 7.2.1.1): si tratta di linee trifasi con tensioni concatenate nominali che vanno tipicamente dai 10 kV ai 400 kV e in taluni casi raggiungono e superano i 1.000 kV; le correnti nominali possono raggiungere alcuni kA.

Si impiegano conduttori nudi con struttura a fune, sospesi mediante supporti isolanti detti *isolatori* (§ 9.7) a pali o tralicci (questi ultimi sono impiegati nelle linee a tensione più elevata). Le distanze tra conduttori e verso terra devono garantire la tenuta dielettrica nelle condizioni atmosferiche più sfavorevoli (pioggia, vento, ghiaccio, abbassamento dei conduttori a seguito della dilatazione termica, salsedine in aree costiere). L'altezza minima da terra, a metà campata tra due sostegni successivi, deve garantire l'incolmunità delle persone e degli animali che transitano sotto la linea. Esistono anche limiti sulle distanze massime tra i conduttori e verso terra, volti a contenere l'impatto ambientale¹.

Gli elettrodotti di maggiore potenza sono normalmente costituiti da due treni di conduttori, collegati in parallelo (Fig. 7.2.1.2). Oltre ai conduttori di linea sono generalmente presenti uno o due ulteriori conduttori, detti *funi di guardia*,

¹ Tali vincoli sono anche imposti dalla normativa tecnica vigente, ad esempio dalle Norme del Comitato Elettrotecnico Italiano CEI 11-1, CEI 11-8 ed anche dalla normativa giuridica D.M. 21.3.88 e D.M. 16.1.91.

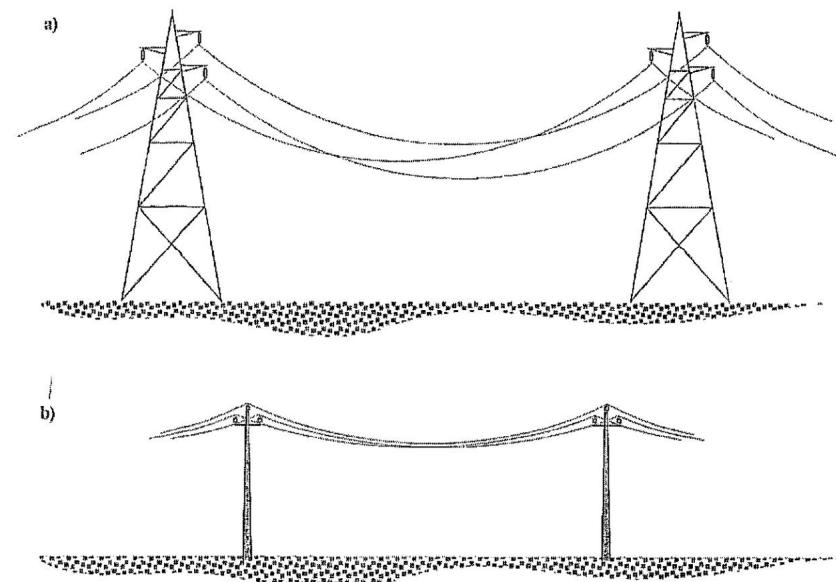


Figura 7.2.1.1

che connettono tra loro le estremità superiori dei tralicci metallici, sono equipotenziali con essi e col terreno e servono a proteggere l'elettrodotto dalle fulminazioni atmosferiche.

Le linee aeree sono anche usate nella trazione elettrica ferroviaria, metropolitana e tranviaria, prevalentemente in corrente continua, con tensioni tipicamente comprese tra 600 V e 3 kV; per la trazione ferroviaria si ricorre anche alla corrente alternata monofase con tensioni fino a 25 kV (§ 8.5.2).

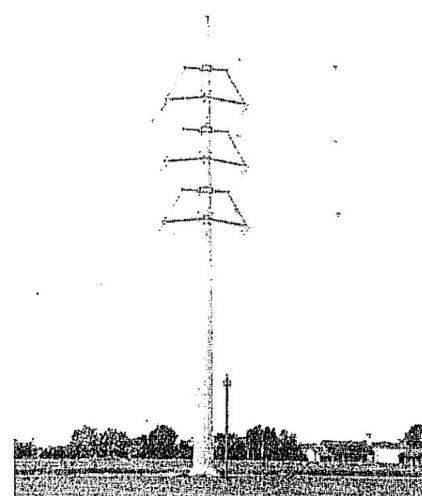


Figura 7.2.1.2

7.2.2 Linee in cavo

Nei sistemi elettrici di potenza in AC trovano impiego linee in cavo trifasi o monofasi per tensioni fino a qualche centinaio di kV e per estensioni non superiori a poche decine di chilometri, in quanto il costo di una linea in cavo è notevolmente superiore a quello di una corrispondente linea aerea.

Nei sistemi elettrici di potenza in DC, usati in particolare per i collegamenti sottomarini (§ 8.5.1.1), si utilizzano linee in cavo, unifilari o bifilari, con tensioni fino a parecchie centinaia di kV ed estensioni fino a varie centinaia di chilometri.

Per le guaine dei cavi si usano materiali isolanti (gomma sintetica, polietilene, PVC). Si ricorre a *cavi unipolari* affiancati l'un l'altro, oppure a *cavi multipolari* nei quali i singoli conduttori, isolati tra loro, sono raccolti all'interno di una matrice isolante che ha anche funzione meccanica (Fig. 7.2.2.1). Spesso i cavi sono racchiusi entro una calza conduttrice che serve da schermo elettrostatico e protezione meccanica; il tutto è contenuto in un'ulteriore guaina isolante. Grazie al loro limitato ingombro rispetto alle linee aeree, i cavi presentano grande versatilità di installazione, mentre l'isolamento solido e la calza metallica esterna garantiscono un preciso controllo della distribuzione del campo elettrico e quindi un elevato grado di affidabilità. Esistono cavi dotati di guaine protettive adatte per installazioni all'esterno, in particolare per pose interrate o sommerse.

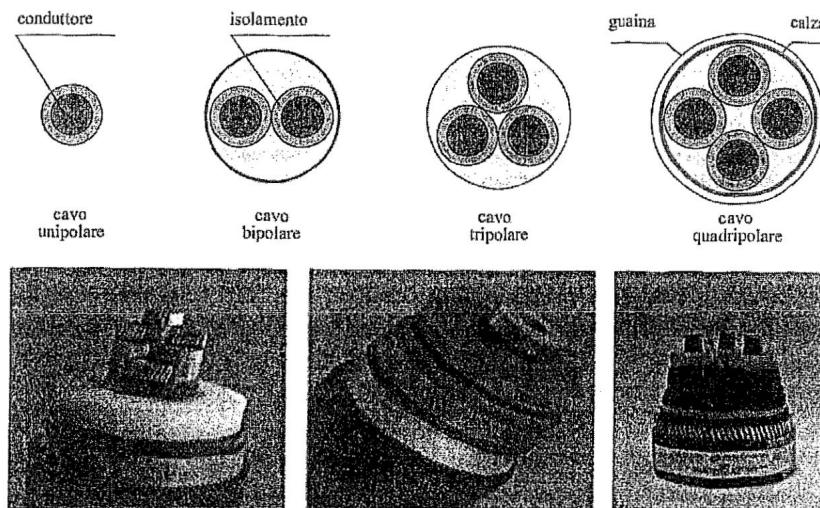


Figura 7.2.2.1

7.3 SCHEMI EQUIVALENTI

In una linea, sia essa aerea o in cavo, si sviluppano i seguenti fenomeni elettromagnetici:

- dissipazione ohmica di potenza associata alla resistività e alle correnti dei conduttori;
- dissipazione ohmica di potenza associata alla conducibilità dell'isolante e alle tensioni tra i conduttori;
- accumulo di energia induttiva, associata alle correnti dei conduttori;
- accumulo di energia capacitiva, associata alle tensioni tra i conduttori e verso terra.

Per effetto di tali fenomeni, in regime variabile, le tensioni tra i conduttori e le loro correnti non solo variano in funzione del tempo, ma in un determinato istante possono presentare valori diversi nelle diverse sezioni della linea; la descrizione accurata del suo comportamento richiede quindi un *modello a parametri distribuiti*, con cui ad ogni tratto di linea dl vengono attribuite resistenza, induttanza, conduttanza e capacità che tengono conto dei relativi fenomeni elettromagnetici.

7.3.1 Schema equivalente di una linea bifilare

Per descrivere un tratto di linea a due conduttori (*linea bifilare*) può essere adottato lo schema descritto in Figura 7.3.1.1, denominato *modello a parametri concentrati*. Il modello è costituito da bipoli ideali aventi parametri R , L , C e G : i primi due, detti anche *parametri longitudinali*, sono associati ai fenomeni legati alla corrente dei conduttori; gli ultimi due, detti *parametri trasversali*, a quelli correlati alla tensione tra essi.

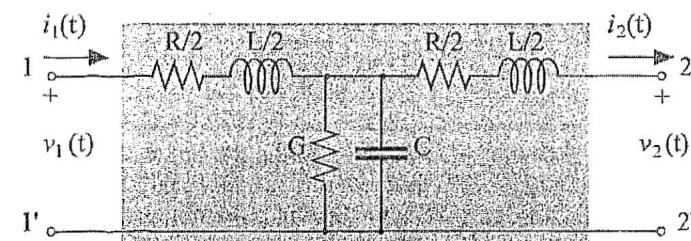


Figura 7.3.1.1

Tale modello è valido solo se il tempo di *propagazione elettromagnetica* lungo il tratto di linea considerato è trascurabile rispetto al periodo di variazione della tensione e corrente. Quindi risulta tanto più preciso quanto più corta è la linea e quanto più lente sono le variazioni temporali di tensioni e correnti; in particolare alla *frequenza industriale* di 50 Hz (periodo $\tau = 20$ ms) il modello può ritenersi adeguato per linee aeree di lunghezza inferiore a circa 300 km, corrispondenti ad un tempo di propagazione di circa 1 ms. Se tensioni e correnti trasmessi sulla linea hanno frequenza più alta, la lunghezza utile descrivibile dal modello a parametri concentrati risulta inversamente proporzionale alla frequenza.

7.3.1.1 Parametri dello schema

Resistenza longitudinale. Per una linea bifilare di lunghezza ℓ , costituita da due conduttori di resistività ρ e sezione S , la *resistenza longitudinale*, in accordo con la (4.4.1.2 – Vol.I), è esprimibile come:

$$R = \frac{2\rho\ell}{S}; \quad (7.3.1.1)$$

per le linee vengono impiegati ottimi conduttori come il rame ($\rho \approx 2 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, alla temperatura normale di esercizio) e l'alluminio ($\rho \approx 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$).

Induttanza longitudinale. Per una linea bifilare di lunghezza ℓ , costituita da due conduttori con sezione circolare di raggio $r_0 = \sqrt{S/\pi}$, i cui assi sono posti a distanza h , l'*induttanza longitudinale* è esprimibile con la (10.2.3.10 – Vol.I):

$$L = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{h}{r_0} + \frac{1}{4} \right)^{\text{II}}; \quad (7.3.1.2)$$

il primo addendo in parentesi tiene conto del campo di induzione esterno ai conduttori, il secondo di quello interno; mentre il contributo di quest'ultimo è costante, il primo varia debolmente con h e r_0 . Ne risulta che l'induttanza L vale circa $1 \mu\text{H}/\text{m}$ e dipende molto poco dalla geometria dei conduttori. Normalmente i materiali isolanti non sono ferromagnetici, per cui la permeabilità coincide con quella del vuoto.

Capacità trasversale. Per una linea bifilare di lunghezza ℓ , costituita da due conduttori con sezione circolare di raggio r_0 , posti a distanza h , la capacità trasversale è esprimibile con la (9.2.3.8 – Vol.I):

$$C = \frac{\epsilon \pi \ell}{\ln \frac{h - r_0}{r_0}}. \quad (7.3.1.3)$$

Contrariamente all'induttanza, la capacità dipende molto dalla geometria dei conduttori e anche dalla permittività dielettrica del materiale isolante.

Conduttanza trasversale. La conduttanza trasversale dipende dai fenomeni dissipativi che si verificano nel dielettrico interposto tra i due conduttori; poiché la potenza dissipata è sempre modesta, questa conduttanza può essere trascurata.

7.3.2 Schemi equivalenti di linee in DC

In regime stazionario gli induttori equivalgono a cortocircuiti e i condensatori a circuiti aperti. Quindi, per una linea bifilare in DC, lo schema equivalente di Figura 7.3.1.1 può essere semplificato in quello di Figura 7.3.2.1, ove compare la sola resistenza longitudinale R dei due conduttori, indicata in (7.3.1.1).

^{II} Le (7.3.1.1) e (7.3.1.2) assumono che i due conduttori abbiano sezioni sufficientemente piccole per non dare luogo a fenomeni di correnti pellicolari. Per conduttori in rame in regime periodico a 50 Hz ciò equivale a considerare sezioni con raggi non maggiori di 10 mm.

Lo schema di Figura 7.3.2.1 vale anche per una linea unifilare in DC; in questo caso però, potendosi trascurare la resistenza offerta dal terreno o dall'acqua grazie all'ampia sezione di passaggio della corrente, va considerata la resistenza dell'unico conduttore e si ha quindi $R = \rho\ell/S$, pari alla metà della (7.3.1.1).

Peraltra in DC si verificano comunque accumuli di energia eletrostatica (associata alla tensione) e magnetica (associata alla corrente) descritti dai parametri C e L : questi sono rilevanti nei transitori con i quali la linea passa da un regime stazionario ad un altro.

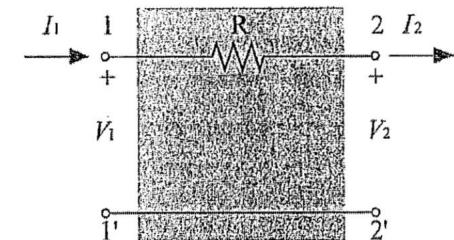


Figura 7.3.2.1

7.3.3 Schemi equivalenti di linee in AC

7.3.3.1 Linea bifilare in AC (monofase)

In regime sinusoidale alla pulsazione ω , alla capacità C e all'induttanza L di Figura 7.3.1.1 corrispondono rispettivamente la *reattanza trasversale* X_C e la *reattanza longitudinale* X_L , indicata semplicemente con X :

$$X_C = -\frac{1}{\omega C}; \quad X_L = X = \omega L; \quad (7.3.3.1)$$

talvolta si definisce anche la *reattanza chilometrica* [Ω/km], formalmente attribuita a un chilometro di ciascun conduttore (essendo la lunghezza ℓ espressa in chilometri):

$$X_\ell = \frac{1}{2} \frac{X}{\ell} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{h}{r_0} + \frac{1}{4} \right) 10^3. \quad (7.3.3.2)$$

- **Le linee aeree**, alla frequenza $f=50 \text{ Hz}$, hanno tipicamente $X_\ell \approx 0,3 \Omega/\text{km}$, valore generalmente confrontabile con quello della resistenza; se la lunghezza della linea non è elevata (fino a qualche km), la reattanza X_C risulta piuttosto grande e la relativa corrente capacitiva può essere trascurata, nelle situazioni di normale funzionamento.
- **Le linee in cavo** presentano valori di X_ℓ inferiori rispetto alle linee aeree, in quanto la distanza h tra i conduttori è molto inferiore; se la lunghezza è inferiore a qualche decina di metri (come avviene negli impianti utilizzatori) X_C risulta molto grande e la corrente capacitiva in X_C risulta molto minore rispetto a quella assorbita dagli utilizzatori. Se invece la lunghezza del cavo è elevata, X_C presenta valori tali da dar luogo ad un rilevante assorbimento di corrente capacitiva.

Nelle analisi che seguono si considera una linea sufficientemente corta da poter trascurare la corrente attraverso la reattanza X_C . Pertanto, usando il metodo fasoriale, si considerano solo i parametri longitudinali R e X e si ottiene lo schema di Figura 7.3.3.1, in cui compare l'*impedenza di linea*:

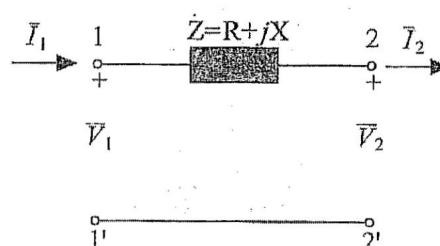


Figura 7.3.3.1

$$\dot{Z} = R + jX. \quad (7.3.3.3)$$

Peraltro la reattanza X_C è comunque rilevante quando si vogliono esaminare alcuni specifici fenomeni, quali: l'assorbimento di corrente a vuoto, i fenomeni di resonanza elettrica che si manifestano nelle linee di grande lunghezza e le sovrattensioni che si presentano ad un'estremità della linea quando questa è a vuoto e durante i transitori di inserzione.

7.3.3.2 Linea trifase simmetrica ed equilibrata

Nel funzionamento simmetrico ed equilibrato, una linea trifase a tre conduttori presenta il medesimo comportamento di una linea a quattro conduttori, perché il conduttore di neutro ha corrente nulla. In entrambi i casi si può considerare un conduttore di fase e il conduttore di neutro ideale, pervenendo al *modello ridotto monofase* in accordo con quanto visto in § 15.4.1 - Vol. 1. Come nel caso di una linea bifilare in regime sinusoidale, in questa sede interessa tenere conto dei fenomeni longitudinali della linea trifase, per cui il modello equivalente monofase è ancora costituito dallo schema di Figura 7.3.3.1, caratterizzato dall'impedenza di

linea $\dot{Z} = R + jX$, formalmente analoga alla (7.3.3.3); per i suoi parametri valgono le seguenti considerazioni.

- *Resistenza longitudinale*. Dato che il conduttore di neutro è ideale (ovvero, anche se realmente presente, è privo di corrente) si ha $R = \rho\ell/S$, pari alla metà della (7.3.1.1) che compete ad una linea monofase.
- *Reattanza longitudinale*. Questa dipende dalla distribuzione dell'induzione magnetica dovuta a ciascuno dei circuiti determinati da ogni coppia di conduttori e quindi dipende dalla disposizione spaziale dei conduttori della linea ed anche dai rapporti tra le loro correnti. Nei casi più frequenti risulta sufficientemente accurata l'espressione:

$$X = \omega L = \omega \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{h}{r_0} + \frac{1}{4} \right), \quad (7.3.3.4)$$

ove h è la distanza tra i conduttori (la loro media geometrica, se le distanze sono diverse); questa reattanza è pari alla metà della (7.3.3.1) che compete ad una linea monofase; ad essa si associa la *reattanza chilometrica* $X_\ell = X/\ell$, formalmente attribuita a un chilometro dell'unico conduttore di fase, che risulta uguale a quella espressa in (7.3.3.2) per ciascun conduttore della linea monofase.

Dunque l'impedenza di linea dello schema ridotto monofase di una linea trifase a tre o quattro fili è pari alla metà di quella di una linea monofase corrispondente.

7.4 TOPOLOGIA DELLE LINEE ELETTRICHE DI POTENZA

Una linea elettrica appartenente ad un sistema elettrico di potenza può alimentare uno o più carichi. In relazione alle condizioni di alimentazione della linea, si possono presentare le seguenti topologie.

- **Linea a sbalzo.** La linea è alimentata ad una sola estremità, ove viene fornita tutta la potenza necessaria per alimentare i carichi; si può presentare un solo carico connesso all'estremità opposta, oppure più carichi distribuiti lungo la linea: le due situazioni sono illustrate negli schemi unifilari delle Figura 7.4.1a e 7.4.1b ^{III}; è questa la topologia più semplice, ma essa è caratterizzata da una bassa continuità di esercizio, dato che, in caso di interruzione, tutti i carichi a valle di essa rimangono privi di alimentazione.
- **Linea alimentata alle due estremità.** L'alimentazione alle due estremità avviene tipicamente alla stessa tensione (Fig. 7.4.1c); tale topologia garantisce una buona continuità di esercizio dato che, interrompendo la linea, tutti i carichi continuano ad essere alimentati, da un'estremità o dall'altra.
- **Linea ad anello.** La linea è chiusa su se stessa in modo da formare un anello ed è alimentata in corrispondenza di una sua qualunque sezione (Fig. 7.4.1d); il comportamento è analogo a quello della linea alimentata alle due estremità. La continuità di esercizio è intermedia tra le due precedenti.

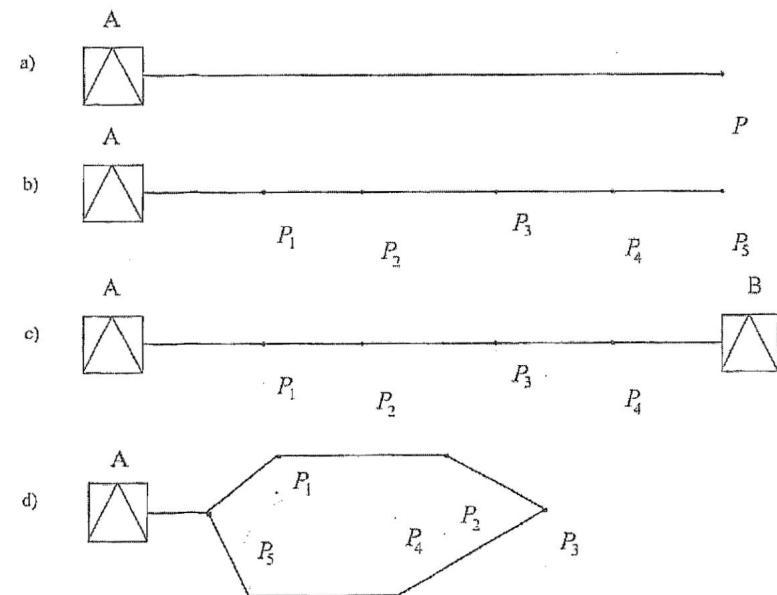


Figura 7.4.1

^{III} In uno schema unifilare viene indicata una sola linea geometrica, a prescindere dal numero di conduttori effettivamente presenti nella linea elettrica, i simboli A e B indicano le alimentazioni.

7.5 CADUTA DI TENSIONE IN LINEA

I generatori che alimentano una linea di potenza forniscono un livello di tensione V_A pressoché costante, indipendentemente dalle condizioni di carico. Parametro fondamentale della linea è la caduta di tensione in linea:

$$\Delta V = V_A - V_{\min} ; \quad (7.5.1)$$

per le *linee in DC* V_A è la tensione applicata dal generatore e V_{\min} la tensione minima, applicata all'utente più sfavorito; per le *linee in AC* V_A e V_{\min} sono valori efficaci; per le *linee trifasi* si fa riferimento alle tensioni concatenate. La caduta di tensione dipende dalle caratteristiche elettriche della linea ma anche dal numero dei carichi, dalla loro dislocazione e dalle potenze che assorbono.

Le linee elettriche sono dimensionate in modo che, in ogni condizione di normale funzionamento, ΔV sia sempre molto contenuta (entro pochi percento della tensione di alimentazione), per garantire che ai carichi siano applicate tensioni che si scostano di poco dalla tensione nominale. La caduta di tensione può essere determinata accuratamente simulando per via numerica la rete mediante gli schemi equivalenti di ciascuna delle apparecchiature presenti (generatori, linea, carichi, ...).

Una valutazione approssimata, ma più immediata, della caduta di tensione in linea può essere ottenuta assumendo di conoscere le correnti assorbite dai carichi (nonché i fattori di potenza $\cos\phi_h$ dei rispettivi carichi, che sono quasi sempre ohmico-induttivi, nel caso dei sistemi in AC monofase o trifase). Infatti, dato che la caduta di tensione ΔV deve essere percentualmente piccola, in prima approssimazione è ragionevole assumere che i carichi assorbo una potenza pari a quella nominale P_{nh} ^{IV}; e che le correnti siano pari alle nominali:

$$I_h = \frac{P_{nh}}{V_n}, \quad I_h = \frac{P_{nh}}{V_n}, \quad I_h = \frac{P_{nh}}{\sqrt{3}V_n}, \quad (7.5.2)$$

rispettivamente per utenze in DC, AC monofase e AC trifase.

7.5.1 Sezione di linee elettriche e caduta di tensione

Nel seguito vengono mostrati alcuni esempi di calcolo della sezione di linee elettriche in base al criterio della massima caduta di tensione ammissibile.

7.5.1.1 Linea DC a sbalzo con più carichi

Si consideri una linea in DC (Fig. 7.5.1.1). Per calcolare la caduta di tensione lungo la linea si dovrà tenere conto dell'effetto della sola resistenza. La linea alimenti più carichi in punti diversi e sia realizzata sempre con la stessa sezione di conduttore S su tutta la sua lunghezza.

Le correnti i_1, i_2, i_h e i_k , come spiegato sopra, possono essere calcolate considerando per tutti i carichi la tensione nominale:

^{IV} I dati di targa dei carichi riportano o permettono di ricavare la potenza nominale [VA], la tensione nominale [V], la corrente nominale [A] e, per i carichi in alternata, anche il fattore di potenza.

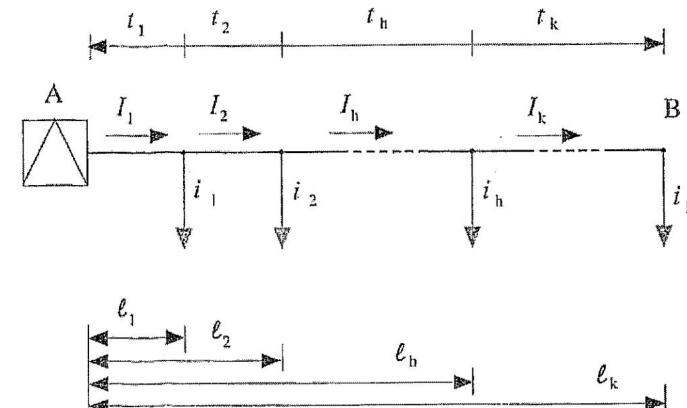


Figura 7.5.1.1

$$j_k = \frac{R_k}{V} \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (7.5.1.1)$$

Considerati i percorsi di andata e ritorno delle correnti che insistono nei vari tratti, lungo la linea si ha la seguente caduta di tensione per ogni tratto di lunghezza t_k :

$$\Delta V_k = \frac{2\rho t_k I_k}{S} = \frac{2\rho t_k}{S} \sum_{j=k}^n i_j \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (7.5.1.2)$$

La caduta di tensione all'estremità della linea sarà la somma delle cadute lungo i vari tratti:

$$V_A - V_B = \Delta V = \sum_{k=1}^n \Delta V_k = \frac{2\rho}{S} \sum_{k=1}^n t_k I_k. \quad (7.5.1.3)$$

Sviluppando la relazione precedente si può scrivere:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{2\rho}{S} [i_1(t_1 + \dots + t_n) + i_{n-1}(t_1 + \dots + t_{n-1}) + \dots + i_2(t_1 + t_2) + i_1 t_1] = \\ &= \frac{2\rho}{S} \sum_{k=1}^n i_k \sum_{j=1}^k t_j = \frac{2\rho}{S} \sum_{k=1}^n i_k \ell_k \end{aligned} \quad (7.5.1.4)$$

essendo $\ell_k = \sum_{j=1}^k t_j$ (Fig. 7.5.1.1).

Imponendo nella (7.5.1.4) la massima caduta di tensione ammissibile ΔV_{amm} , si ottiene la minima sezione utilizzabile:

$$S = \frac{2\rho}{\Delta V_{\text{amm}}} \sum_{k=1}^n i_k \ell_k. \quad (7.5.1.5)$$

Lo stesso risultato si può ottenere anche applicando il principio di sovrapposizione degli effetti.

7.5.1.2 Linea AC monofase a sbalzo con un solo carico

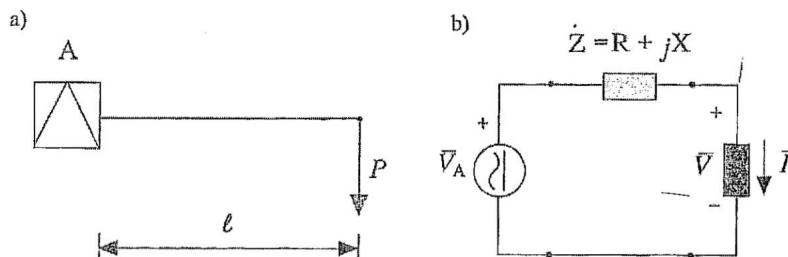


Figura 7.5.1.2

Si consideri anzitutto una linea a sbalzo di lunghezza ℓ che alimenta un solo carico il quale assorbe la potenza P (Figura 7.5.1.2a). Anche in questo caso, ai fini del calcolo della caduta di tensione, si può assumere che la linea sia alimentata a tensione imposta, pari a \bar{V}_A in notazione fasoriale, come se il generatore fosse ideale; la linea può essere rappresentata secondo lo schema di Figura 7.3.3.1, che comprende l'impedenza di linea (7.3.3.3):

$$\dot{Z} = R + jX = \frac{2\rho}{S} \ell + j2X_\ell \ell. \quad (7.5.1.6)$$

Si ottiene così la rete equivalente di Fig. 7.5.1.2b, governata dall'equazione:

$$\bar{V} = \bar{V}_A - (R + jX)\bar{I}. \quad (7.5.1.7)$$

Ad essa corrisponde il diagramma fasoriale di Figura 7.5.1.3, simile al diagramma di Kapp dei trasformatori (§ 1.2.8.2) e pertanto, come in quel caso, la caduta di tensione (ossia la differenza fra i valori efficaci delle tensioni) è pari al segmento AD; assumendo che lo sfasamento tra le tensioni \bar{V}_A e \bar{V} sia piccolo^V, questo è approssimabile con il segmento AC e vale quindi:

^V Tale ipotesi vale dato che, come assunto, le tensioni \bar{V}_A e \bar{V} differiscono di poco.

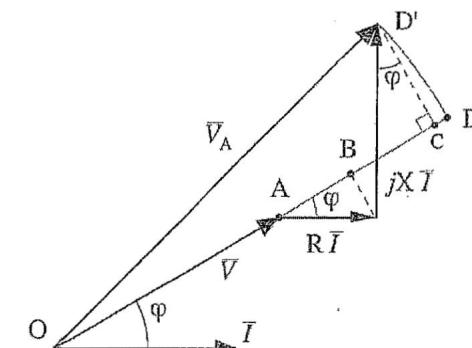


Figura 7.5.1.3

$$\Delta V = V_A - V \cong R I \cos \varphi + X I \sin \varphi. \quad (7.5.1.8)$$

Dunque ΔV è pari alla somma di due addendi, detti caduta di tensione attiva e caduta di tensione reattiva:

$$\begin{cases} \Delta V_a = R I \cos \varphi = \frac{2\rho}{S} \ell I_a, \\ \Delta V_r = X I \sin \varphi = 2X_\ell \ell I_r \end{cases} \quad (7.5.1.9)$$

ove $I_a = I \cos \varphi$ e $I_r = I \sin \varphi$ sono le componenti attiva e reattiva di I . Perciò:

$$\Delta V \cong \Delta V_a + \Delta V_r. \quad (7.5.1.10)$$

Se la linea è corta e la reattanza X è trascurabile, si può porre:

$$\Delta V \cong R I \cos \varphi = \Delta V_a. \quad (7.5.1.11)$$

Se il fattore di potenza è $\cos \varphi \cong 1$, si ha $\sin \varphi \cong 0$: a maggior ragione la caduta di tensione coincide con il solo addendo attivo: $\Delta V \cong \Delta V_a$.

7.5.2 Linee elettriche trifasi

Ad una linea trifase simmetrica ed equilibrata, si può associare la rete monofase equivalente, con la quale il problema si riconduce alla casistica delle linee monofasi esaminate in § 7.5.1. Va precisato che, in accordo con quanto visto in § 7.3.3.2, l'impedenza longitudinale della linea trifase dall'estremità A al punto di prelievo h-esimo:

$$\dot{Z}_{Ah} = \sum_{i=1}^h \dot{Z}_i = \left(\frac{\rho}{S} + j X_{\ell} \right) \ell_{Ah} \quad (7.5.2.1)$$

è uguale alla metà di quella che compete alla linea monofase corrispondente, indicata in (7.5.1.6). Inoltre, il modello monofase di una linea trifase considera le tensioni stellate, sicché le (7.5.1.9) e (7.5.1.10), adattate al caso trifase, forniscono le cadute delle tensioni stellate ΔE_a , ΔE_r e ΔE ; dato che la caduta di tensione è generalmente considerata sulle tensioni concatenate, le espressioni ottenute devono essere moltiplicate per $\sqrt{3}$, per fornire ΔV_a , ΔV_r e ΔV .

7.5.3 Cadute di tensione attive e reattive

Linee aeree. Si è visto in § 7.3.3.1 che nelle linee aeree in alternata alla frequenza di 50 Hz la reattanza chilometrica assume il valore tipico $X_t \approx 0,3 \Omega/\text{km}$: questo dà usualmente luogo ad una caduta di tensione reattiva ΔV_r confrontabile con quella attiva ΔV_a .

Linee in cavo. Nelle linee in cavo X_t è nettamente inferiore e inoltre è $\cos\phi_h \gg \sin\phi_h$, perché i carichi sono generalmente ben rifasati; risulta quindi $\Delta V_a \gg \Delta V_r$. Sono allora applicabili le ipotesi semplificative $\Delta V_r \approx 0$ e $I_{ah} = I_h \cos\phi_h \approx I_h$ (la prima ottimistica, la seconda cautelativa). Sotto tali ipotesi, le espressioni delle cadute di tensione delle linee in alternata, monofase e trifase, divengono analoghe a quella della linea in continua.

■ 7.6 COMPORTAMENTO TERMICO DELLE LINEE ELETTRICHE

Una linea percorsa da corrente è sede di dissipazione per effetto Joule, che ne provoca il riscaldamento. La sovratemperatura rispetto all'ambiente produce scambio termico per convezione ed irraggiamento; così la temperatura della linea sale fino a raggiungere l'equilibrio termico (il calore ceduto all'ambiente bilancia la potenza dissipata).

Linee aeree. In una linea aerea, realizzata con conduttori privi di isolamento, le dissipazioni sono in genere tali da comportare un sovrariscaldamento modesto.

Linee in cavo. L'isolamento peggiora lo scambio termico con l'ambiente e impone di limitare la temperatura massima onde prevenirne il danneggiamento. Per questo motivo i costruttori forniscono tabelle che indicano, per ogni tipo di cavo e per ogni sezione normalizzata S (ovvero normalmente disponibile in commercio), la corrente massima in regime permanente, detta portata del cavo, corrispondente alle diverse condizioni di posa (App. B).

■ 7.7 DIMENSIONAMENTO DELLE LINEE ELETTRICHE

7.7.1 Dimensionamento elettrico

Le apparecchiature elettriche funzionano correttamente se sono alimentate ad una tensione prossima a quella nominale V_n . Per garantire questa condizione a tutti i carichi connessi, la caduta di tensione ΔV della linea di alimentazione deve essere opportunamente limitata e quindi nel progetto di una linea essa costituisce una specifica.

Sono anche tipicamente fissate la tensione di alimentazione, le dislocazioni e le potenze nominali dei carichi; risultano pertanto note le correnti nominali. Pure nota è la resistività del materiale conduttore (tipicamente il rame o, eventualmente, l'alluminio). Imponendo, nelle equazioni dedotte in § 7.5, la caduta di tensione ammessa ΔV , resta definita la sezione minima S necessaria per i conduttori stessi. Ad esempio per una linea in continua, dalla (7.5.1.5) si deduce:

$$S \geq \frac{2P}{\Delta V} \sum_{h=1}^k \ell_{Ah} I_h ; \quad (7.7.1)$$

questa espressione può essere utilizzata anche per una linea in alternata con caduta di tensione reattiva trascurabile (come avviene per le linee in cavo, § 7.5.3).

Invece nel caso di una linea in alternata (monofase o trifase) con caduta di tensione reattiva non trascurabile (come avviene per le linee in aria, § 7.5.3), la determinazione della sezione S è complicata dal fatto che sia la resistenza che la reattanza dipendono da S secondo espressioni che rendono non invertibile analiticamente la (7.5.1.8). La soluzione può essere determinata per via iterativa, ipotizzando inizialmente un valore verosimile della reattanza chilometrica, tipicamente $X_t' = 0,3 \Omega/\text{km}$. Con questo, facendo uso delle (7.5.1.9) si esegue una prima stima della caduta di tensione reattiva $\Delta V_r'$ e quindi usando anche la (7.5.1.8) si ricava una prima stima della sezione:

$$S' \geq \frac{2P}{\Delta V_a'} \sum_{h=1}^k \ell_{Ah} I_{ha} \quad \text{con} \quad \Delta V_a' = \Delta V - \Delta V_r'. \quad (7.7.2)$$

Si calcola poi, con la (7.3.3.2) la reattanza chilometrica X_t'' , corrispondente a tale valore S' ; la distanza h tra i conduttori è imposta dalla tensione della linea in relazione ai problemi di isolamento. Qualora X_t'' differisca marcatamente da X_t' si ripete il calcolo con tale nuovo valore di reattanza chilometrica. Generalmente sono sufficienti un paio di iterazioni per individuare la sezione minima necessaria.

La sezione dei conduttori va scelta in realtà fra quelle commercialmente disponibili per il tipo di conduttore prescelto: essa è ovviamente quella di valore immediatamente superiore a quello minimo determinato con relazioni del tipo (7.7.1) o (7.7.2).

7.7.2 Dimensionamento termico

Per le linee in cavo il dimensionamento termico consiste nell'adottare sezioni tali da garantire che in nessun punto la temperatura raggiunga valori pericolosi per l'isolamento.

Va anzitutto scelto il tipo di cavo, in funzione del numero di conduttori, del livello di isolamento (che deve essere adeguato alla tensione nominale della linea) e del tipo di posa (interrata, in aria, ...). Va poi individuato il tratto di linea in cui la corrente presenta l'intensità più elevata I_{max} (si tratta sempre di un tratto adiacente ad una sezione di alimentazione) e quindi, facendo uso delle tabelle fornite dal costruttore (App. B), si individua la sezione che ha portata non inferiore a I_{max} .

Il cavo deve inoltre essere idoneo all'impiego cui è destinato, in relazione agli aspetti di sicurezza, quali: resistenza agli agenti corrosivi, non propagazione della fiamma, bassa emissione di fumi in caso di incendio, ecc.^{VI}.

7.7.3 Dimensionamento complessivo

La sezione del conduttore da adottare è la maggiore tra quelle dedotte dal dimensionamento elettrico e dal dimensionamento termico, in modo che entrambe le condizioni siano rispettate. Mentre il dimensionamento termico non dipende dalla lunghezza della linea, quello elettrico comporta sezioni tanto maggiori quanto più lunga è la linea; pertanto, nel caso di linee brevi, è la condizione termica che impone la sezione; viceversa in quelle lunghe. In ogni caso la sezione adottata non può essere inferiore ai valori minimi stabiliti dalla normativa.

I criteri di dimensionamento illustrati sono utilizzati frequentemente, ma non sono gli unici possibili. Esistono infatti anche altri criteri, ad esempio quello della densità di corrente costante (che comporta sezioni di conduttore diverse per i tratti di linea aventi correnti diverse), oppure il criterio della massima economia (che minimizza il volume di materiale conduttore impiegato e che pure comporta tratti di linea con sezioni di conduttore diverse). Inoltre il vincolo potrebbe essere posto, invece che sulla massima caduta di tensione ammissibile, sulle perdite in linea, in modo da ottenere un prefissato rendimento di trasmissione^{VII}.

7.8 ALTRI ELEMENTI PER LA SCELTA DELLE LINEE ELETTRICHE

7.8.1 Effetto pelle

Un fenomeno specifico che si manifesta solo nei conduttori delle linee in alternata è l'effetto pelle (§ 14.14 – Vol.I), caratterizzato dallo spessore di penetrazione, che per il rame ed alla frequenza industriale $f = 50 \text{ Hz}$ vale $\delta \cong 10 \text{ mm}$. Quindi, se i conduttori hanno diametro superiore ad un paio di centimetri, la loro sezione è solo parzialmente utilizzata e si verificano dissipazioni elevate. Per tale motivo quando, in una linea aerea in alternata, sono necessarie elevate sezioni, si fa ricorso a funi con anima in acciaio e regione periferica in rame o lega di alluminio dimensionata per la totale corrente elettrica; l'anima d'acciaio ha solo funzione meccanica, consentendo una maggiore lunghezza delle campate tra i tralicci. Oppure, si suddivide ciascuna fase in più conduttori (tipicamente da 2 a 4) collegati in parallelo e tenuti separati da distanziali.

7.8.2 Corrente capacitiva

Altro effetto specifico delle sole linee in alternata è costituito dall'assorbimento di corrente capacitiva, anche a vuoto, ossia in assenza di potenza erogata ai carichi, a causa dei fenomeni capacitivi della linea, dei quali tiene conto la reattanza

^{VI} Il tipo di isolamento prescelto deve rispettare i vincoli imposti dalla normativa tecnica vigente, ad esempio dalle Norme CEI 11-17.

^{VII} Non vengono qui trattati altri aspetti del dimensionamento di una linea, quali quelli meccanici, del tipo di posa e di ancoraggio, dei supporti (in particolare dei pali o dei tralicci, per le linee aeree), della terminazione delle estremità.

$X_c = -1/\omega C$ associata alla capacità trasversale (7.3.1.3). Tale corrente risulta tanto più intensa quanto maggiore è la capacità e può assumere valori tali da impedire l'utilizzo in corrente alternata di linee in cavo più lunghe di poche decine di chilometri.

7.8.3 Livello di isolamento

Un altro parametro di confronto è costituito dal livello di isolamento che deve essere assicurato tra i conduttori e tra i conduttori e terra. Esso viene stabilito in rapporto ai valori massimi V_{\max} delle tensioni applicate. Pertanto valgono le seguenti considerazioni.

- Nella linea in continua bifilare, facendo ricorso allo schema di Figura 7.8.1.1, la tensione verso terra risulta metà di quella tra i conduttori: $V_{\max} = 0,5V$.
- Nella linea monofase si ha $V_{\max} = \sqrt{2} V \cong 1,41 V$. In casi particolari, ad esempio nelle linee per trazione ferroviaria ad alta velocità (§ 8.5.2), si collega a terra la mezzeria del secondario del trasformatore di alimentazione, per cui $V_{\max} = \sqrt{2}/2 V = 0,7 V$.
- Nella linea trifase, che presenta le tensioni concatenate tra i conduttori e quelle stellate verso terra, si ha $V_{\max} = \sqrt{2} E = \sqrt{2/3} V \cong 0,82 V$.

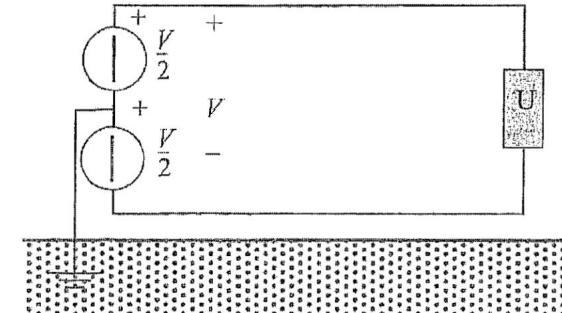


Figura 7.8.1.1

7.8.4 Scelta del sistema di trasmissione

La scelta tra trasmissione in AC o DC viene generalmente determinata prescindendo dai confronti qui illustrati, perché risultano prioritari altri criteri, quali i vantaggi delle macchine in DC o in AC in relazione alla generazione, alla trasformazione e all'utilizzazione dell'energia elettrica. Determinante è il fatto che la fornitura dell'energia elettrica nei sistemi di potenza avviene pressoché sempre in corrente alternata e a questa sono destinati quasi tutti gli apparecchi utilizzatori disponibili sul mercato; infatti i sistemi di potenza in continua sono limitati a poche specifiche applicazioni.

In conclusione, i sistemi in AC trifase vengono utilizzati per la generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica grazie alla:

- semplicità costruttiva ed efficienza degli alternatori;
- semplicità ed efficienza dei sistemi di variazione della tensione delle linee di trasmissione;
- fornitura di potenza costante, molto importante per evitare ondulazioni di coppia nei motori trifase;
- efficienza nell'interruzione della corrente, che si annulla due volte ad ogni periodo.

Di contro i sistemi in DC sono tuttora usati per la trazione elettrica per compatibilità con il materiale rotabile più vecchio e perché sarebbe troppo costoso sostituire tutte le linee DC esistenti. I progressi nell'elettronica di potenza consentono comunque di utilizzare motori asincroni o sincroni posizionando i convertitori a bordo delle motrici. In tal modo i convogli internazionali possono adattarsi facilmente ai diversi standard di tensione presenti nei paesi dell'Unione Europea, senza che venga cambiata la motrice.

Infine, per trasmissione di potenza in condizioni particolari e per collegamenti punto-punto si usano segmenti di rete in DC (§ 8.5).

Capitolo 8

SISTEMI ELETTRICI DI POTENZA

8.1 GENERALITÀ

8.1.1 Caratteristiche dell'energia elettrica

Le società sviluppate richiedono ingenti risorse energetiche che vengono utilizzate per azionare mezzi di trasporto, produrre lavoro meccanico, illuminazione, riscaldamento o raffrescamento, dar luogo a trasformazioni chimiche, effettuare elaborazione e trasmissione dell'informazione e per diversi altri usi. Nella maggioranza dei casi, l'utilizzatore finale dell'energia non si trova nelle immediate vicinanze della fonte di energia primaria (tipicamente un impianto di estrazione o raffinazione del combustibile fossile) o dall'impianto di trasformazione in altra forma di energia (tipicamente un impianto di produzione dell'energia elettrica).

L'energia elettrica non è una fonte primaria, bensì costituisce un vettore energetico particolarmente adatto al trasporto ed all'utilizzazione, sia su larga che su piccola scala, nei settori civile, industriale e mobilità. Per questi motivi circa un terzo dell'energia utilizzata viene fornita in forma elettrica, e il consumo annuo pro capite di energia elettrica costituisce un indicatore del grado di sviluppo industriale e sociale di una nazione o di una regione (Tabella 8.1.1.1).

Italia	4.896
Unione Europea	5.407
Stati Uniti d'America	11.786
America	5.625
Asia	2.217
Africa (escluso Sudafrica)	512
Sudafrica	3.544
Oceania	6.644
Mondo	2.725

Tabella 8.1.1.1 Consumi annui pro capite di energia elettrica nel 2015 (kWh).

¹ Da: "Dati statistici: confronti internazionali", Terna S.p.A., 2017.

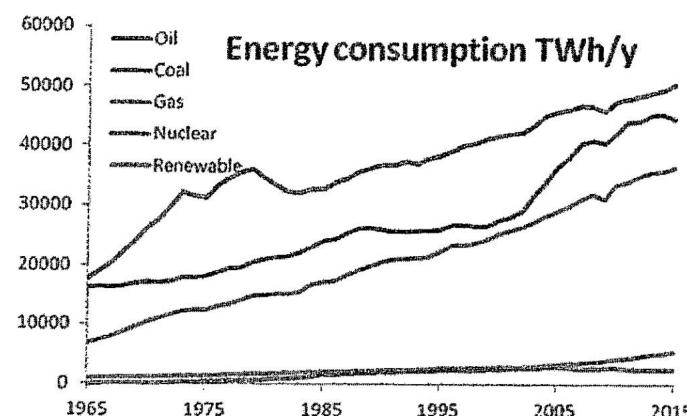


Figura 8.1.1.1 Andamento dei consumi energetici nel mondo tra il 1965 e il 2015, distinti per fonte primaria.

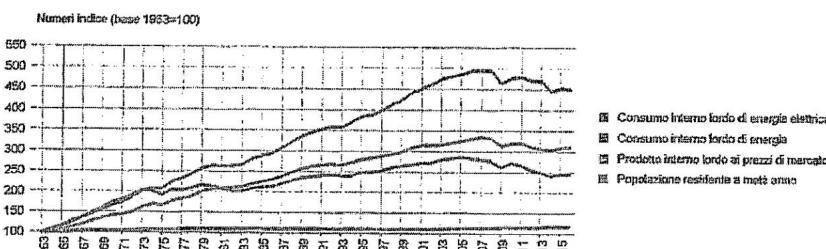


Figura 8.1.1.2 Andamento normalizzato del consumo complessivo di energia e del consumo di energia elettrica in Italia, confrontati con l'andamento del prodotto interno lordo e della popolazione tra il 1963 ed il 2015.

A livello globale i consumi energetici delle fonti di energia primaria sono in continua espansione, come mostrato dalla Figura 8.1.1.1^{II}.

È interessante notare come il tasso di crescita dei consumi di energia elettrica risulta ancora maggiore di quello dei consumi energetici complessivi. A titolo di esempio, in Italia il consumo interno lordo di energia elettrica e il consumo interno lordo di energia a partire dagli anni sessanta hanno presentato gli andamenti illustrati in Figura 8.1.1.2.^{III}

^{II} Da: "BP World Energy Consumption", 2016.

^{III} Da: "Dati statistici sull'energia elettrica in Italia", Terna S.p.A., 2017.

Un fondamentale vantaggio dell'energia elettrica è costituito, oltre che dalla versatilità, dalla facilità di distribuzione capillare nel territorio. Per contro è abbastanza difficile accumulare l'energia elettrica in modo economico e tecnologicamente semplice. L'unico accumulo attualmente utilizzato su larga scala è costituito dai bacini idrici collegati a centrali "di pompaggio" (§ 8.2.1.1). Tutte le forme di accumulo elettrochimico, elettrostatico e magnetico sono oggetto di intense ricerche, ma attualmente risultano troppo costose. Quindi la potenza elettrica richiesta in ogni istante dalle utenze deve essere generata quasi contemporaneamente. Il problema diviene ancora più rilevante in presenza di una quota sensibile di centrali solari fotovoltaiche e di centrali eoliche nelle quali, a differenza delle centrali termoelettriche, la potenza prodotta dipende istante per istante rispettivamente dalla intensità della radiazione solare e dalla velocità del vento, entrambe non del tutto prevedibili e comunque non controllabili.

L'adeguamento della potenza generata a quella richiesta viene semplificato interconnettendo il più possibile le utenze, in modo che le variazioni delle singole potenze richieste si compensino, per dare luogo ad un andamento temporale della domanda complessiva più regolare. Risultano in tal modo interconnesse anche le centrali di generazione, cosicché ciascuna di esse può fornire potenza nel modo tecnicamente ed economicamente più idoneo alle sue caratteristiche e risulta inoltre possibile mettere temporaneamente fuori servizio una centrale senza interruzioni del servizio alle utenze.

Il sistema elettrico ottenuto da questa interconnessione possiede struttura complessa; in Europa esso si estende dalla Scandinavia alla Grecia, dal Portogallo alla Russia. Il *sistema elettrico nazionale italiano* risulta perciò collegato ai sistemi delle nazioni confinanti di Francia, Svizzera, Austria, Slovenia, Grecia e sono in corso di realizzazione le interconnessioni con Albania e Montenegro.

Gli elementi di un sistema elettrico sono:

- i **sistemi di generazione centralizzati**: centrali termoelettriche (che utilizzano combustibili fossili), nucleari, idroelettriche, geotermiche;
- i **sistemi di generazione distribuiti**: tipicamente basati su fonti rinnovabili, solari fotovoltaici, eolici, a biomasse e di cogenerazione;
- le **linee elettriche di potenza**, che interconnettono centrali di generazione, nodi intermedi del sistema e utenze finali;
- le **stazioni di trasformazione e cabine di trasformazione** che, site nei nodi intermedi, interconnettono le diverse sezioni del sistema;
- le **utenze** (agricoltura, industria, artigianato, commercio, servizi, trasporti elettrificati, illuminazione pubblica, scuole, ospedali, abitazioni, ...) variamente e diffusamente distribuite sul territorio.

In Italia, gli impianti di produzione sono gestiti da vari operatori: aziende private, aziende multiservizi, ENEL S.p.A. La parte del sistema relativa alla trasmissione dell'energia elettrica è gestita quasi interamente da Terna S.p.A. La distribuzione è svolta, dopo la liberalizzazione introdotta dal decreto legislativo del 16 marzo 1999 n. 79, da varie società di diritto privato o aziende municipalizzate.

8.1.2 Sistemi elettrici in alternata

Nel *sistema elettrico* sono presenti tensioni nominali tra loro diverse, perché i generatori elettromeccanici di gran parte delle centrali di generazione funzionano con tensione di qualche chilovolt, mentre le linee elettriche richiedono tensioni di decine o centinaia di chilovolt. Le grandi e grandissime utenze (industriali, civili, ...) sono alimentate a tensioni che vanno dalle decine alle centinaia di chilovolt; invece le piccole e medie utenze (residenziali, commerciali, artigianali, ...) hanno tensione nominale compresa tra 100 e 400 V.

Nella stragrande maggioranza dei casi, i sistemi elettrici funzionano in corrente alternata (AC): questo permette innanzitutto di realizzare l'adeguamento tra i livelli di tensione dei diversi elementi per mezzo dei *trasformatori di potenza* (siti nelle stazioni e cabine di trasformazione) che sono macchine relativamente semplici, economiche, affidabili e capaci di rendimenti estremamente elevati (Cap. 1). Le linee di trasmissione in corrente continua (DC) sono utilizzate solamente per la trasmissione punto-punto su lunghe distanze (DC links) e sono collegate alla rete AC mediante *convertitori statici* (Cap. 2), che sono più complessi e costosi dei trasformatori, sia in termini di investimento che di esercizio.

Inoltre, per la generazione dell'energia elettrica si utilizzano soprattutto *macchine sincrone (generatori)*, che risultano affidabili, facilmente regolabili e presentano un elevato rendimento (Cap. 4); per produrre energia meccanica vengono prevalentemente utilizzate macchine *asincrone (motori a induzione)* semplici, robuste e dotate di un discreto rendimento (Cap. 5). In applicazioni particolari, dove siano necessarie una regolazioni precise della velocità o rendimenti molto elevati, vengono utilizzate macchine sincrone (*motori brushless*) che richiedono sistemi di conversione statica piuttosto evoluti.

Per tutti questi motivi, i sistemi elettrici nazionali sono in AC e le apparecchiature ed i carichi sono conseguentemente progettati per essere alimentati in AC. I sistemi nazionali sono sempre trifasi, per i vantaggi tecnici ed anche economici che presentano sui sistemi monofasi: l'alimentazione delle piccole utenze monofasi viene realizzata tra fase e neutro di un sistema trifase (in Italia a 230 V, essendo 400 V la tensione di linea nominale).

8.1.3 Livelli di tensione nei sistemi elettrici

Un sistema elettrico nazionale in AC presenta una successione di livelli di tensione come quella esemplificata in Figura 8.1.3.1, che rappresenta uno schema unifilare (§1.3.4.1) con i livelli di tensione tipici del sistema elettrico italiano (essi sono indicati con gli acronimi di uso comune descritti in Tabella 8.1.3.1).

Peraltro la normativa tecnica italiana^{IV} classifica i livelli di tensione dei sistemi elettrici nelle quattro categorie indicate in Tabella 8.1.3.2.

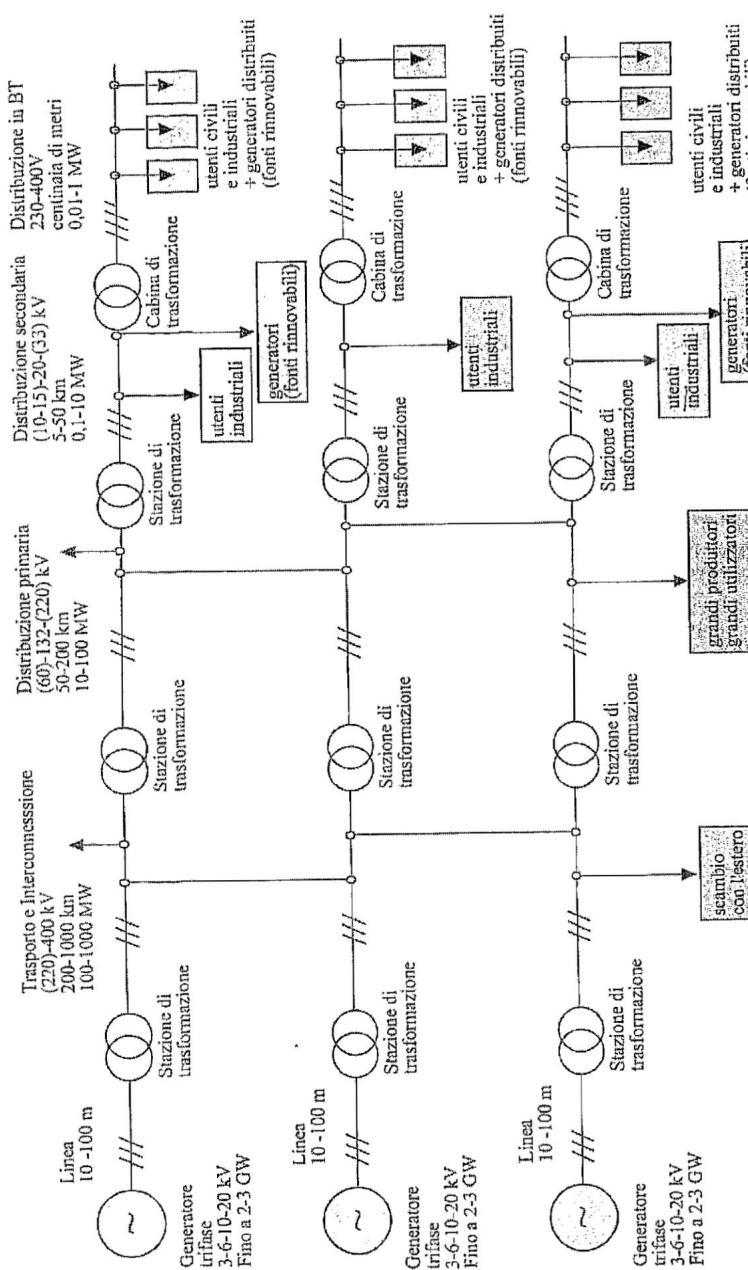


Figura 8.1.3.1 Livelli di tensione in un sistema elettrico.

^{IV} Norme CEI 11-1 e CEI 64-8/1.

Fasce di tensione	Tensioni nominali
BT: bassa tensione	$V \leq 1.000 \text{ V}$
MT: media tensione	$1.000 \text{ V} < V \leq 30 \text{ kV}$
AT: alta tensione	$30 \text{ kV} < V \leq 132 \text{ kV}$
AAT: altissima tensione	$V > 132 \text{ kV}$

Tabella 8.1.3.1 Classificazione di uso corrente dei livelli di tensione.

Categoria	Tensioni alternate	Tensioni continue
0	$V \leq 50 \text{ V}$	$V \leq 120 \text{ V}$
1	$50 \text{ V} < V \leq 1.000 \text{ V}$	$120 \text{ V} < V \leq 1.500 \text{ V}$
2	$1.000 \text{ V} < V \leq 30.000 \text{ V}$	$1.500 \text{ V} < V \leq 30.000 \text{ V}$
3	$V > 30.000 \text{ V}$	$V > 30.000 \text{ V}$

Tabella 8.1.3.2 Classificazione normativa in funzione dei livelli di tensione.

I livelli di tensione utilizzati nel sistema elettrico nazionale italiano sono in gran parte unificati, al fine di ridurre le scorte di ricambi e di semplificare ed economizzare gli interventi di manutenzione, modifica ed ampliamento. I livelli unificati per i sistemi trifase sono: 400 kV, 132 kV, 20 kV e 400 V; sono ancora impiegati anche i livelli 220 kV, 60 kV, 15 kV e 10 kV, che tuttavia non vengono più adottati per nuovi impianti^V.

I vari sottosistemi del sistema elettrico nazionale presentano valori efficaci di tensione che si scostano di pochi percento dai valori nominali, in modo da assicurare il corretto funzionamento delle utenze stesse. Ancor più rigoroso è il controllo della frequenza comune a tutti i sistemi nazionali interconnessi, che è di 50 Hz in Europa e di 60 Hz in America (*frequenza industriale*). Ad esempio la rete europea garantisce le forniture in bassa tensione alla frequenza di 50 Hz $\pm 2\%$.

8.2 SISTEMI DI GENERAZIONE

I sistemi di generazione dell'energia elettrica possono essere centralizzati, denominati anche *centrali di produzione* dell'energia elettrica o semplicemente *centrali elettriche*, oppure *sistemi di generazione distribuita* sul territorio.

I sistemi centralizzati sono i più efficienti per utilizzare energia da combustibili fossili o nucleari, oppure energia idroelettrica. In questi casi si realizza la conversione elettromeccanica mediante generatori sincroni (*alternatori*), aventi tensioni nominali dell'ordine della decina di kilovolt. Come detto in § 4.7, i generatori sono dotati di sistemi di regolazione per garantire che il valore efficace della tensione sia mantenuto quasi costante al variare delle condizioni di carico richieste da parte degli utenti.

^V Permangono anche sottosistemi con tensioni non unificate.

Il motore primo che mette in rotazione i generatori fornendo la potenza meccanica è costituito quasi sempre da una turbina, che può essere idraulica, a vapore, a gas (di tipo aeronautico, nel caso del ciclo combinato).

Una centrale può disporre di uno o più gruppi turbina-alternatore (*turboalternatori*) connessi in parallelo con livelli di potenza complessiva che possono essere di decine di megawatt per le piccole centrali e di alcuni gigawatt per le centrali di taglia maggiore.

A valle degli alternatori è posta una *stazione elevatrice* che adegua la tensione dei generatori a quella, assai maggiore, della linea di trasporto alla quale la centrale è connessa. Ogni centrale comprende anche numerose altre apparecchiature, come interruttori, sezionatori, sistemi di misura delle diverse grandezze fisiche (non solo elettriche), sistemi di regolazione e calcolatori che realizzano automaticamente il monitoraggio, la regolazione e l'allarme in caso di guasto; l'intero sistema è tenuto costantemente sotto osservazione dal personale addetto che opera nelle sale di controllo.

Le centrali di generazione si differenziano per la fonte primaria di energia utilizzata, che condiziona la localizzazione della centrale, benché questa sia anche definita in funzione dell'impatto ambientale e della distribuzione territoriale della domanda, essendo preferibili i siti in posizioni baricentriche rispetto a regioni con forti concentrazioni di utenze. Vengono definite centrali ad energia rinnovabile le centrali idroelettriche, le centrali che utilizzano l'energia delle maree e quelle che utilizzano il calore endogeno terrestre, distinguendole così da quelle termoelettriche a combustibile fossile o nucleare.

Importanza sempre crescente, per numero di installazioni e potenza complessiva, hanno i sistemi di *generazione distribuita* che non necessitano di grandi infrastrutture, soprattutto quelli che utilizzano fonti di energia rinnovabili (radiazione solare, energia eolica, energia di piccoli corsi d'acqua, energia da biomasse). Tali fonti sono per loro natura distribuite sul territorio e possono essere utilizzate in impianti collegati alla rete di distribuzione nazionale, oppure essere anche autonomi (*ad isola*), nei casi in cui il collegamento alla rete non sia possibile o conveniente.

Per questi sistemi, che hanno potenza tipicamente fino a qualche megawatt, si usano macchine sincrone a magneti permanenti o anche macchine asincrone. Il motore primo è molto spesso una turbina, a vapore o eolica o idraulica, a seconda dei casi.

Gli impianti fotovoltaici, in cui l'energia della radiazione solare viene invece convertita direttamente in energia elettrica in bassa tensione continua, richiedono, oltre alle celle, anche appositi convertitori DC/AC.

Nelle Tabelle 8.2.1^{VI} e 8.2.2^{VII} sono riportate le quantità di energia elettrica prodotta rispettivamente a livello mondiale (2015) ed in Italia (2015 e 2016), suddivise per tipo di centrale di generazione.

^{VI} Da: "Dati statistici: confronti internazionali", Terna S.p.A., 2017.

^{VII} Da: "Dati statistici sull'energia elettrica in Italia", Terna S.p.A., 2017.

Tipi di produzione	TWh	%
Idroelettrica	3.987,800	16,50
Termoelettrica a combustibile fossile	16.351,600	67,90
Elettronucleare	2.574,100	10,70
Geotermica	80,749	0,33
Fotovoltaica	252,843	1,05
Eolica	846,959	3,52
Produzione totale	24.094,100	100,00

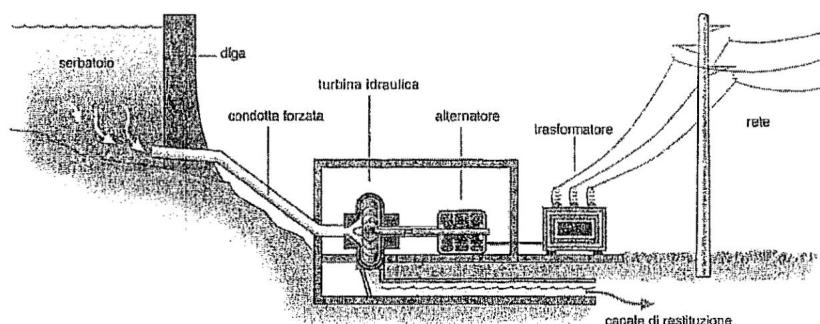
Tabella 8.2.1 Produzione mondiale di energia elettrica nel 2015.

Tipi di produzione	TWh		%	
	2015	2016	2015	2016
Idroelettrica	46.969,5	44.257,0	16,6	15,3
Termoelettrica a comb. foss.	192.053,5	199.429,7	67,9	68,8
Geotermica	6.185,0	6.288,6	2,2	2,2
Fotovoltaica	22.942,2	22.104,3	8,1	7,6
Eolica	14.843,9	17.688,7	5,2	6,1
Produzione totale	282.994,1	289.768,3	100,0	100,0

Tabella 8.2.2 produzione di energia elettrica in italia nel 2015 e 2016.

8.2.1 Tipi di centrali elettriche di generazione

8.2.1.1 Centrali idroelettriche

Figura 8.2.1.1 Sezione di impianto idroelettrico a bacino^{VIII}^{VIII} GSE - Rapporto statistico impianti a fonti rinnovabili 2011.

Nelle centrali idroelettriche le turbine sono azionate dall'energia cinetica dell'acqua. Le *centrali ad acqua fluente* sfruttano l'acqua di un alveo fluviale, caratterizzata da elevata portata e salto piezometrico modesto. Le *centrali a serbatoio* o *a bacino* utilizzano l'acqua accumulata in un bacino idroelettrico naturale o artificiale posto a monte, che viene accelerata in *condotte forzate* ove si realizzano salti piezometrici più o meno elevati (Fig. 8.2.1.1). Queste ultime vengono anche usate come accumulatori di energia (*centrali di pompaggio*) che, nelle ore notturne, utilizzano le macchine elettriche come motori e le macchine idrauliche (turbine reversibili) come pompe: infatti in esse l'energia elettrica generata da altre centrali, in esubero rispetto alla domanda delle utenze, viene utilizzata per ricostituire la scorta d'acqua del serbatoio a monte; tale scorta viene poi utilizzata nelle ore di maggiore richiesta (*servizio di punta*).

Nel caso di grandi portate d'acqua fluente con modesti salti piezometrici si usano turbine *Kaplan*, a bassa velocità; per salti maggiori si ricorre alle turbine *Francis*, mentre per salti elevati e portate relativamente limitate vengono impiegate turbine *Pelton*, particolarmente veloci, ma non reversibili. Queste ultime consentono di variare rapidamente la potenza erogata (con tempi caratteristici dell'ordine di pochi secondi), agendo sul flusso d'acqua immessa in turbina: quindi le centrali a serbatoio con elevati salti sono particolarmente adatte a fare fronte a rapide variazioni della potenza richiesta (servizio di punta).

La localizzazione di una centrale idroelettrica è imposta dalla collocazione territoriale della risorsa idrica; le centrali a serbatoio, tipicamente poste in zone montane, sono spesso alloggiate in caverne artificiali.

Le centrali idroelettriche, in particolare quelle ad acqua fluente, presentano lo svantaggio di dipendere da fattori stagionali, mitigato nelle centrali dotate di serbatoio dalle possibilità di accumulo. Hanno i pregi di utilizzare un vettore energetico rinnovabile ed estremamente economico e di non presentare emissioni inquinanti: nazioni scarsamente popolate e dotate di ingenti risorse idroelettriche (ad esempio la Norvegia) producono in questo modo pressoché tutta l'energia elettrica. Invece in altre nazioni (tra le quali l'Italia) l'energia idroelettrica può costituire solo una frazione minoritaria della produzione totale; in questi casi le risorse idriche sono ormai da decenni intensamente sfruttate e un maggiore utilizzo può risultare in conflitto con le esigenze di altre attività (ad esempio agricole) ed anche inaccettabile sotto il profilo ambientale (ad esempio per la creazione di bacini artificiali). Inoltre le centrali idroelettriche non sono prive di fattori di rischio per la popolazione: il disastro del Vajont del 9 ottobre 1963 causò oltre 2.000 vittime.

In zone montane esistono anche piccole centraline di potenza modesta completamente automatizzate che utilizzano generalmente macchine asincrone come generatori.

8.2.1.2 Centrali termoelettriche a combustibile fossile

Le *centrali termoelettriche a combustibile fossile* bruciano olio minerale, carbone o gas metano per convertire la loro energia di legame chimico in vapore surriscaldato e in pressione che effettua un ciclo termodinamico nel quale vengono azionate le *turbine a vapore*. Sono queste le centrali di dimensioni maggiori, con

potenze elettriche che possono superare il gigawatt. Il rendimento complessivo si aggira attualmente intorno al 40%^{IX}, perché nel ciclo gran parte del calore viene asportato dai sistemi di condensazione posti a valle delle turbine. Tale calore viene usualmente disperso nell'ambiente (nell'acqua di fiumi a grande portata, di lagune o del mare, producendone un modesto riscaldamento e quindi un'alterazione del microclima; in altri casi il calore viene ceduto all'atmosfera per mezzo di torri di evaporazione). Peraltra è sempre più diffusa l'adozione di impianti che sfruttano il calore di scarto per applicazioni a bassa temperatura, come il *teleriscaldamento* di quartieri urbani o di serre agricole, nel periodo invernale.

I fumi di combustione contengono anche polveri inquinanti; benché i camini siano dotati di dispositivi elettrostatici per la captazione delle polveri, un loro abbattimento completo non viene mai raggiunto e quindi le centrali termoelettriche a combustibile fossile sono sempre causa di inquinamento atmosferico, meno grave se il combustibile è metano, più grave se si tratta di carbone, perché questo contiene maggiori quantità di sostanze tossico-nocive e talora anche radioattive.

Limi propri delle turbine a vapore permettono variazioni limitate della potenza erogata, tra il 70% e il 100% del valore nominale, con tempi caratteristici molto maggiori di quelli delle centrali idroelettriche; pertanto le centrali termoelettriche sono adatte a fornire un servizio di base e a seguire solo parzialmente le variazioni giornaliere della domanda. Nelle centrali alimentate a metano vengono talvolta utilizzate *turbine a gas*, azionate direttamente dai prodotti di combustione del metano stesso. Combinando il ciclo a gas con un ciclo a vapore, grazie all'elevatissimo salto termico complessivo, si ottengono rendimenti complessivi anche maggiori di quelli delle centrali con turbine a vapore convenzionali, con la possibilità di variazioni di carico maggiori e più rapide.

Dato che la fornitura di combustibile viene preferibilmente eseguita per nave, le centrali termoelettriche sono tipicamente site in zone costiere e lungo grandi fiumi navigabili. Esse richiedono comunque siti molto vasti, non solo per la complessità dell'intero impianto, ma anche perché necessitano di ampie aree per lo stoccaggio delle scorte di combustibile, fondamentali per assicurare la continuità dell'esercizio: una centrale termoelettrica può estendersi anche per parecchie decine di ettari.

8.2.1.3 Centrali elettronucleari

Le *centrali elettronucleari* differiscono da quelle termoelettriche a combustibile fossile perché il calore viene prodotto dalle reazioni nucleari di fissione dell'*uranio* all'interno del *nocciolo*; esso viene quindi ceduto ad un fluido refrigerante primario in circuito chiuso che a sua volta lo cede all'acqua di un circuito secondario portandola allo stato di vapore; questo realizza un ciclo termodinamico analogo a quello delle centrali termoelettriche a combustibile fossile.

Queste centrali presentano quindi analoghi problemi di emissione nell'ambiente del calore in eccesso, ma non emettono in atmosfera fumi inquinanti; invece presentano il serio problema dello smaltimento delle *scorie radioattive*.

^{IX} Nelle centrali di recente concezione che utilizzano cicli combinati con turbine a vapore e turbine a gas sono possibili rendimenti complessivi che superano il 50% e in prospettiva potranno raggiungere il 60%.

Esse devono operare a potenza praticamente costante, dato che le variazioni di regime del nocciolo richiedono transitori lentissimi; si prestano pertanto a fornire esclusivamente un *servizio di base*.

Le centrali elettronucleari sono spesso osteggiate da un atteggiamento contrario della popolazione, benché nei paesi occidentali esse siano fra gli impianti di produzione meno inquinanti e in assoluto più sicuri. La centrale nucleare di Chernobyl, nell'allora Unione Sovietica, ove il 9 aprile 1986 avvenne un incidente con conseguenze catastrofiche, era sprovvista di molti fondamentali sistemi di sicurezza passiva e attiva, sempre presenti nelle centrali elettronucleari occidentali. In Italia il successivo referendum popolare del novembre 1987 ha di fatto bloccato l'esercizio delle centrali elettronucleari in attività e il completamento di quelle in costruzione.

L'incidente avvenuto nella centrale di Fukushima (Giappone) nel 2011, dovuto al terremoto (e conseguente maremoto) nel Tohoku ma anche ad una imprudente dislocazione degli impianti di raffreddamento, ha prodotto un nuovo ripensamento nell'adozione del nucleare come fonte di energia. Ciononostante, sono attualmente in costruzione nel mondo più di 60 nuove centrali, localizzate prevalentemente in Cina, in Russia ed in India.

8.2.1.4 Centrali geotermiche

Le *centrali geotermiche* sono simili alle centrali termoelettriche, salvo che non bruciano combustibili, ma sfruttano il *calore endogeno della terra* per produrre direttamente il vapore utilizzato nel ciclo termodinamico. Tali impianti possono quindi essere realizzati solo ove siano presenti *campi geotermici*, come avviene a Larderello, in Toscana.

8.2.1.5 Centrali mareomotrici

Le *centrali mareomotrici* sono analoghe alle centrali idroelettriche, salvo che sfruttano l'energia delle maree. Esse possono divenire economicamente interessanti quando le fluttuazioni del livello marino assumono valori rilevanti, come avviene in Francia, in Corea ed in Canada, ove si verificano maree comprese tra 8 e 15 metri.

8.2.1.6 Sistemi di generazione ad energia eolica

I *sistemi di generazione ad energia eolica* sfruttano l'energia del vento che captano con grandi turbine (*aerogeneratori*) generalmente a tre pale. I generatori elettrici che esse azionano di norma sono alternatori sincroni a magneti permanenti; per poter captare con maggiore efficienza l'energia in un intervallo abbastanza ampio di velocità del vento, gli aerogeneratori più moderni possono funzionare a velocità variabile e ciò richiede che il generatore sia connesso alla rete attraverso un convertitore di frequenza.

La potenza di un singolo aerogeneratore è compresa tra 600 kW e 4 MW. La loro installazione risulta conveniente solo ove spirano venti costanti con velocità di almeno 6 m/s, e vengono generalmente installati in luoghi scarsamente abitati, come



Figura 8.2.1.2 Generatori eolici.

del centinaio di megawatt (in particolare in Puglia, Calabria, Sicilia e Sardegna).

Centrali eoliche di dimensioni ancora maggiori sono in esercizio negli Stati Uniti, in Gran Bretagna, Danimarca e Germania.

8.2.1.7 Sistemi di generazione ad energia solare

I sistemi fotovoltaici convertono direttamente l'energia della radiazione solare in energia elettrica per mezzo di celle fotovoltaiche. Il rendimento dei pannelli fotovoltaici attualmente in commercio si attesta intorno al 15%: nelle migliori condizioni di insolazione la potenza elettrica generata può superare 100 W per metro quadro di superficie captante. Il costo dei pannelli è diminuito a seguito di una notevole produzione tra il 2010 e il 2015 e per questo il costo unitario dell'energia prodotta si avvicina oggi a quello delle fonti fossili. In ogni caso, per produrre quantità rilevanti di potenza elettrica è necessario impegnare grandi estensioni di terreno. Le centrali solari hanno inoltre lo svantaggio di produrre una potenza fortemente dipendente dai fattori climatici.

Oltre alla realizzazione di piccoli impianti di produzione per consumi domestici, in alcune zone dove la radiazione solare è particolarmente intensa (India, Marocco, California, ecc.) sono in esercizio o in avanzata fase di realizzazione impianti di produzione mediante energia solare con potenze dell'ordine delle centinaia di megawatt.

Sono inoltre in corso di sviluppo centrali solari termodinamiche, nelle quali la radiazione solare viene concentrata su un ricevitore centrale a torre o su ricevitori lineari, che, mediante la circolazione di olii o sali fusi ad alta temperatura, producono vapore da utilizzare in un ciclo termodinamico; rispetto alle centrali fotovoltaiche, queste ultime presentano il vantaggio di un rendimento più elevato e di una migliore continuità di servizio, grazie alla possibilità di integrare nel ciclo un accumulo di energia termica nei sali fusi. Tuttavia, per funzionare efficientemente necessitano di radiazione solare di elevata intensità, che si ha tipicamente solo in zone desertiche.

ad esempio in zone montane o in mare aperto a più di 3 km dalla costa (*installazioni off-shore*), in quanto hanno lo svantaggio di causare un forte inquinamento acustico (50 dB a 350 m dall'aerogeneratore). In alcuni casi (ad es.: in zone montane isolate o su piccole isole) i generatori eolici alimentano impianti ad isola, cioè scollegati dalla rete nazionale.

Nell'ultimo decennio in Italia sono state costruite, in condizioni climatiche e ambientali favorevoli, centrali eoliche con parecchie decine di aerogeneratori (Fig. 8.2.1.2), per potenze dell'ordine

8.2.1.8 Altre forme di generazione

Esistono anche altri *sistemi di generazione di energia elettrica*, in genere utilizzati per produrre potenze elettriche relativamente piccole. Tra essi possono essere considerati i sistemi che utilizzano rifiuti solidi urbani e biomasse, sia mediante combustione diretta di residui o attraverso la produzione di biogas (metano) che viene poi bruciato, per produrre vapore. Si usano anche motori primi diversi, ad esempio motori a combustione interna a ciclo Otto alimentati a metano (anche prodotto direttamente dalle biomasse).

Vanno anche ricordati i *gruppi elettrogeni*, sempre di potenza limitata, nei quali il generatore sincrono è azionato da un motore a combustione interna (in genere a ciclo diesel), che trovano frequente impiego nelle applicazioni mobili e nei gruppi di continuità.

Sono stati sviluppati anche impianti basati su celle elettrochimiche a combustibile (fuel cells) che possono convertire direttamente l'energia chimica dell'idrogeno o del metano in energia elettrica. Anche questi sistemi richiedono appositi convertitori DC/AC, ma attualmente sono utilizzati solo su veicoli e non sembrano adatti ad essere utilizzati su larga scala.

Su scala di potenza (e di efficienza) ancor più ridotta, si considerano anche i sistemi di recupero dell'energia detti di "energy harvesting". Un primo tipo, basato sull'effetto termoelettrico (effetto Seebeck) utilizza un piccolo salto termico, tipicamente legato a calore da smaltire, per produrre energia elettrica. Un secondo tipo, basato sull'effetto piezoelettrico, applicando una forza tra due oggetti in movimento relativo, produce energia elettrica rallentando il moto di uno dei due. Essi sono tipicamente utilizzati per alimentare sistemi di misura localizzati in zone difficilmente accessibili.

8.3 LINEE ELETTRICHE DI POTENZA

Le *linee elettriche* interconnettono i componenti di un sistema elettrico di potenza e differiscono tra loro per estensione e potenza nominale e quindi anche per tensione nominale, dato che la trasmissione viene effettuata a livelli di tensione tanto più elevati quanto maggiori sono le potenze da trasmettere e le distanze da coprire. Nelle descrizioni successive si fa specifico riferimento ai livelli di tensione ed alle modalità di collegamento del neutro adottati nel sistema elettrico italiano.

8.3.1 Linee elettriche di trasporto o interconnessione

Le centrali di generazione sono direttamente collegate alla rete magliata costituita dalle

- **Linee di trasporto in AAT (220 - 400 kV)** (o *trasmissione e interconnessione* - Fig. 8.3.1), che hanno estensione nazionale o regionale. Si tratta di linee trifasi senza neutro collegate, nelle *centrali di generazione* e nelle *stazioni di trasformazione*, a trasformatori di grande potenza che hanno gli avvolgimenti primari di AAT connessi a stella e i loro centri stella connessi a terra.

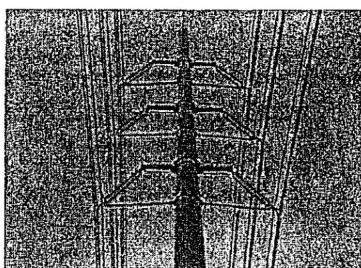


Figura 8.3.1 Linee aeree a 400 kV a doppia terna e a terna singola.

- **Linee di trasporto in AT (132 kV):** sono linee trifasi senza neutro (Fig. 8.3.2) e hanno struttura magliata ad estensione regionale; nelle *stazioni di trasformazione* sono collegate a trasformatori di grande potenza, che sono alimentati dalle linee di trasmissione in AAT e hanno gli avvolgimenti secondari, lato AT, con centri stella connessi a terra.

8.3.2 Linee elettriche di distribuzione

Le *linee di distribuzione* sono caratterizzate da dimensioni medie dei bacini di utenza più ridotte; possono avere strutture magliate o ad anello (specialmente nelle aree a più elevata densità di carico, per garantire migliori affidabilità e continuità di esercizio), ma sono anche frequenti le strutture ramificate (formate da lati che si diramano da un'origine comune). Esse si distinguono a seconda del livello di tensione.

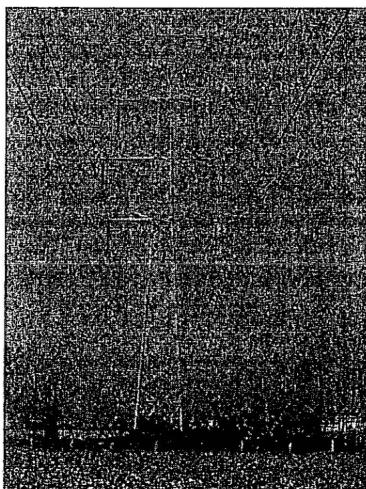


Figura 8.3.2 Linee aeree a 132 kV.

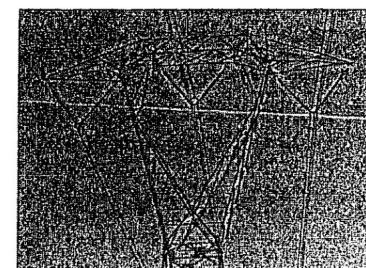


Figura 8.3.3 Linea aerea a 20 kV.

- **Linee di distribuzione in MT (20 kV) (Fig. 8.3.3):** sono linee trifasi senza neutro ad estensione comunale o intercomunale; sono collegate a trasformatori di media potenza, installati nelle *cabine primarie*, che sono alimentati dalle linee di distribuzione in AT e hanno gli avvolgimenti secondari, lato MT, collegati a triangolo o a stella con centro stella isolato. Le linee di distribuzione in MT raggiungono le *cabine secondarie*, che possono appartenere all'Ente erogatore oppure ai grandi utenti industriali e civili, per i quali è prevista la fornitura in MT.
- **Linee di distribuzione in BT (400/230 V):** sono linee trifasi con neutro, a struttura ramificata e diffusione capillare sul territorio; sono alimentate da trasformatori di piccola potenza, installati nelle cabine secondarie; gli avvolgimenti secondari sono collegati a stella con il centro stella connesso al neutro della linea in BT. Alimentano le piccole utenze (artigianali, industriali, commerciali, residenziali, ...) in trifase a 400 V o monofase a 230 V.

In Tabella 8.3.1 sono sintetizzati i parametri tipici delle diverse linee elettriche utilizzate dal sistema elettrico italiano.

Categoria di linea	V_n [kV]	Centro stella	Potenza max. [MVA]	Estensione max. [km]	Configurazione
Trasporto AAT	400 220*	a terra a terra	1400 300	totale 1000 tra nodi 70	aerea a grandi maglie
Trasporto AT	132 60*	a terra isolato	160 50	totale 200 tra nodi 30	aerea a maglie
Distribuzione MT	33* 20 10*	isolato	9	40	aerea ramificata
Distribuzione BT	0,400	connesso	0,2	1	aerea o in cavo ramificata

* Livelli di tensione in via di abbandono

Tabella 8.3.1

8.4 STAZIONI E CABINE DI TRASFORMAZIONE

Nelle stazioni e cabine di trasformazione si realizza la variazione dei livelli di tensione permettendo l'interconnessione dei diversi sottosistemi:

- nelle *stazioni* sono interconnesse le linee AAT e quelle AT;
- nelle *cabine primarie* sono interconnesse le linee AT e quelle MT;
- nelle *cabine secondarie* sono interconnesse le linee MT e quelle BT.

Esse sono provviste di trasformatori trifasi di potenza ed anche di molte altre apparecchiature, quali: componenti per la misura ed il monitoraggio (amperometri, voltmetri, wattmetri, contatori, calcolatori di controllo) elementi di protezione

e manovra (interruttori, fusibili, scaricatori, sezionatori, descritti nel Cap. 9) ed anche componenti che svolgono altre funzioni (ad esempio condensatori di rifasamento). In Figura 8.4.1 è mostrato un esempio di stazione di interconnessione con isolamento in aria, mentre la Figura 8.4.2 mostra una stazione di interconnessione isolata in esafluoruro di zolfo (SF_6).

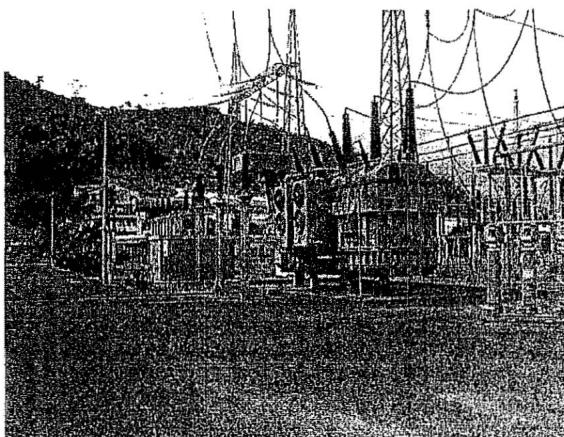


Figura 8.4.1 Stazione di interconnessione AT-AT.

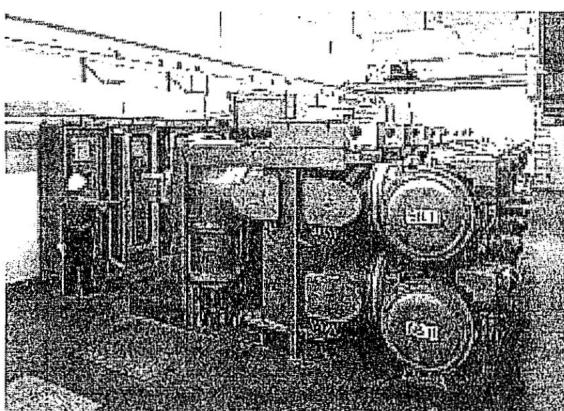


Figura 8.4.2 Stazione di interconnessione AT-MT in SF_6 .

8.5 SISTEMI ELETTRICI IN CORRENTE CONTINUA

Due importanti casi di sistemi elettrici in corrente continua, affermati da tempo, sono costituiti dalle linee di trasmissione HVDC, inizialmente per collegamenti sottomarini ma utilizzate poi anche per connettere sistemi diversi di reti AC, e dai sistemi di trazione elettrica.

8.5.1 Collegamenti HVDC

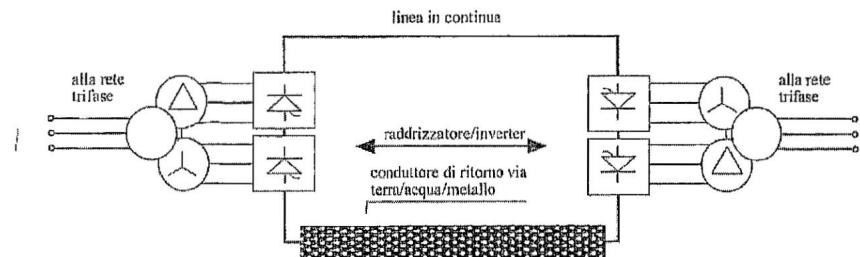


Figura 8.5.1

Per collegare reti dove la distanza tra le coste è tale da impedire il ricorso a linee aeree, è necessario utilizzare cavi sottomarini. Si è visto in § 7.8.2 che, se la loro lunghezza supera le decine di chilometri, il funzionamento in corrente alternata non è possibile, perché le correnti capacitive risulterebbero troppo intense. Pertanto questi collegamenti sono realizzati in corrente continua.

Essi sono chiamati usualmente *HVDC* (*High Voltage Direct Current*) e utilizzano cavi bipolari o, più spesso, unipolari, l'altro conduttore essendo costituito dall'acqua del mare. Richiedono due stazioni, una a ciascuna estremità, che sono connesse con i sistemi di potenza terrestri in alternata ed effettuano le conversioni AC/DC e DC/AC in modo reversibile. La Figura 8.5.1 mostra lo schema più generale di tale collegamento, dove il trasferimento di potenza tra le due reti AC viene realizzato variando l'angolo di accensione dei tiristori dei ponti a dodici impulsi (§ 2.2): la rete in cui tale angolo è minore di 90° è quella che eroga potenza (tensione positiva); la rete in cui tale angolo è compreso tra 90° e 150° è quella che assorbe potenza (tensione negativa). Schemi diversi sono possibili a seconda delle esigenze dei due sistemi. Il collegamento in continua lascia i due sistemi in alternata svincolati dal punto di vista della frequenza e delle relazioni di fase.

Esistono molti collegamenti di questo tipo; ad esempio quello tra Toscana-Corsica-Sardegna che usa una linea unipolare a 200 kV, quello tra Italia e Grecia a 400 kV (sempre unipolare) e quello tra Francia e Regno Unito a 500 kV (realizzato con quattro coppie di cavi unipolari, senza ritorno via mare).

I sistemi HVDC sono utilizzati anche per collegare due reti diverse in alternata operanti a frequenze diverse o anche alla stessa frequenza; tale collegamento è effettuato in DC per migliorare la stabilità del sistema.

8.5.2 Trazione elettrica

Un impiego di grande importanza dell'energia elettrica è costituito dalla *trazione elettrica* (treni, metropolitane, tram, filobus). Nella trazione ferroviaria e tranviaria si usano linee aeree unipolari, il secondo conduttore essendo costituito dai binari; nella trazione urbana su gomma (filobus) la linea aerea è bipolare. In entrambi i casi, la linea è alimentata per mezzo di stazioni di conversione poste ad opportuni intervalli (*tratte*) che forniscono la potenza necessaria alle motrici.

In particolare nella trazione ferroviaria in Italia la linea aerea è alimentata a 3000 V in DC per mezzo di stazioni di conversione AC/DC connesse al sistema elettrico nazionale in AC. La linea DC consente di utilizzare motori in DC eccitati in serie, che storicamente erano i più idonei alla trazione, presentando coppie di spunto elevatissime e campo di regolazione della velocità molto ampio; tale regolazione veniva effettuata mediante reostati collocati a bordo delle motrici. Attualmente, anche nel caso di linee in DC, si preferisce ricorrere a motori in AC, sincroni o asincroni, alimentati per mezzo di *inverter* che, posti a bordo dei locomotori, prelevano la potenza dalla linea in DC e la convertono in AC, regolandone sia frequenza che ampiezza, in funzione delle esigenze di carico.

L'attuale tendenza, specialmente per i treni ad alta velocità, è tuttavia quella di fare ricorso a linee in AC monofase a tensione molto più elevata, che permette di far fronte alle maggiori potenze richieste; ad esempio i treni ad alta velocità adottati in Francia (TGV) e Italia (TAV) sono alimentati a 25 kV in AC. La tensione viene ridotta a bordo mediante trasformatori, a valle dei quali convertitori statici raddrizzano la corrente, per alimentare in DC gli inverter che a loro volta alimentano motori sincroni o asincroni a tensione e frequenza variabili. Tale sistema di bordo rende compatibile il locomotore tanto con le linee in AC che con quelle in DC.

La Tabella 8.5.1 riporta i principali parametri delle più importanti linee di potenza in DC e per trazione.

	Posa	Estensione per tratta	potenza nominale	tensione nominale
Linee in continua				
		[km]	[MW]	[kV]
Collegamenti sottomarini	Cavo	50 ÷ 120	150 ÷ 2000	200 ÷ 500
Trazione tranviaria	Aerea	5	0,3 ÷ 0,7	0,6 ÷ 1,5
Trazione ferroviaria in continua	Aerea	5 ÷ 20	5 ÷ 10	1,5 ÷ 3
Linee in alternata				
		[km]	[MVA]	[kV]
Trazione ferroviaria in alternata	Aerea	20 ÷ 50	20 ÷ 60	11 ÷ 25

Tabella 8.5.1

Capitolo 9

COMPONENTI DEI SISTEMI ELETTRICI

9.1 GENERALITÀ

I sistemi elettrici di potenza e le apparecchiature elettriche comprendono una grande varietà di componenti, i più importanti dei quali (generatori, trasformatori, motori e linee) sono già stati esaminati nei capitoli precedenti; vi sono tuttavia altri componenti necessari al funzionamento in condizioni normali e altri ancora necessari alla protezione in caso di guasto. Alla descrizione di questi componenti conviene premettere alcune sintetiche considerazioni di carattere generale.

9.1.1 Sovratensioni

In un sistema elettrico possono manifestarsi tensioni superiori a quelle nominali, chiamate *sovratensioni*, che possono essere così distinte:

- *sovratensioni di origine interna*; sono dovute a manovre di chiusura o apertura di circuiti (*sovratensioni di manovra*), oppure a rapide variazioni di carico o a fenomeni di risonanza; possono anche essere causate da guasti, quali contatti accidentali e cedimenti di isolamenti; queste sovratensioni possono superare di alcune volte le tensioni nominali ed hanno di norma tempi caratteristici di evoluzione dell'ordine dei millisecondi;
- *sovratensioni di origine esterna*; sono dovute a scariche atmosferiche (o fulminazioni) che avvengono direttamente sulle linee, o a fenomeni di induzione dovuti a scariche nelle vicinanze delle linee stesse (*sovratensioni di origine atmosferica*); esse presentano intensità molto maggiori delle tensioni nominali e fronti assai ripidi, tipicamente con tempi di salita dell'ordine del microsecondo o meno e tempi di discesa di qualche decina di microsecondi.

Le sovratensioni possono produrre il cedimento degli isolamenti di uno o più componenti; se gli isolamenti sono solidi i componenti risultano danneggiati in modo irreversibile (§ 9.1.4 – Vol. 1); la conseguente scarica elettrica può produrre un cortocircuito ove si dissipà una grande energia, provocando anche vere e proprie esplosioni. Per prevenire tali eventi, gli isolamenti dei componenti elettrici sono dimensionati per tensioni molto maggiori di quelle nominali; si fa inoltre largo uso di scaricatori (§9.8) garantendo così un elevato margine di sicurezza.

9.1.2 Sovracorrenti

In un sistema elettrico possono manifestarsi correnti superiori a quelle nominali, chiamate *sovracorrenti*, che possono essere così distinte:

- *sovracorrenti dovute a sovraccarico transitorio*; possono verificarsi a seguito di manovre, quali l'avviamento di motori asincroni (che comporta correnti di spunto fino a otto volte superiori a quelle nominali, con durate di pochi secondi) o l'inserzione di trasformatori a vuoto (che può comportare correnti 30 ÷ 50 volte superiori a quelle nominali con durate di pochi periodi); in tali casi l'apertura del circuito è inopportuna ed anzi dannosa, perché causerebbe un inutile interruzione del funzionamento.
- *sovracorrenti dovute a sovraccarico permanente*; si verificano ad esempio quando vengono inseriti utilizzatori con potenza complessiva maggiore di quella per la quale è dimensionato l'impianto; esse comportano un lento surriscaldamento dei conduttori; per prevenire sovratemperature pericolose è necessario aprire i circuiti solo nel caso in cui la sovracorrente permanga a lungo.
- *sovracorrenti di cortocircuito* (o *di guasto*); si manifestano quando si verifica un cortocircuito ovvero un contatto elettrico accidentale tra conduttori non equipotenziali di una linea oppure all'interno di un carico. In tal caso il carico assume un'impedenza equivalente molto piccola (al limite nulla) e si instaura (in tempi brevissimi) una *corrente di cortocircuito* (o *di guasto*) che ha carattere persistente. Come indicato in Figura 9.1.2.1, il valore efficace di questa corrente è molto maggiore di quello nominale e dipende, oltre che dalla tensione del generatore, solamente dall'impedenza interna del generatore e da quella della linea (entrambe molto piccole rispetto all'impedenza normale del carico). L'impedenza interna del generatore (\dot{Z}_i) e quella della linea (\dot{Z}) risultano sempre molto inferiori a quella del carico (\dot{Z}_c), perciò la corrente nell'anello di guasto $\bar{I}_g = \bar{E}_g / (\dot{Z}_i + \dot{Z})$ è molto superiore a quella nominale $\bar{I}_n = \bar{E}_g / (\dot{Z}_i + \dot{Z} + \dot{Z}_c)$.

I conduttori subiscono quindi un rapido innalzamento di temperatura ed intense sollecitazioni elettrodinamiche, che possono produrne la distruzione rispettivamente per fusione e cedimento meccanico. In questo caso è necessaria l'apertura tempestiva del circuito.

Per proteggere i circuiti elettrici contro le sovracorrenti sono quindi necessari dispositivi capaci di interrompere le correnti in modo selettivo, discriminando le entità e durate delle sovracorrenti.

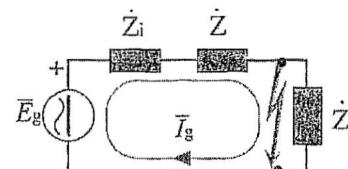


Figura 9.1.2.1 Circuito elettrico equivalente in cortocircuito.

Sovratensioni e sovracorrenti sono spesso correlate; ad esempio una sovratensione può causare il cedimento dell'isolamento producendo così un cortocircuito che diviene a sua volta causa di una sovracorrente.

9.2 APERTURA E CHIUSURA DEI CIRCUITI ELETTRICI

9.2.1 Apertura di un circuito elettrico

Si possono distinguere i seguenti casi di apertura di un circuito elettrico, in ordine crescente di severità:

- *apertura a vuoto*: con corrente nulla (o molto minore della nominale);
- *apertura a carico*: con corrente non nulla ma non superiore a quella nominale;
- *apertura con sovracorrente*: con corrente maggiore della nominale.

Quando avviene in presenza di corrente elettrica, a carico o con sovracorrente, l'apertura del circuito comporta l'*interruzione della corrente*.

Esistono diversi tipi di "dispositivi di apertura", ciascuno dei quali si caratterizza per la capacità di effettuare l'apertura in uno o più dei casi elencati. Negli impianti di potenza l'apertura viene tipicamente eseguita separando due contatti, detti *elettrodi* o *poli*, inizialmente in contatto elettrico (Fig. 9.2.1.1). L'interruzione potrebbe anche avvenire per mezzo di dispositivi a semiconduttore (Cap. 2); tuttavia, negli impieghi impiantistici questi non sono utilizzati perché, quando sono aperti, non consentono l'isolamento "galvanico" tra gli elettrodi e quindi non possono garantire la sicurezza delle persone.

Nei dispositivi di apertura reversibili (*interruttori di potenza* descritti in § 9.3, *sezionatori* descritti in § 9.4) questi elettrodi, fortemente premuti l'uno contro l'altro a circuito chiuso, vengono separati e allontanati. Per l'apertura con sovracorrente trovano impiego, oltre agli interruttori di potenza, anche dispositivi non reversibili (*fusibili*, descritti in § 9.6), nei quali la separazione degli elettrodi si realizza con la distruzione di un elemento conduttore che li connette a circuito chiuso.

Tra i due elettrodi separati si frappone un mezzo dielettrico, in genere fluido, come aria, gas isolante (SF_6) o liquido isolante (olio minerale), idoneo a sopportare la tensione applicata tra essi a circuito aperto. Nei dispositivi destinati ad aprire nelle condizioni più severe (interruttori di potenza e fusibili) gli elettrodi e il mezzo dielettrico sono contenuti all'interno di un'apposita *camera di interruzione*.

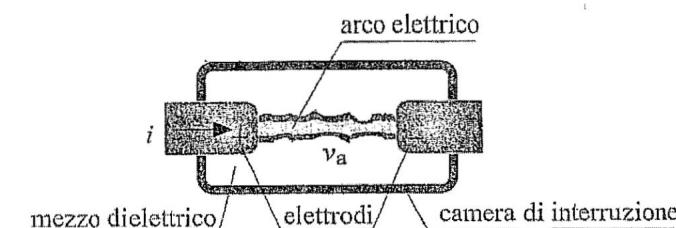


Figura 9.2.1.1 Arco elettrico tra gli elettrodi di un interruttore.

9.2.1.1 Arco elettrico

Quando l'apertura avviene in presenza di corrente, questa non si interrompe istantaneamente al cessare del contatto elettrico tra gli elettrodi, ma permane per un certo tempo attraverso un *arco elettrico*. Se, in particolare, l'apertura è effettuata allontanando gli elettrodi l'uno dall'altro, prima ancora del loro distacco la superficie di contatto tra essi diminuisce riducendosi a pochi punti ove la corrente si addensa causando intensi riscaldamenti localizzati; qui al distacco si producono elettroni liberi per emissione termoionica, che vengono accelerati dall'intenso campo elettrico dovuto alla tensione presente tra gli elettrodi ancora molto vicini; questi elettroni urtano le molecole del fluido dielettrico, ionizzandolo ed innescando così tra gli elettrodi un arco elettrico che consente il perdurare della corrente.

L'arco elettrico si comporta come un resistore non lineare (§ 4.5.2 – Vol. 1) con tensione d'arco v_a che è una funzione decrescente della corrente i ; in esso viene dissipata la potenza $p_a = v_a i$ che, se l'arco permane troppo a lungo, provoca la rapida erosione degli elettrodi e, in casi estremi, l'esplosione del dispositivo di apertura. Inoltre la tensione d'arco v_a cresce all'aumentare della distanza tra gli elettrodi (allungamento dell'arco) e al diminuire della temperatura, man mano che il fluido deionizza (raffreddamento dell'arco). Queste dipendenze sono importanti perché l'arco può estinguersi, oltre che spontaneamente allorché l'evoluzione circuitale fa annullare la corrente, anche quando il circuito esterno applica tra gli elettrodi una tensione inferiore a v_a .

A corrente azzerata, l'arco reinnesca se la tensione applicata dal circuito esterno risulta maggiore di quella che comporta la reionizzazione del fluido, detta *tensione di ripresa* v_r . Anche questa cresce all'aumentare della distanza tra gli elettrodi e al diminuire della temperatura del fluido.

In conclusione, per interrompere la corrente occorre aumentare sia v_a che v_r , allontanando rapidamente gli elettrodi e raffreddando il fluido dielettrico.

9.2.1.2 Interruzione della corrente alternata

In regime sinusoidale, l'arco elettrico si spegne spontaneamente al passaggio per lo zero della corrente, che avviene due volte in ogni periodo. In caso di reinnesco dopo il primo azzeramento, l'arco si spegne nuovamente al successivo zero di corrente e un ulteriore reinnesco risulta meno probabile, dato che nel frattempo la v_r è aumentata, per effetto del progressivo raffreddamento del fluido; quindi di norma dopo alcuni periodi l'estinzione è definitiva.

Se il circuito esterno ha un'impedenza equivalente resistiva, la tensione applicata tra gli elettrodi ad ogni zero di corrente è inizialmente nulla e raggiunge il massimo in un quarto di periodo (5 ms, alla frequenza industriale $f = 50$ Hz); un'evoluzione analoga della tensione applicata si presenta se l'impedenza equivalente del circuito è capacitiva. Pertanto nei circuiti ohmico-capacitivi la tensione applicata dal circuito esterno rimane di solito inferiore a v_r e l'interruzione della corrente ha buone possibilità di avvenire già al primo zero. Diversa è la situazione se il circuito esterno ha un'impedenza equivalente ohmico-induttiva, perché in tal caso la tensione applicata inizialmente non è nulla (è massima se l'impedenza equivalente è puramente induttiva), sicché è assai probabile che essa sia maggiore

di v_r . Quindi, in caso di carico induttivo, prima di ottenere l'estinzione completa possono essere necessari più passaggi per lo zero della corrente.

9.2.1.3 Interruzione della corrente continua

La corrente continua, contrariamente a quella sinusoidale, non si annulla spontaneamente e quindi per interromperla si deve fare affidamento sull'incremento della tensione d'arco, ottenuto mediante il suo allungamento e raffreddamento. Anche in questo caso l'interruzione completa avviene con modalità che dipendono dal circuito esterno; in particolare essa risulta più problematica se il circuito presenta anche un'elevata induttanza.

9.2.2 Chiusura di un circuito elettrico

La chiusura di un circuito elettrico può avvenire in assenza o in presenza di tensione. Di solito è effettuata da un dispositivo reversibile (capace di eseguire anche l'apertura) che porta in contatto gli elettrodi inizialmente separati. La tensione tra gli elettrodi in avvicinamento, se sufficientemente elevata, può causare l'innesto di un arco, nel quale si instaura una corrente elettrica; l'arco si estingue quando gli elettrodi metallici entrano in contatto, cosicché, per evitare conseguenze distruttive, è sufficiente che esso sia di breve durata: quindi la chiusura deve essere rapida.

9.3 INTERRUTTORI ELETTRICI DI POTENZA

9.3.1 Generalità sugli interruttori di potenza

L'interruttore elettrico (di potenza) è un componente reversibile di manovra e protezione, capace di aprire e chiudere un circuito, allontanando ed avvicinando gli elettrodi^I; l'apertura può essere effettuata anche in condizioni di cortocircuito, con $I_{cc} \gg I_n$. Esistono interruttori unipolari, che aprono e chiudono una sola coppia di elettrodi, ma anche interruttori multipolari (bipolari, tripolari, ...) dotati di più copie di elettrodi (due, tre, ...), azionate da un unico attuatore meccanico. La manovra può essere manuale, comandata da un operatore, o automatica, cioè asservita ad un dispositivo detto *relè* che interviene allorché rileva specifiche condizioni anomale (ad esempio sovraccorrenti, § 9.5). Negli schemi impiantistici^{II} gli interruttori con comando manuale e/o automatico vengono rappresentati con i simboli di Figura 9.3.1.1.



interruttore di potenza



interruttore di potenza ad apertura automatica

Figura 9.3.1.1 Simboli utilizzati per gli interruttori di potenza.

^I Norme CEI 17-1 e CEI 17-5.

^{II} Norme CEI 3-19.

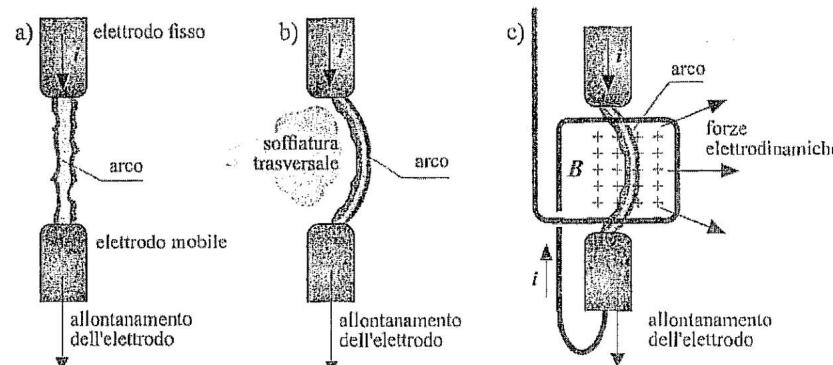
9.3.1.1 Parametri degli interruttori

I limiti di funzionamento di un interruttore, dichiarati dal costruttore e certificati da prove eseguite in laboratori qualificati, sono specificati principalmente dai seguenti parametri:

- *tensione nominale di esercizio V_n* : costituisce il livello di tensione che, in condizioni di normale funzionamento, può essere applicata tra i diversi poli e tra i due elettrodi di uno stesso polo, quando sono aperti; nel caso di sistemi trifasi V_n rappresenta la tensione concatenata;
- *corrente nominale I_n* : costituisce la massima corrente di regime permanente che l'interruttore può portare quando è chiuso;
- *potere nominale di interruzione I_{in}* : costituisce la massima corrente che l'interruttore è in grado di interrompere; essendo sempre $I_{in} > I_n$ è necessario che l'interruzione della corrente sia tempestiva.

9.3.1.2 Tecniche di interruzione

Come visto in § 9.2.1.1, l'interruzione della corrente elettrica richiede di allungare l'arco elettrico e di raffreddare il fluido dielettrico. Negli interruttori l'*allungamento dell'arco* è ottenuto principalmente allontanando meccanicamente l'elettrodo mobile da quello fisso (Fig. 9.3.1.2a); per garantire un'estinzione rapida vengono utilizzati meccanismi a scatto, in genere azionati da molle precaricate, anche quando il comando è manuale. Il *raffreddamento del fluido* si ottiene rimescolandolo e favorendo lo scambio termico con le pareti della camera di interruzione; a tal fine giocano un ruolo importante sia il tipo di fluido che la geometria della camera; spesso si ricorre anche alla *soffiatura*, che può essere assiale oppure trasversale; nel secondo caso essa realizza anche un ulteriore allungamento dell'arco (Fig. 9.3.1.2b). La soffiatura può essere pneumatica (costituita da un robusto getto di fluido) oppure magnetica (derivante dalla forza elettrodinamica applicata all'arco per effetto dell'induzione magnetica che la corrente dell'interruttore produce fluendo in una spira opportunamente disposta, Fig. 9.3.1.2c).

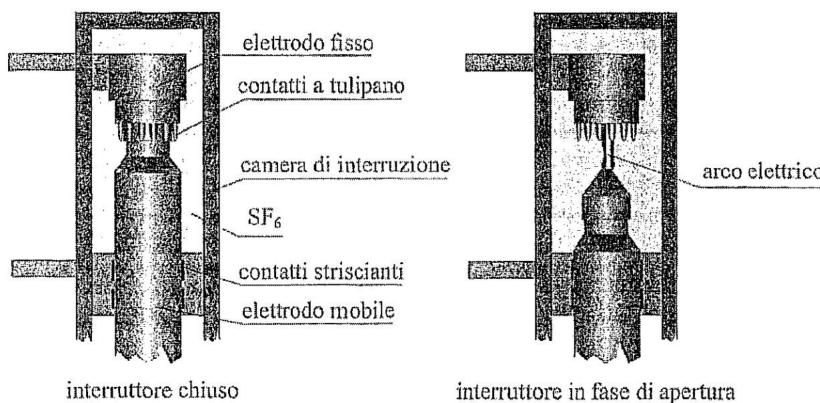


9.3.2 Tipologie di interruttori di potenza

I diversi tipi di interruttori elettrici di potenza differiscono tra loro per vari aspetti tecnologici, quali la forma della camera di estinzione, il tipo di fluido dielettrico, la conformazione degli elettrodi, la modalità di azionamento. Molte soluzioni tecniche sono state sviluppate nel tempo; nel seguito sono descritte quelle più comunemente usate.

9.3.2.1 Interruttori in esafluoruro di zolfo (SF_6)

Questo gas, che costituisce il fluido dielettrico contenuto nella camera di interruzione, presenta bassa tensione d'arco cosicché, per una data corrente, la potenza dissipata è piccola e comporta una modesta erosione degli elettrodi (Fig. 9.3.2.1). L'esafluoruro di zolfo, essendo costituito da molecole cinque volte più pesanti dell'aria, possiede anche ottima attitudine refrigerante; inoltre a elevate temperature le sue molecole si decompongono in atomi di zolfo e fluoro, il quale possiede una marcata attitudine a catturare gli elettroni liberi, che sono i principali responsabili della conduzione nell'arco. Tali fattori favoriscono un rapido ripristino della rigidità dielettrica all'azzerarsi della corrente. Questo tipo di interruttore ha ampia diffusione nei sistemi ad alta e media tensione.



9.3.2.2 Interruttori in vuoto

Nella camera di interruzione (detta ampolla) viene creato un vuoto dell'ordine di $10^{-3} \div 10^{-4}$ Pa (Fig. 9.3.2.2) e quindi il processo di interruzione è molto diverso da quello che avviene in ogni altro fluido dielettrico, dato che in questo caso i portatori di carica dell'arco, elettroni e ioni, sono forniti dagli elettrodi. L'assenza di un fluido dielettrico impedisce l'efficace raffreddamento dell'arco, tuttavia la sua tensione è piccola e la deionizzazione molto rapida. Allo stato attuale il potere di interruzione rimane inferiore a quello ottenibile con interruttori di diversa tec-

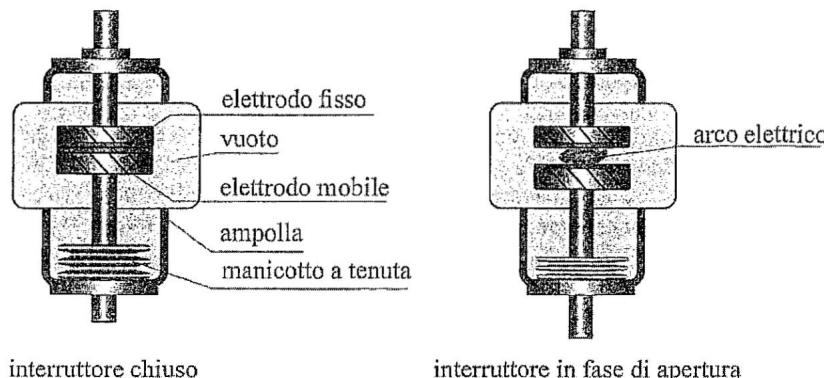


Figura 9.3.2.2

nologia; per contro gli interruttori in vuoto richiedono una manutenzione assai limitata. Anche questo tipo di interruttore ha diffusione via via crescente.

Inoltre, grazie alla sagomatura degli elettrodi mostrata in Figura 9.3.2.2, la corrente passante nell'interruttore produce all'apertura un campo di induzione magnetica con linee di campo parallele all'asse dell'interruttore. Questo campo aiuta a mantenere l'arco diffuso nella zona tra gli elettrodi, limitandone gli effetti erosivi, e aumenta il potere di interruzione dell'interruttore.

■ 9.4 SEZIONATORI

9.4.1 Sezionatori

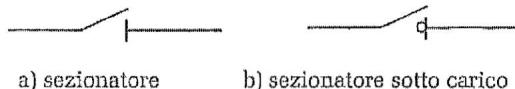


Figura 9.4.1.1 Simboli di sezionatore.

Il *sezionatore* è un dispositivo reversibile di manovra, nel quale lo stato (aperto o chiuso) è ben visibile, anche a distanza, da parte degli operatori^{III}. Inoltre è realizzato in modo da garantire un completo isolamento tra gli elettrodi. Esso è idoneo ad eseguire l'apertura in assenza di corrente (a vuoto) e la chiusura in assenza di tensione tra gli elettrodi. Esistono anche *sezionatori sotto carico* che sono in grado di aprire o chiudere i contatti anche in presenza di una corrente, purché non superiore alla corrente nominale. Le manovre usualmente sono relativamente lente, possono essere sia manuali che motorizzate e sono in genere asservite ad un *dispo-*

ⁱⁱⁱ Norme CEI 17-4 à CEI 17-11.

sitivo di interblocco, elettrico o meccanico, per evitare che avvengano in presenza di corrente o tensione maggiore di quella prevista. Un sezionatore è caratterizzato dalla *tensione nominale di esercizio* V_n e dalla corrente nominale I_n , definite come per gli interruttori, ed anche dalla *corrente di cortocircuito di breve durata* I_{cc} , che costituisce la massima corrente che il sezionatore in posizione di chiusura può sopportare per il tempo di un secondo. Negli schemi impiantistici i sezionatori ed i sezionatori sotto carico vengono rappresentati con i simboli di Figura 9.4.1.1.

9.4.1.1 Tipologie di sezionatori

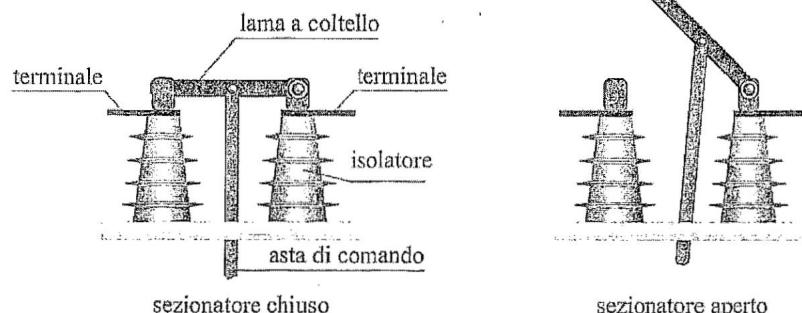


Figura 9.4.1.2

In genere un sezionatore utilizza lame a coltello mobili (Fig. 9.4.1.2) che, in posizione di chiusura, sono strettamente serrate mediante molle entro sedi a gola, per realizzare un buon contatto elettrico. La loro posizione fornisce un'indicazione visiva dello stato del dispositivo come mostrato in Figura 9.4.1.3.

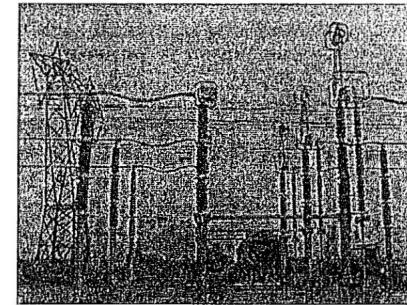


Figura 9.4.1.3

9.4.1.2 Sezionatori di linea

Il *sezionatore di linea* è utilizzato per stabilire la continuità elettrica di una linea oppure per interromperla ed isolare in modo sicuro ed evidente^{IV}. Esso è spesso posto in serie ad un interruttore che ha la funzione di aprire il circuito a carico o in caso di guasto: il dispositivo di interblocco consente la chiusura o l'apertura del sezionatore solamente ad interruttore aperto.

^{IV} D.lgs. n. 81/2006; Norme CEI 11-1 art. 3,8.01.

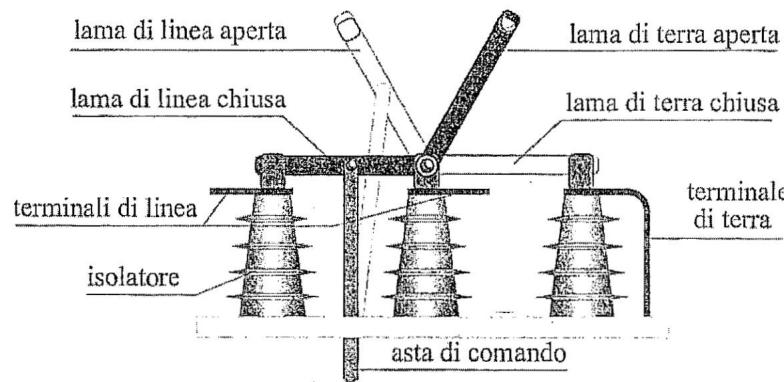


Figura 9.4.1.4

9.4.1.3 Sezionatori di terra

Il sezionatore di terra è utilizzato per interrompere o stabilire, sempre in modo evidente, la continuità elettrica tra una parte di un impianto elettrico e un impianto di terra (§ 9.9). Il dispositivo di interblocco, che deve impedire la chiusura del sezionatore quando l'impianto elettrico è in tensione, è asservito allo stato di uno o più interruttori o sezionatori di linea. Talora tale interblocco viene realizzato integrando le due funzioni di sezionatore di terra e di sezionatore di linea in un unico dispositivo, in maniera che la chiusura di un contatto comporti l'apertura dell'altro e viceversa come illustra la Figura 9.4.1.4.

9.5 RELÈ E DISPOSITIVI AUTOMATICI

9.5.1 Relè

Il relè è un dispositivo che permette di azionare in modo automatico componenti come gli interruttori; esso è sensibile ad una specifica grandezza fisica, detta *grandezza di comando*, tipicamente una corrente o una tensione; quando questa supera un prestabilito *valore di soglia*, il relè modifica il suo stato, determinando un'azione meccanica. In relazione alla *grandezza di comando* (corrente, tensione, potenza, frequenza, ecc.) un relè viene classificato come *amperometrico*, *volumetrico*, *wattmetrico*, *frequenzimetrico*, ecc. I relè vengono utilizzati anche per altri fini, ad esempio per eseguire segnalazioni automatiche di condizioni di funzionamento.

Il funzionamento di ciascun tipo di relè è descritto dalla sua *caratteristica di intervento*, che esprime il *tempo di intervento* necessario al cambiamento di stato in funzione della grandezza di comando. Relè basati su differenti principi di funzionamento presentano diverse caratteristiche di intervento: si distinguono ad esempio relè *elettromagnetici*, *elettrodinamici*, *termici*, ecc. Le diverse caratteristiche di intervento rendono i vari relè idonei ad assolvere funzioni specifiche.

9.5.1.1 Relè elettromagnetico

Un relè *elettromagnetico* è costituito da una bobina disposta intorno ad un nucleo che fa parte di un circuito magnetico comprendente anche un'ancorina mobile trattenuta da una molla in modo da formare un traferro (Fig. 9.5.1.1a). Quando la bobina viene eccitata dalla corrente I , sull'ancorina mobile si esercita una forza elettromagnetica, proporzionale ad I^2 , che tende a muoverla riducendo il traferro; appena I supera la soglia I_s , tale forza eccede quella della molla e la parte mobile si sposta bruscamente, in un tempo di intervento t_m dell'ordine dei millisecondi, provocando un'azione meccanica, come la chiusura o l'apertura di contatti elettrici o il comando di altri dispositivi.

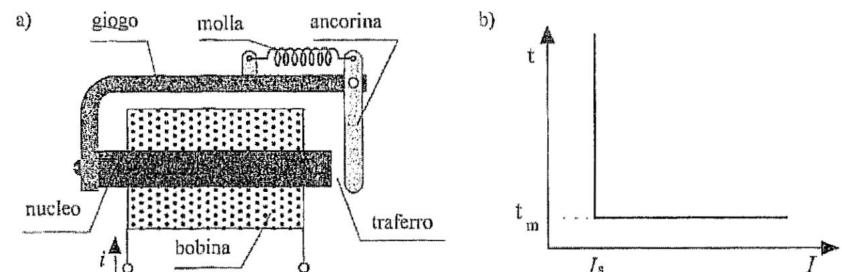


Figura 9.5.1.1

Come illustra la *caratteristica di intervento* (Fig. 9.5.1.1b), per $I < I_s$, il relè non interviene mai, mentre per $I > I_s$ il tempo di intervento t_m è sostanzialmente costante, dipendendo solamente dall'inerzia meccanica delle parti in movimento. Dato che la forza dipende dal quadrato della corrente, questo tipo di relè può operare indifferentemente in corrente continua o alternata.

9.5.1.2 Relè differenziale

Un relè *differenziale* (Fig. 9.5.1.2a) viene usato soltanto per proteggere sistemi in AC ed è costituito da un nucleo ferromagnetico attorno al quale sono disposti due avvolgimenti principali A_1 e A_2 , con uguale numero N di spire, ed un avvolgimento ausiliario A_a i cui terminali sono connessi ad una bobina. Gli avvolgimenti principali sono connessi in modo che correnti i_1 e i_2 di uguale segno producano f.e.m. opposte che danno luogo al flusso di induzione $\varphi_l = N(i_1 - i_2)/R$ nel nucleo ferromagnetico di riluttanza R . Se le correnti degli avvolgimenti principali sono uguali, $i_1 = i_2$, si ha $\varphi_l = 0$: nell'avvolgimento A_a non viene indotta alcuna f.e.m. cosicché $i_a = 0$. Se invece è $i_1 \neq i_2$, ossia in presenza della *corrente differenziale* $i_\Delta = i_1 - i_2 \neq 0$ variabile nel tempo, compare un flusso $\varphi_l \neq 0$ variabile che produce una f.e.m. indotta nell'avvolgimento A_a e quindi una corrente $i_a \neq 0$ nella bobina. La grandezza di comando è dunque costituita dalla corrente differenziale i_Δ della quale in regime sinusoidale si considera il valore efficace I_Δ : appena esso supera il valore di soglia $I_{\Delta s}$, la bobina produce un'azione meccanica analoga a quella del relè elettromagnetico; la caratteristica di intervento è quindi simile a quella di quest'ultimo (Fig. 9.5.1.2b): se $I_\Delta < I_{\Delta s}$ il relè non interviene mai, se $I_\Delta > I_{\Delta s}$ il tempo di intervento t_m è sostanzialmente costante.

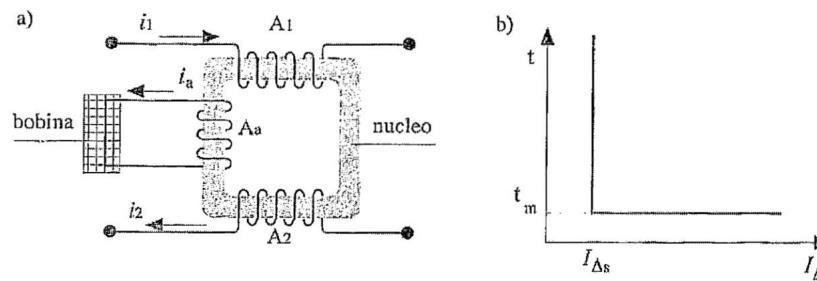


Figura 9.5.1.2

Si usano anche relè differenziali per sistemi trifasi a tre o a quattro fili; in tal caso intorno al nucleo sono avvolti tanti avvolgimenti principali A_i tra loro uguali quanti sono i fili del sistema; la corrente differenziale è data dalla somma delle correnti dei fili e risulta nulla in condizioni di normale funzionamento e non nulla quando tale condizione viene a mancare.

In ogni caso la corrente di soglia può essere molto piccola (anche di pochi mililiampere), rendendo questo tipo di relè estremamente sensibile.

9.5.1.3 Relè termico

Un relè termico sfrutta la dilatazione termica di un suo elemento percorso da corrente, il quale viene riscaldato dalla potenza dissipata per effetto Joule $P_d = RI^2$. Per semplicità si possono considerare costanti la resistenza R dell'elemento e la corrente I (e quindi anche la potenza dissipata P_d); allora, a partire da condizioni di riposo, nelle quali l'elemento è in equilibrio termico con l'ambiente, la sua temperatura θ cresce nel tempo con la legge esponenziale:

$$\theta(t) = \theta_a + \Delta\theta_M (1 - e^{-t/T_1}) \quad (9.5.1.1)$$

ove θ_a è la temperatura dell'ambiente, $\Delta\theta_M$ è il valore asintotico cui tende la sovratermperatura rispetto all'ambiente e T_1 è la costante di tempo termica; quanto maggiore è I , tanto più rapida è la crescita di θ (Fig. 9.5.1.3a). Se durante il processo viene raggiunta la temperatura di soglia θ_s , la dilatazione dell'elemento provoca un'azione meccanica; detta I_s la corrente minima per la quale ciò avviene, θ_s viene raggiunta in un tempo tanto minore quanto più è $I > I_s$: pertanto il relè termico presenta la caratteristica di intervento esemplificata in Fig. 9.5.1.3b, che è detta *caratteristica di intervento a tempo inverso*. Dato che il riscaldamento dipende dal quadrato della corrente, anche questo tipo di relè funziona sia in corrente continua che in alternata. Un tipico relè termico consiste di due lame metalliche con diversi coefficienti di dilatazione, affiancate e solidali tra loro (*lamina bimetallica*, Fig. 9.5.1.4), che si flettono in funzione della temperatura.

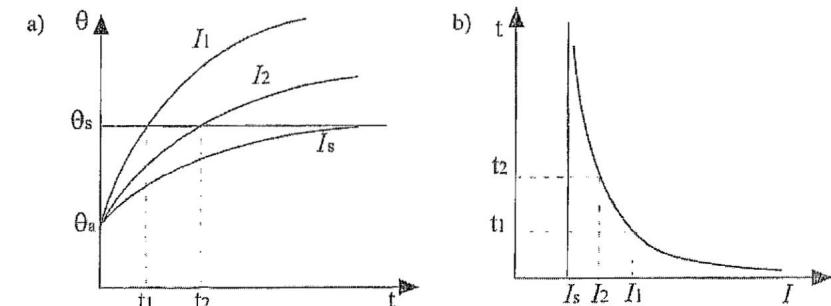


Figura 9.5.1.3



Figura 9.5.1.4

9.5.2 Interruttori automatici

Asservendo un interruttore ad un relè si ottiene un *interruttore automatico*, che interviene allorché l'azione del relè libera un nottolino di sgancio. La caratteristica di intervento complessiva è simile a quella del relè, ma presenta tempi di intervento maggiori, a causa del ritardo tra l'istante in cui la grandezza di comando supera la soglia e quello in cui l'interruttore apre. Negli interruttori multipolari i relè producono l'apertura simultanea di tutti i poli.

9.5.2.1 Interruttore con relè elettromagnetico

La bobina del relè elettromagnetico può essere collegata secondo lo schema di Fig. 9.5.2.1a: il derivatore con resistenza R_a molto minore dell'impedenza della bobina fa sì che la corrente I_e della bobina sia una piccola frazione della corrente I .

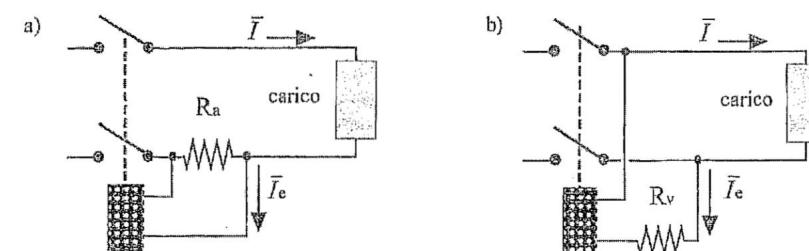


Figura 9.5.2.1

del circuito. Si ottiene così un *interruttore di massima corrente con relè elettromagnetico*, avente caratteristica di intervento complessiva analoga a quella di Figura 9.5.1.1b.

La bobina del relè, con in serie una resistenza di elevato valore R_y , può anche essere collegata tra due conduttori in tensione, secondo lo schema di Figura 9.5.2.1b: in tal modo la corrente di eccitazione risulta proporzionale alla tensione tra i conduttori. Si ottiene così un *interruttore di massima (minima) tensione con relè elettromagnetico* che apre quando la tensione tra i conduttori è maggiore (minore) di una soglia prestabilita. La caratteristica di intervento complessiva è pure analoga a quella di Figura 9.5.1.1b.

9.5.2.2 Interruttore differenziale (salvavita)

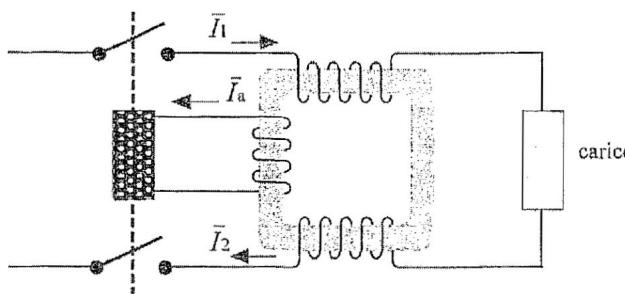


Figura 9.5.2.2

Gli avvolgimenti principali del relè differenziale vengono collegati in serie ai conduttori della linea (Fig. 9.5.2.2). Si ottiene così un *interruttore differenziale* (comunemente detto *salvavita*), avente caratteristica di intervento complessiva analoga a quella di Figura 9.5.1.2b. A seconda del numero di poli dell'interruttore (e quindi di avvolgimenti principali del relè) si realizzano interruttori differenziali per sistemi monofasi o trifasi, a tre o a quattro fili. Le correnti differenziali di soglia I_{As} sono comprese tra 10 mA e 1 A. I valori minori (da 10 mA a 30 mA) vengono impiegati nella protezione delle persone (§ 10.2.3), mentre i valori più elevati trovano impiego nella protezione degli impianti.

9.5.2.3 Interruttore con relè termico

Un relè termico viene collegato in serie al circuito da proteggere, eventualmente tramite un derivatore, in modo che la sua corrente sia una frazione della corrente del circuito, secondo uno schema simile quello di Figura 9.5.2.1a. Si ottiene così un *interruttore di massima corrente con relè termico*, avente caratteristica di intervento complessiva analoga a quella di Figura 9.5.1.3b. Esso risulta particolarmente idoneo alla protezione contro i *sovraffatichi*, dato che il suo intervento è tanto più lento quanto minore è la sovraccorrente; in particolare esso non apre in caso di sovraffatichi modesti e di breve durata.

9.5.2.4 Interruttore magnetotermico

Utilizzando assieme un relè elettromagnetico di massima corrente ed un relè termico si ottiene un *interruttore magnetotermico*: le due caratteristiche di intervento danno luogo ad una caratteristica di intervento complessiva del tipo esemplificato in Figura 9.5.2.3: per $I < I_s$ il dispositivo non interviene; per sovraccorrenti modeste $I_s < I < I_m$ l'intervento è dovuto al relè termico; per elevate sovraccorrenti $I > I_m$ l'intervento è dovuto al relè elettromagnetico. Pertanto il dispositivo risulta idoneo a garantire la protezione sia contro i *sovraffatichi* che contro i *cortocircuiti*, per i quali l'intervento deve essere particolarmente rapido.

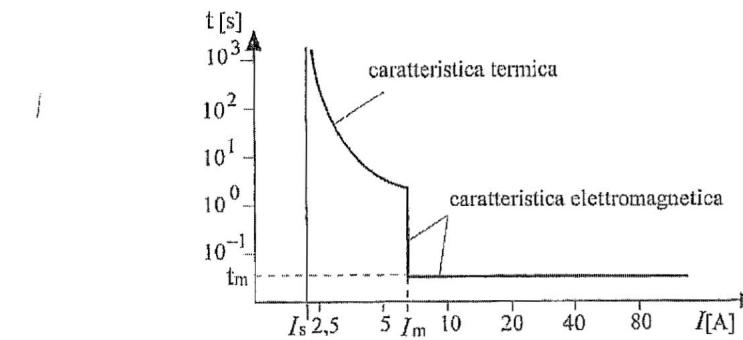


Figura 9.5.2.3

9.5.2.5 Interruttori e relè statici

Hanno vasto impiego anche gli interruttori automatici asserviti a *relè statici*, che sono dispositivi elettronici capaci di presentare caratteristiche di intervento analoghe a quelle dei relè illustrati in precedenza. Essi elaborano per via elettronica i segnali rilevati da opportuni sensori; ad esempio integrando una misura di corrente e confrontandolo il risultato con una soglia si ottiene una caratteristica a tempo inverso, mentre confrontandone due tra loro in un comparatore elettronico si ottiene una caratteristica differenziale. I relè statici sono in genere economici ed affidabili. In taluni casi anche l'interruttore meccanico viene sostituito con un interruttore a semiconduttore (§ 2.1), la cui apertura e chiusura può venire comandata mediante i segnali elaborati per via elettronica da un relè statico.

9.5.2.6 Corrente di soglia e corrente nominale

Poiché la caratteristica di intervento di ciascun tipo di interruttore ammette sempre un certo grado di incertezza, la sua corrente di soglia I_s è sempre un po' maggiore della *corrente nominale* I_n , per garantire che l'interruttore non intervenga mai per correnti $I \leq I_n$. Nel caso degli interruttori differenziali queste considerazioni si applicano alle correnti differenziali I_d , tipicamente molto minori di quelle nominali di linea.

9.6 FUSIBILI

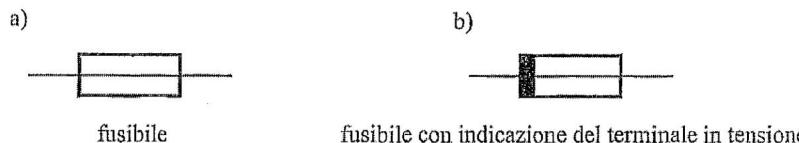


Figura 9.6.1 Simbolo di fusibile.

I *fusibili* sono dispositivi capaci di eseguire l'apertura in modo irreversibile: possono essere utilizzati una volta soltanto e quindi devono essere sostituiti dopo ogni loro intervento^V. Per contro sono semplici, affidabili ed economici: per questo vengono frequentemente usati per la protezione contro le sovraccorrenti. Negli schemi impiantistici sono indicati con il simbolo di Figura 9.6.1a, o anche quello di Figura 9.6.1b nel quale il tratto ammetto specifica il terminale che dopo l'intervento rimane in tensione.

Un *fusibile* è costituito fondamentalmente da un conduttore, realizzato in lega a bassa temperatura di fusione, alloggiato entro un contenitore (camera di interruzione) e con le estremità collegate a due elettrodi.

La funzione è analoga a quella di un interruttore automatico con relè termico: quando è percorso da corrente il conduttore si riscalda e, se la corrente supera la soglia I_s , raggiunge la temperatura di fusione θ_s , distruggendosi: si apre così il collegamento fra gli elettrodi; ciò avviene tanto più rapidamente quanto più è $I > I_s$ (per $I < I_s$ si ha sempre $\theta < \theta_s$) e pertanto il fusibile presenta *caratteristica di intervento a tempo inverso* analoga a quella di Figura 9.5.1.3b. Dato che essa ammette sempre un certo grado di incertezza, come nel caso degli interruttori automatici la *corrente di soglia* I_s è sempre un po' maggiore della *corrente nominale* I_n , definita come per gli interruttori. Oltre che dalla caratteristica di intervento e dalla corrente nominale, un fusibile è caratterizzato dalla *tensione nominale di esercizio* V_n , definita come per gli interruttori.

9.6.1 Tipi di fusibili

Esistono tipi di fusibili per tensioni nominali corrispondenti sia alla *bassa tensione* che alla *media tensione* e con correnti nominali che vanno da qualche frazione di milliamper fino a varie centinaia di ampere. Alcuni fusibili sono caratterizzati da tempi di intervento molto brevi, sono contrassegnati rispettivamente con le sigle F e FF e trovano impiego nella protezione di apparecchiature delicate.

I modelli più piccoli, usati per proteggere apparecchiature di modesta potenza, generalmente dispongono di contenitori in vetro o plastica, che consentono il controllo visivo della loro integrità (Fig. 9.6.2a). Quelli per correnti maggiori, idonei alla protezione di apparecchi di potenza elevata e di interi impianti, hanno conte-

^V Norme CEI 32-1 e CEI 32-3.

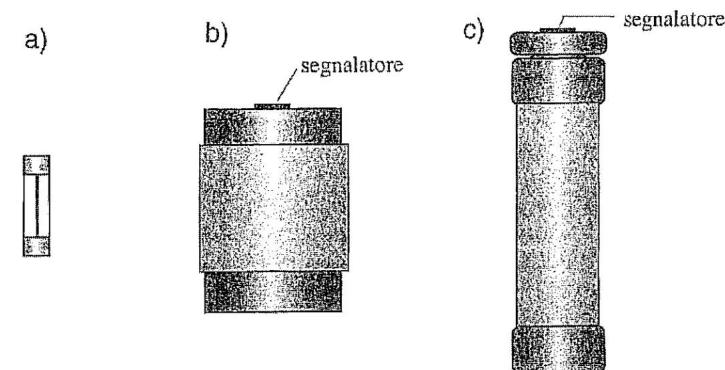


Figura 9.6.2

nitori in ceramica riempiti di polvere di quarzo, per facilitare l'estinzione dell'arco; sono di norma dotati di segnalazione di intervento (Fig. 9.6.2b per bassa tensione e 9.6.2c per media tensione).

9.6.2 Coordinamento di interruttore magnetotermico e fusibile

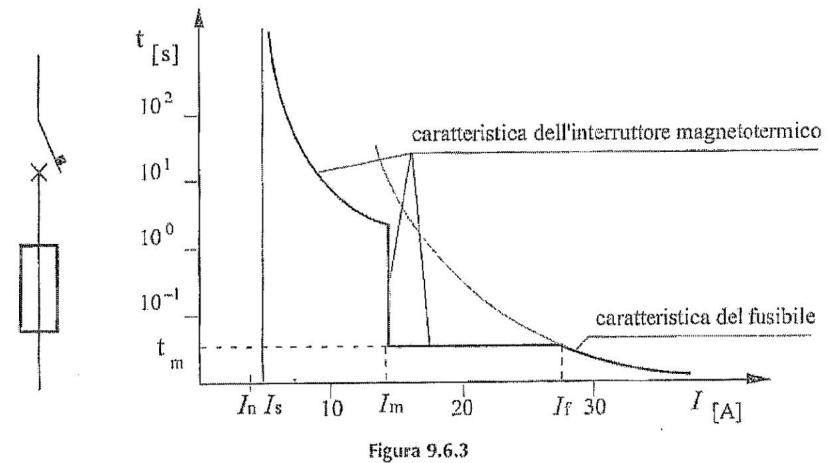


Figura 9.6.3

In alcuni casi si pongono in serie un interruttore magnetotermico ed un fusibile con caratteristiche di intervento che si combinino come in Figura 9.6.3: per correnti di guasto relativamente modeste interviene l'interruttore, mentre il fusibile interviene solo nei rari casi di correnti di cortocircuito molto intense, ovvero in

caso di mancato funzionamento dell'interruttore. Così è possibile impiegare un interruttore con potere di interruzione I_{in} (§ 9.3.1.1) minore della massima corrente di guasto.

9.7 ISOLATORI

Gli *isolatori* sono componenti destinati a sostenere meccanicamente i conduttori in tensione garantendone l'isolamento elettrico^{VI}. Essi devono resistere alle sollecitazioni di natura meccanica ed elettrodinamica trasmesse dai conduttori e al tempo stesso devono sopportare le tensioni alle quali questi possono portarsi: vengono quindi realizzati con materiali di elevate qualità meccaniche e dielettriche. Esistono isolatori per alta, media e bassa tensione, idonei per installazioni all'esterno ovvero in ambienti interni.

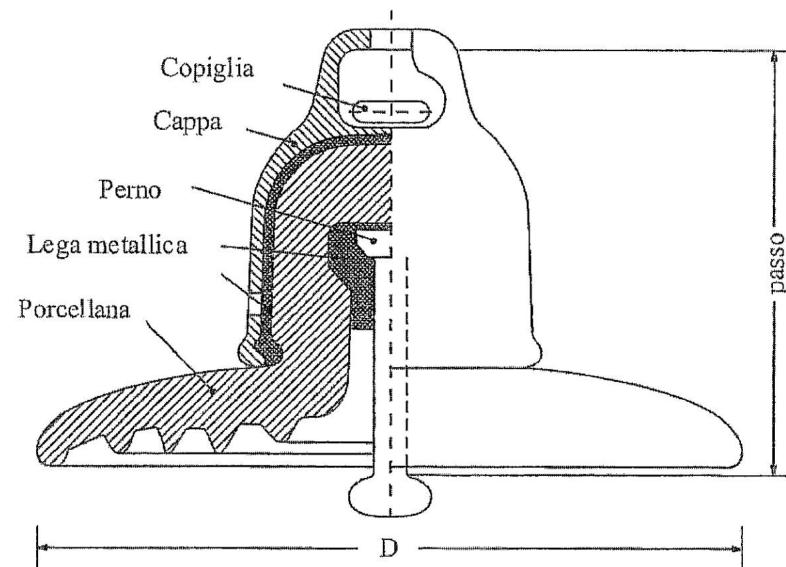


Figura 9.7.1 Elemento di isolatore a cappa e perno^{VII}.

Negli impieghi per esterno e per ogni livello di tensione si utilizzano isolatori in *porcellana* o in *vetro pyrex*; in media tensione si usano anche isolatori in *resine polimeriche composite*. Per le linee aeree in altissima, alta e media tensione sono diffusi gli *isolatori a cappa e perno* (Fig. 9.7.1): al corpo isolante, in porcellana o vetro, sono fissati nella parte superiore una cappa metallica e nella parte inferiore

^{VI} Norme CEI 36.

^{VII} Da: R.Benato, L.Fellin "Impianti elettrici", Wolters Kluwer Italia S.r.l., 2014, per concessione dell'Editore.

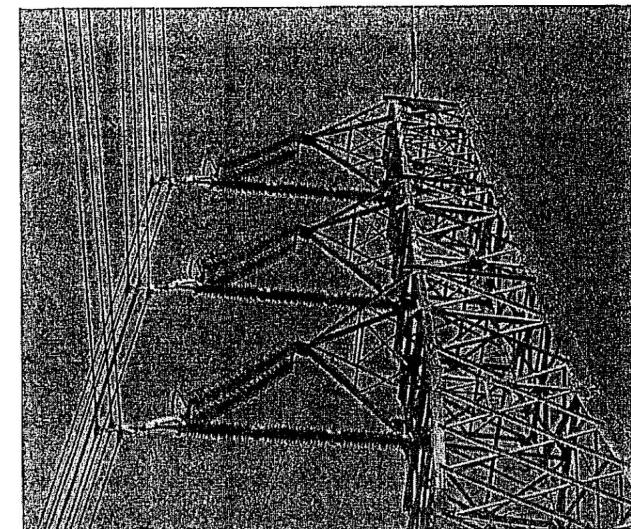


Figura 9.7.2 Catene di isolatori a cappa e perno.

un perno in ghisa, isolato dalla cappa; con tali isolatori si possono realizzare catene sospese (Fig. 9.7.2), dotate di tanti elementi quanti ne richiede la tensione della linea e idonee a sopportare condizioni atmosferiche sfavorevoli (pioggia, nebbia, salsedine, polveri ed altri elementi inquinanti) dato che, grazie al profilo del corpo isolante, lo sviluppo superficiale tra i due elementi in tensione risulta molto allungato rispetto alla distanza tra loro.

Negli impieghi per esterno, ove siano necessari ancoraggi in grado di sopportare momenti flettenti, si usano anche isolatori monoblocco, in *porcellana* o *gomma siliconica*, i quali hanno comunque profilo marcatamente alettato, tale da garantire un elevato sviluppo superficiale tra elemento in tensione e ancoraggio a terra (Fig. 9.7.3b).

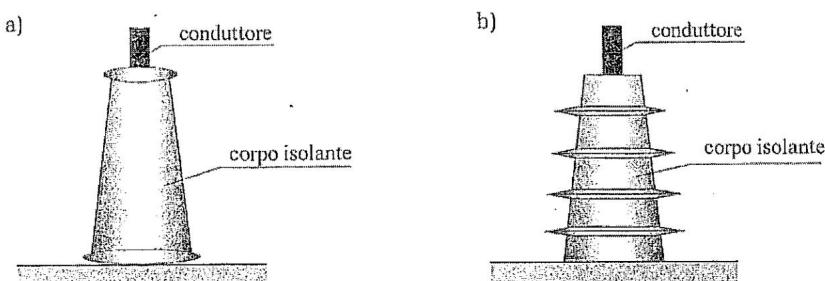


Figura 9.7.3

Negli impieghi per ambienti interni in media tensione sono largamente diffusi gli isolatori monoblocco in *porcellana*, in *resina epossidica caricata con quarzo o gomma siliconica* in grado di sopportare elevati momenti flettenti; la loro superficie è liscia (Fig. 9.7.3a) o dotata di modeste alettature, dato che le condizioni ambientali non richiedono un elevato sviluppo superficiale.

9.8 SCARICATORI

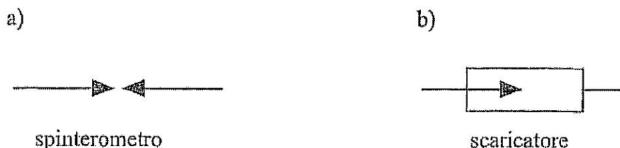


Figura 9.8.1

Gli *scaricatori* sono componenti di protezione contro le sovratensioni transitorie che vengono installati in prossimità delle apparecchiature da proteggere^{VIII}. Negli schemi impiantistici sono indicati con i simboli di Fig. 9.8.1.

La loro versione tradizionale, di tipo *spinterometrico*, è costituita da due eletrodi di sagomati, posti ad opportuna distanza mutua in aria, uno collegato alla linea da proteggere e l'altro a terra. Al manifestarsi di una sovratensione, tra essi si innesta un arco elettrico che provoca l'immediata riduzione della tensione. La configurazione più comune (Fig. 9.8.2a) favorisce la migrazione dell'arco lungo gli eletrodi, allungandolo fino all'estinzione.

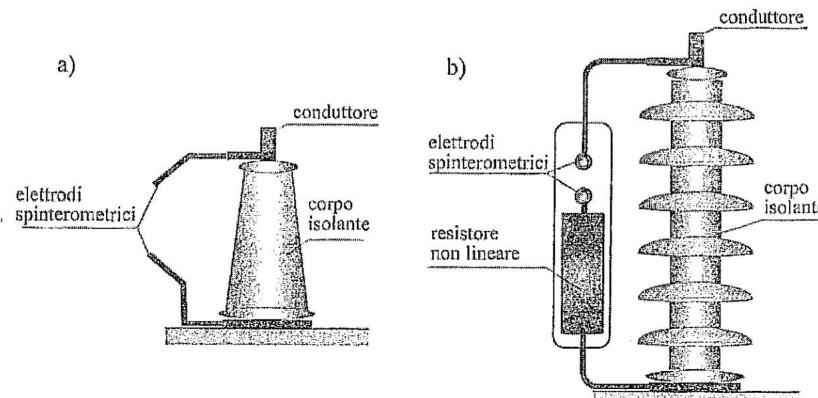


Figura 9.8.2

^{VIII} Norme CEI 37.

Nelle linee in altissima ed alta tensione sono preferiti gli *scaricatori a resistenza non lineare* (Fig. 9.8.2b), costituiti dalla serie di uno scaricatore spinterometrico e di un resistore non lineare ad ossido di zinco (ZnO_2). Quando si presenta una sovratensione tra i due eletrodi, si innesta un arco e il resistore, grazie alla sua non linearità, mantiene pressoché costante la tensione tra i terminali, indipendentemente dalla corrente che vi circola; non appena la tensione applicata si riduce al valore nominale, la corrente nel resistore diviene modesta e l'arco nello spinterometro si estingue ripristinando le condizioni normali.

9.9 IMPIANTO DI TERRA

9.9.1 Generalità

Un impianto di terra è costituito da un sistema di conduttori e da uno o più dispersori che permettono di collegare a terra in modo sicuro determinati elementi conduttori (*messa a terra*). Tale collegamento svolge le funzioni elencate nel seguente.

Ogni edificio è dotato di un impianto di terra; negli schemi circuituali il collegamento a terra è indicato con il simbolo

9.9.1.1 Messa a terra di protezione

Come si vedrà in § 10.2.4, all'impianto di terra sono collegate le *masse metalliche* delle apparecchiature che fanno parte dell'impianto elettrico; questo collegamento, imposto dalla normativa vigente^{IX}, mantiene le masse al potenziale di terra in condizioni di normale funzionamento e limita le loro tensioni rispetto a terra in caso di guasto; esso realizza la *protezione mediante messa a terra*.

9.9.1.2 Messa a terra di funzionamento

All'impianto di terra possono essere collegate parti attive di un impianto o di un sistema elettrico. Esempi importanti sono costituiti dai collegamenti a terra dei centri stella dei trasformatori trifasi di potenza (§ 1.3.2). In altri casi la connessione permette di sfruttare il terreno come conduttore sede di corrente; esempi si hanno nella trazione elettrica ferroviaria e nei collegamenti sottomarini di potenza in corrente continua con cavi unipolari, che utilizzano il mare come secondo conduttore (§ 8.5).

9.9.1.3 Messa a terra per lavori

Quando una porzione di un sistema elettrico viene posta fuori servizio per eseguirvi dei lavori, essa deve essere sezionata rispetto alla parte dell'impianto che resta in tensione e collegata a terra in maniera sicura e visibile; allo scopo essa viene collegata all'impianto di terra per mezzo di sezionatori di terra (§ 9.4.1.3) o di connessioni provvisorie.

^{IX} D.M. n. 37/2008, DPR n. 462/2001, D.Lgs. n. 81/2008.

9.9.2 Elementi dell'impianto di terra

L'impianto di terra è costituito dalle seguenti parti:

- il *dispersore*, totalmente immerso nel terreno, costituito da uno o più *elementi conduttori* collegati tra loro;
- il *collettore* (o *nodo principale*) di terra, costituito da un morsetto o da una sbarra collegata sia al dispersore che alle masse;
- il *conduttore di terra*, che collega gli elementi del dispersore tra loro ed al collettore di terra;
- i *conduttori di protezione*, detti PE, che collegano il collettore di terra alle masse delle apparecchiature elettriche;
- i *conduttori equipotenziali*, che collegano il collettore di terra alle masse estranee, cioè oggetti conduttori non facenti parte dell'impianto elettrico.

9.9.2.1 Dispersore di terra

Il dispersore di terra garantisce un buon contatto elettrico tra impianto di terra e terreno; in alcuni casi il dispersore di terra è attraversato da una corrente di terra I_t ; nel circuito di richiusura della corrente deve essere presente un secondo dispersore, connesso al generatore equivalente che alimenta l'utenza.

Quando, in caso di guasto, la corrente di terra I_t attraversa il dispersore, essa produce nel terreno un campo di corrente; se i due dispersori sono a distanza elevata rispetto alle loro dimensioni, il campo di corrente in prossimità di ciascuno non è influenzato dall'altro e tutto avviene come se la corrente si richiudesse a distanza infinita. La configurazione del campo di corrente in vicinanza del dispersore dipende dalla sua forma e dalla profondità alla quale esso è interrato.

Per esemplificare in modo semplice il comportamento si può considerare un dispersore emisferico immerso in un terreno costituito da un mezzo uniforme con resistività ρ (§ 4.4.3 - Vol. 1): le linee del campo di corrente sono semirette uscenti radialmente dal dispersore e le superfici equipotenziali sono semisfere concentriche (Fig. 9.9.2.1). Lungo qualunque direzione radiale, e quindi anche in corrispondenza della superficie del terreno, il potenziale elettrico assoluto (nullo all'infinito), che è pari alla tensione rispetto all'infinito, ha andamento iperbolico in funzione della distanza r :

$$U(r) = \frac{\rho I_t}{2\pi r}; \quad (9.9.2.1)$$

il valore massimo $U(r_A) = U_A$, si presenta sulla superficie del dispersore.

Il dispersore emisferico consente una semplice analisi del campo di corrente, grazie alla sua simmetria, ma non viene normalmente impiegato. Infatti nella pratica si utilizzano strutture più semplici ed economiche, come quelle delle Figure 9.9.2.2 e 9.9.2.3, costituite rispettivamente da un picchetto, da una piastra e da una grata; quest'ultima rende equipotenziale il terreno sotto cui è interrata. In ogni caso il potenziale U dipende da forma e dimensioni del dispersore ed anche dalla resistività del terreno, che può essere disomogeneo. Il potenziale assume sempre valore massimo in corrispondenza del dispersore e decresce con la distanza da questo.

La posizione del dispersore viene segnalata da un cartello del tipo rappresentato in Figura 9.9.2.4.

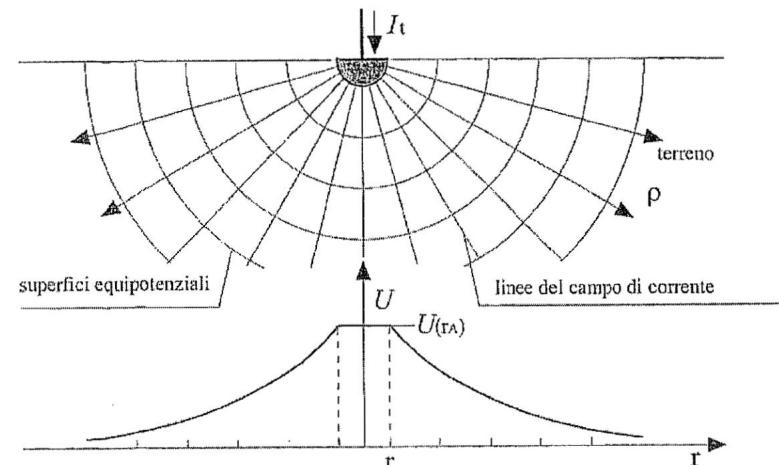


Figura 9.9.2.1

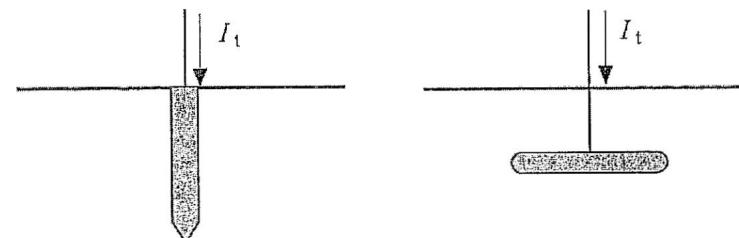


Figura 9.9.2.2

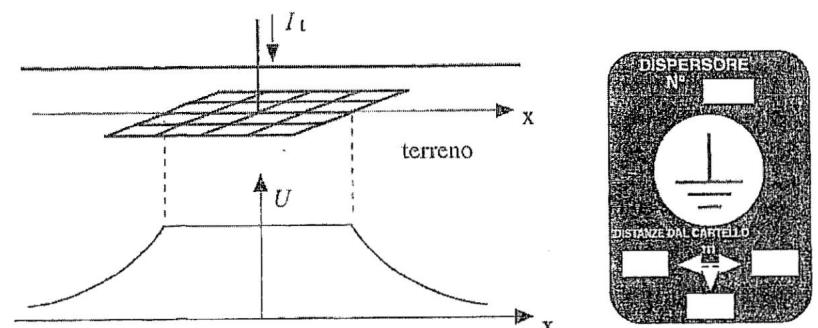


Figura 9.9.2.3

Figura 9.9.2.4

9.9.3 Tensioni e resistenza di terra

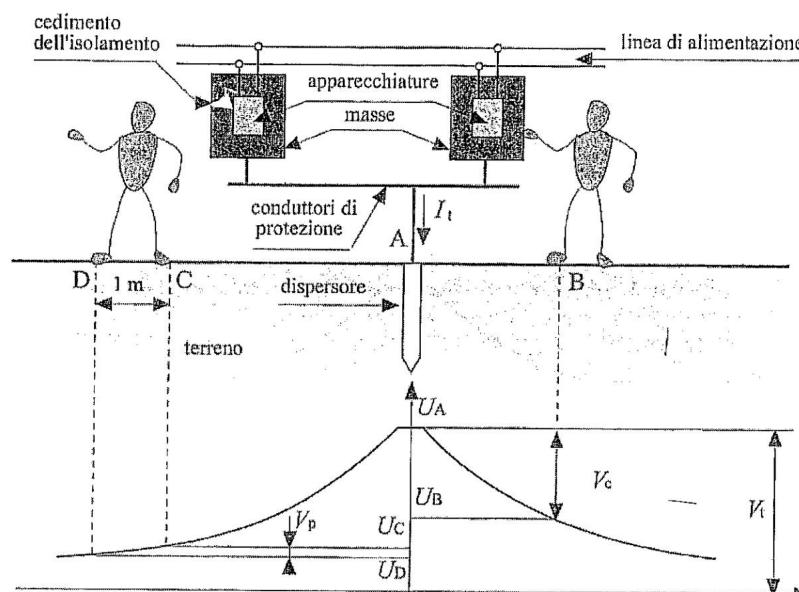


Figura 9.9.3.1

9.9.3.1 Tensione totale di terra

Si definisce *tensione totale di terra*^X V_t la tensione che si stabilisce tra il dispersore e punti sufficientemente lontani da potersi considerare all'infinito, allorché è presente la corrente di terra I_t ; essendo $U(\infty) = 0$, essa vale (Fig. 9.9.3.1):

$$V_t = U_A - U(\infty) = U_A. \quad (9.9.3.1)$$

9.9.3.2 Resistenza di terra

Si definisce *resistenza di terra*^{XI} R_t il rapporto tra la tensione totale di terra e la corrente di terra:

$$R_t \triangleq \frac{V_t}{I_t}. \quad (9.9.3.2)$$

Dato che il terreno ha comportamento prevalentemente resistivo, questa relazione vale in regime sia stazionario che sinusoidale.

Se il terreno è costituito da un mezzo lineare la resistenza di terra non dipende dalla corrente ma soltanto dalla resistività del terreno e dai parametri geometrici

^X Norme CEI 11-8 art. 1.2.15.

^{XI} Norme CEI 11-8 art. 1.2.16.

che caratterizzano il dispersore stesso: nel caso di dispersore emisferico e terreno omogeneo vale la (4.4.3.5 – Vol. 1): $R_t = \rho / 2\pi r_A$.

9.9.3.3 Tensione di contatto

È detta *tensione di contatto*^{XII} quella alla quale può essere soggetta una persona in caso di *contatto indiretto*; essa si manifesta il più delle volte tra una mano che tocca una *massa* e i piedi che sono a contatto con il terreno ad 1 m di distanza dal dispersore.

Nell'esempio di Figura 9.9.3.1, ove le masse sono collegate all'impianto di terra e in questo è presente la corrente di terra I_t a causa del cedimento di un isolamento, considerato che le masse stesse sono quasi equipotenziali con il dispersore, la tensione di contatto viene a coincidere con la differenza tra il potenziale del dispersore (A) e quello del punto di contatto a terra (B):

$$V_c = U_A - U_B \quad (9.9.3.3)$$

che risulta in ogni caso una frazione della tensione totale di terra:

$$V_c \leq V_t. \quad (9.9.3.4)$$

9.9.3.4 Tensione di passo

È detta *tensione di passo*^{XIII} quella che, in seguito alla presenza di una corrente di terra I_t può risultare applicata tra i piedi di una persona posti alla distanza di passo, convenzionalmente pari ad un metro. La tensione di passo coincide quindi con la massima differenza di potenziale tra due punti del terreno distanti un metro, come C e D di Figura 9.9.3.1:

$$V_p = U_C - U_D \quad (9.9.3.5)$$

e anch'essa risulta una frazione della tensione totale di terra:

$$V_p \leq V_t \quad (9.9.3.6)$$

9.9.3.5 Osservazioni

Nel caso esemplificato in Figura 9.9.3.1, se l'apparecchiatura si trova a notevole distanza dal dispersore cui è collegata, la tensione di contatto viene quasi a coincidere con la tensione totale di terra; invece a grande distanza dal dispersore la tensione di passo è piccola.

Inoltre quanto maggiore è la profondità di interramento del dispersore tanto più elevata risulta la tensione di contatto e tanto minore la tensione di passo, tendendo ai valori $V_c = V_t$ e $V_p = 0$.

^{XII} Norme CEI 11-1 art. 1.2.06 e CEI 11-8 art. 1.2.10.

^{XIII} Norme CEI 11-8 art. 1.2.11.

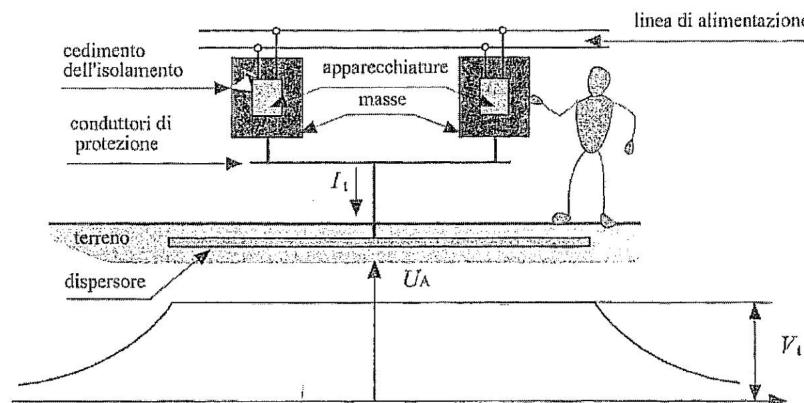


Figura 9.9.3.2

Un dispersore particolarmente efficace è quello a grata, in quanto rende equipotenziale tutta l'area sotto alla quale è interrato e quindi ivi si annullano le tensioni di contatto e di passo (Fig. 9.9.3.2).

9.9.4 Dimensionamento dell'impianto di terra

Al pari degli altri impianti elettrici, anche gli impianti di terra devono essere conformi alle norme tecnico-giuridiche sia per quanto riguarda il dimensionamento che per quanto concerne l'esercizio^{XIV}.

9.9.4.1 Dimensionamento del dispersore

La resistenza di terra non deve essere superiore a $R_t = 20 \Omega$; in molti casi è tuttavia necessario o opportuno adottare resistenze di terra nettamente inferiori a tale valore. Questi vincoli sono spesso tali da determinare il tipo di dispersore, anche in ragione della resistività del terreno. Infatti la resistenza di terra è proporzionale a quest'ultima: essa può variare entro limiti assai ampi in funzione della sua composizione e del grado di umidità del terreno, come indica a titolo orientativo la Tabella 9.9.4.1.

Tipo di terreno	Resistività ρ [$\Omega \cdot m$]
Terreno vegetale molto umido o paludoso	1
Terreno vegetale ricco di materiale organico	10
Terreno argilloso	$30 \div 100$
Terreno sabbioso asciutto	$500 \div 1.000$
Calcestruzzo asciutto, roccia dolomitica	$10^4 \div 10^5$
Marmo, granito, roccia compatta	$10^7 \div 10^9$

Tabella 9.9.4.1 Resistività di vari tipi di terreno.

^{XIV} Norme CEI 64-8/5 e CEI 11-8.

Dato che il valore della resistenza dipende inversamente dalla dimensione del dispersore, per ottenere un valore di resistenza di terra sufficientemente basso quando la resistività del terreno è molto elevata è necessario ricorrere a dispersori di grandi dimensioni. Frequentemente il dispersore viene realizzato collegando tra loro più elementi disperdenti mediante conduttori nudi ed interrati: la struttura così ottenuta costituisce un unico grande dispersore. Un ulteriore metodo per ridurre la resistenza di terra consiste nel sostituire il terreno circostante al dispersore con carbone, torba, grafite od altro materiale ad elevata conducibilità.

Per mantenere inalterate nel tempo le loro caratteristiche elettriche, i dispersori di terra devono resistere alla corrosione provocata dall'umidità o dall'azione chimica o elettrochimica del terreno. Anche in funzione di ciò sono realizzati in rame, acciaio rivestito di rame o in acciaio zincato. Le dimensioni minime in funzione dei diversi materiali sono specificamente stabilite dalle norme. Essi devono essere accessibili mediante pozzetti ispezionabili.

9.9.4.2 Dimensionamento dei conduttori di terra

I conduttori di terra devono svilupparsi secondo percorsi brevi, resistere ad ogni prevedibile sollecitazione (meccanica o elettrodinamica), resistere alla corrosione e al logoramento meccanico e non essere soggetti a danneggiamenti. Essi devono essere in metallo di buona conducibilità; possono avere forma di fili, corde, piattine, tubi o simili. Le norme impongono che le sezioni dei conduttori di terra siano rapportate alle sezioni dei conduttori di fase dell'impianto. Sono peraltro prescritte sezioni minime di 16 mm^2 , per conduttori protetti contro la corrosione, e sezioni di 25 mm^2 o 50 mm^2 per conduttori rispettivamente in rame o acciaio non protetti contro la corrosione. La loro temperatura, anche in caso di guasto, non deve superare i 200°C . Se i conduttori sono isolati, le guaine devono essere di colore giallo-verde.

Le giunzioni dei conduttori di terra devono essere sicure contro ogni possibilità di allentamento, devono garantire che la loro temperatura, per effetto della corrente di guasto, non superi quella del relativo conduttore e devono essere resistenti alla corrosione. Lungo i conduttori di terra non sono ammessi dispositivi di interruzione.

9.9.4.3 Dimensionamento dei conduttori di protezione

I conduttori di protezione devono avere sezioni rapportate a quelle dei corrispondenti conduttori di fase. Le loro guaine isolanti devono essere di colore giallo-verde. Lungo i conduttori di protezione non sono ammessi dispositivi di interruzione.

9.9.5 Misure e verifiche sugli impianti di terra

Le norme^{XV} impongono di eseguire il *collaudo dell'impianto di terra* prima della sua messa in servizio. Esso comprende la misura della resistenza di terra, la verifica dei conduttori di terra e di protezione e l'eventuale misura delle tensioni di contatto e di passo.

^{XV} Norme CEI 11-8 art. 4104 e CEI 64-8/5 art. 6126.2.

Dato che un impianto di terra può essere soggetto a deterioramento ed alterazioni, le norme prevedono anche che esso sia sottoposto a verifica ogni due anni, al fine di controllare lo stato dei conduttori e dei giunti e il valore della resistenza di terra.

9.9.5.1 Misura della resistenza di terra

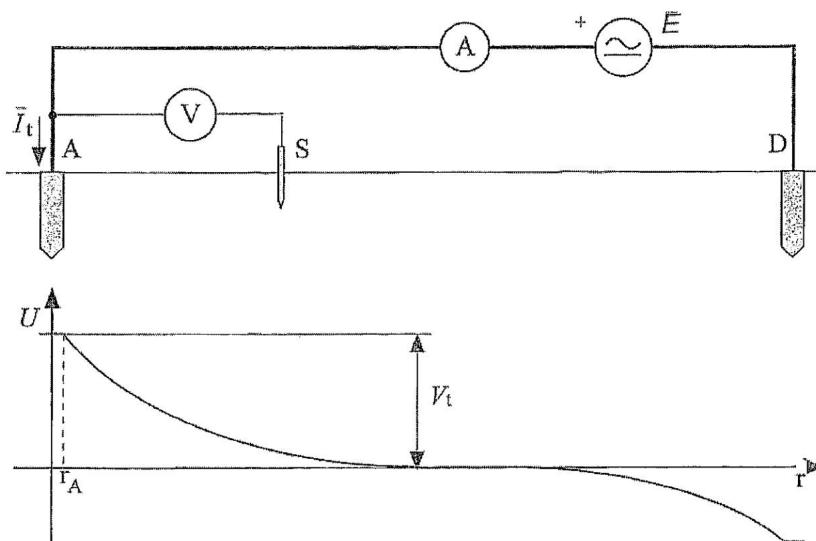


Figura 9.9.5.1

La normativa tecnica^{XVI} stabilisce come misurare la resistenza di terra di un dispersore: va utilizzato il circuito schematizzato in Figura 9.9.5.1, che comprende, oltre al dispersore A del quale si intende eseguire la misura, anche il dispersore D, posto a grande distanza in modo da non influenzare il campo di corrente in prossimità di A. Il generatore applica una f.e.m. sinusoidale (la prova va eseguita in AC) e produce la corrente di terra \bar{I}_t . Il voltmetro collegato alla sonda S misura le tensioni tra il dispersore A e punti a diverse distanze da A; per mezzo di queste misure si traccia l'andamento del potenziale in funzione della distanza dal dispersore, che presenta tipicamente l'andamento illustrato. La tensione totale di terra V_t si determina dal diagramma come differenza tra il potenziale del dispersore A e quello di punti per i quali esso si mantiene praticamente costante (zona di pianerottolo).

Dai valori della tensione totale di terra V_t e della corrente di terra I_t , misurata con l'amperometro, si determina la resistenza di terra $R_t = V_t/I_t$, in accordo con la (9.9.3.2).

^{XVI} Norme CEI 64-8/6 art. 6126.2.

9.9.5.2 Misura delle tensioni di contatto e di passo

La normativa tecnica stabilisce anche le modalità di misurazione della tensione di contatto e della tensione di passo.

- La tensione di contatto va misurata tra un punto della massa in esame e due elettrodi equipotenziali posti uno vicino all'altro a 1 m di distanza dalla proiezione verticale del punto considerato della massa.
- La tensione di passo va misurata tra due elettrodi ausiliari posti a 1 m di distanza l'uno dall'altro; anche il diagramma di Figura 9.9.5.1 ne consente tuttavia una agevole determinazione. Peraltra la sua misura è richiesta solo nei sistemi di categoria 2 e 3 (Tabella 8.1.3.2)^{XVII}.

9.9.5.3 Verifica dei conduttori di terra e di protezione

La verifica dei conduttori di terra e di protezione comprende il controllo a vista delle sezioni, dei colori, delle giunzioni, delle protezioni meccaniche. Va effettuata anche la misura della continuità elettrica con il dispersore e con tutte le masse.

^{XVII} Norme CEI 11-8 art. 4.1.05.

IMPIANTI ELETTRICI UTILIZZATORI E SICUREZZA

10.1 GENERALITÀ

Gli enti erogatori distribuiscono l'energia elettrica fino ai punti di fornitura (o di consegna) dell'energia ai singoli utenti o direttamente per mezzo della rete di media tensione (MT) (Cap. 8) o in bassa tensione (BT).

Un impianto utilizzatore è l'insieme dei circuiti di alimentazione (comprese le relative apparecchiature di manovra, di sezionamento, di interruzione, di protezione ecc.) che dal punto di fornitura¹ arrivano fino ai terminali (o alle prese a spina) a cui sono connessi i singoli apparecchi utilizzatori; esso viene anche detto *rete di distribuzione interna*.

Esistono impianti utilizzatori in media tensione, ovvero appartenenti alla categoria 2 (Tabella 8.1.3.2) ed impianti utilizzatori in bassa tensione, ovvero appartenenti alla categoria 1 (e anche 0), ai quali è prevalentemente dedicato il presente capitolo.

I passaggi dalla rete di media tensione (MT) alle reti di bassa tensione (BT) avvengono tramite *cabine di trasformazione*. Nei casi di utenze di piccola potenza, quali tipicamente sono le utenze domestiche, la cabina viene realizzata ed esercita dall'ente erogatore e la fornitura dell'energia elettrica agli utenti avviene in BT (Fig. 10.1.1); viceversa nei casi di utenze che richiedono potenze superiori ai 200 kW l'ente distributore fornisce l'energia elettrica in MT e l'utente deve realizzare e gestire la propria cabina di trasformazione, che fa parte integrante dell'impianto utilizzatore.

Il punto di fornitura, sia in MT che in BT, è situato in un *quadro elettrico di fornitura* che comprende l'*interruttore automatico generale onnipolare* ed i contatori di misura dell'energia elettrica fornita.

Gli impianti utilizzatori hanno generalmente struttura ad albero, come esemplifica la Figura 10.1.1: dal punto di fornitura si diramano più linee di zona; da ciascuna di queste si dipartono più linee locali, da ciascuna delle quali si diramano i tratti di impianto utilizzatore (detti anche *circuiti elettrici terminali*) che raggiungono i singoli *apparecchi* o le *prese a spina*. I punti di ramificazione sono collocati in *quadri elettrici* classificati come generali, di zona e locali.

¹ Norme CEI 11-1 art. 1.2.15 e CEI 64-8/2 art. 21.1.

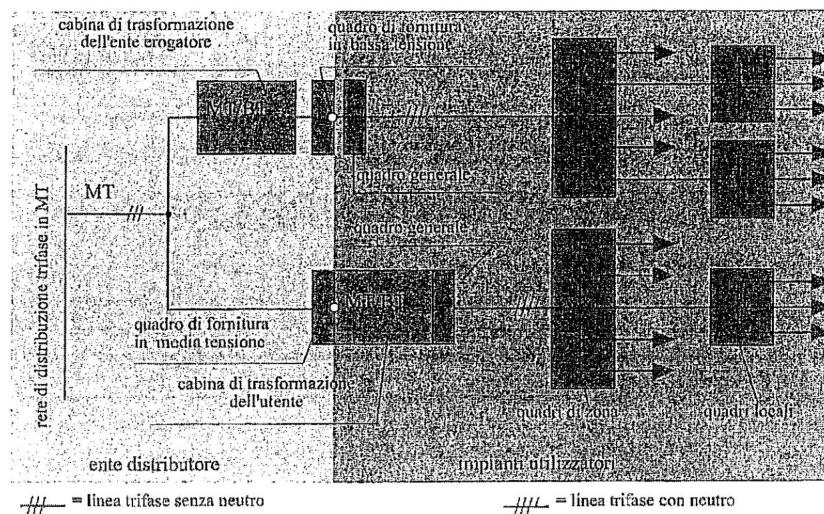


Figura 10.1.1

10.1.1 Cabina di trasformazione

Una tipica cabina di trasformazione dotata di due trasformatori è strutturata secondo lo schema di Figura 10.1.1.1. Il collegamento alla linea di distribuzione trifase in MT è generalmente realizzato mediante cavi nelle cabine situate in aree urbane, o mediante linea aerea, nelle zone rurali; procedendo dalla MT verso la BT si trovano i componenti descritti di seguito.

- Il *sezionatore tripolare di linea* S_1 permette l'apertura visivamente verificabile del circuito quando la corrente è nulla (a vuoto), isolando l'intera cabina.
- Il *sezionatore tripolare di terra* S_2 permette di mettere a terra in modo visivamente verificabile l'intera cabina quando essa è isolata (con S_1 aperto); a tal fine S_1 e S_2 devono essere dotati di *interblocchi* che impediscono manovre errate: S_2 può chiudere solo se S_1 è aperto e S_1 può chiudere solo se S_2 è aperto.
- A valle di S_2 sono inseriti, tramite *trasformatori di tensione* (TV) e *di corrente* (TA), *strumenti di misura* quali voltmetri, amperometri, wattmetri, contatori, ecc.
- A valle di questi si trovano le tre *sbarre di media tensione* (conduttori rigidi supportati da isolatori), dalle quali sono derivati i collegamenti ai primari in MT dei trasformatori.
- In serie a questi collegamenti sono inseriti i *sezionatori tripolari sotto carico* S_{3a} e S_{3b} , che permettono di collegare o escludere i trasformatori; essi devono essere capaci di interrompere o stabilire la corrente a vuoto dei trasformatori che, come detto in § 9.1.2, all'inserzione può superare di molto la corrente nominale. Il sezionatore S_1 (che non può aprire o chiudere sotto carico) è dotato

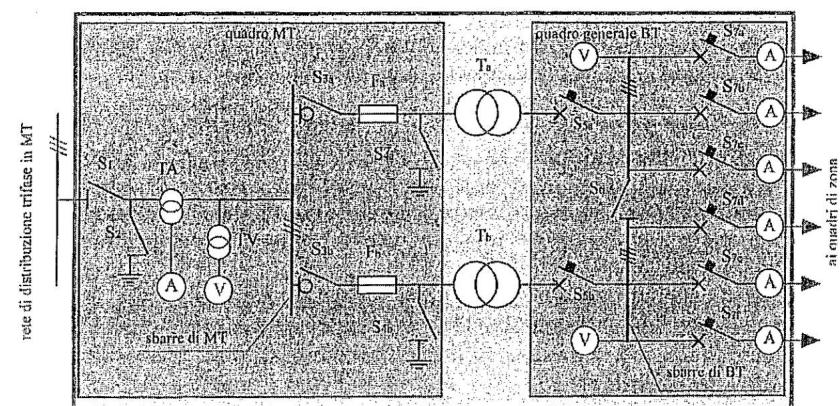


Figura 10.1.1.1

di *interblocchi* anche verso S_{3a} e S_{3b} , in modo che sia possibile manovrarlo solo quando questi sono già aperti.

- In serie sono poi poste due terne di *fusibili* F_a e F_b , per la protezione contro i cortocircuiti.
- I due *sezionatori tripolari di terra* S_{4a} e S_{4b} , pure interbloccati con S_{3a} e S_{3b} , permettono la messa a terra per lavori sulle linee a valle.
- I *trasformatori* T_a e T_b hanno i secondari in BT connessi a stella con centro stella accessibile, in modo da poter alimentare sia carichi trifasi alla tensione concatenata che carichi monofasi alla tensione stellata. Essendo previsti per funzionare in parallelo, devono verificare le condizioni illustrate in § 1.3.5.
- Ai secondari dei trasformatori sono collegati gli *interruttori quadripolari automatici* S_{5a} e S_{5b} , a protezione contro i cortocircuiti.
- A valle si trovano le quattro *sbarre di bassa tensione*; lungo queste è posto il *sezionatore quadripolare di linea* S_6 , che viene mantenuto chiuso quando, essendo richiesta una potenza ridotta, tutte le linee a valle vengono alimentate con un solo trasformatore; quando invece entrambi i trasformatori sono posti in servizio simultaneamente, S_6 può essere aperto, per limitare il valore della corrente di guasto in caso di cortocircuito a valle dei trasformatori.
- Ad ogni tratto delle sbarre di bassa tensione è direttamente collegato un *voltmetro*.
- Dalle sbarre sono derivate le *linee quadripolari trifasi o bipolari monofasi* che alimentano i quadri elettrici di zona, ciascuna dotata di *amperometro* e protetta da un *interruttore automatico quadripolare o bipolare con relè magnetotermico o differenziale* S_7 .
- I componenti a monte dei trasformatori sono raccolti nel quadro di MT.
- I componenti a valle dei trasformatori sono raccolti nel quadro generale di BT.

La cabina di trasformazione possiede un suo *impianto di terra* (§ 9.9), che svolge più funzioni (di protezione, di funzionamento, per lavori); spesso il *dispersore* è costituito da una grata metallica interrata sotto la cabina o da un anello interrato che la circonda. All'impianto di terra vengono collegate le masse delle apparecchiature, gli schermi conduttori che segregano le parti in tensione, i centri stella dei secondari dei trasformatori e, in occasione di lavori, anche le parti attive, poste temporaneamente fuori servizio (per mezzo dei sezionatori di terra S_2 e S_4 , nell'esempio illustrato). Tra l'impianto di terra e ciascuna fase di MT sono spesso inseriti *scaricatori* per proteggere l'intero impianto da eventuali sovratensioni di manovra o da fulminazioni.

Oltre a quanto indicato più sopra, la cabina è anche dotata di una serie di accessori e accorgimenti intesi a garantire l'incolumità del personale addetto^{II}.

10.1.2 Quadri elettrici

I *quadri elettrici* sono involucri (metallici oppure di materiale isolante) in cui arrivano e da cui partono le linee elettriche; in essi sono collocati vari dispositivi di manovra, di misura e di protezione^{III}. In particolare ogni tratto di linea elettrica in partenza è protetto per mezzo di un *interruttore automatico multipolare* atto ad interrompere tutti i conduttori attivi (vale a dire i conduttori di fase ed eventualmente il neutro). I quadri di MT hanno generalmente maggior ingombro rispetto a quelli di BT, perché, all'aumentare della tensione, crescono le distanze (in aria o la lunghezza degli isolatori) tra i diversi elementi in tensione e tra questi e la massa. Un esempio di quadro elettrico in BT è mostrato in Figura 10.1.2.1.

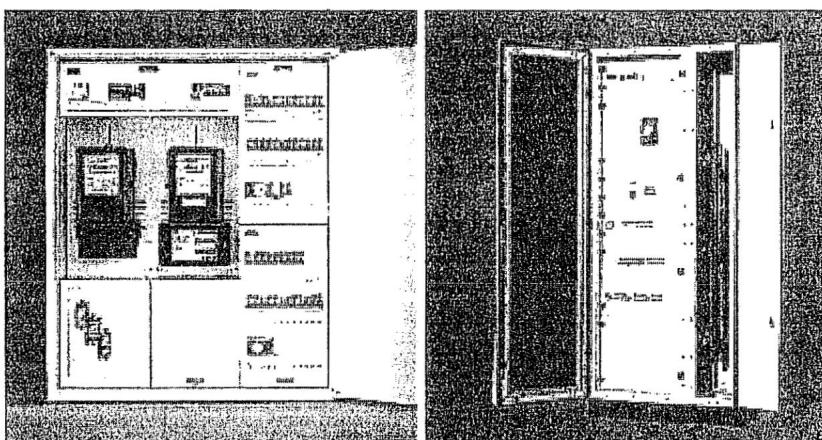


Figura 10.1.2.1 Quadri elettrici per BT.

^{II} Norme CEI 11-1.

^{III} Norme CEI 17-13.

10.1.3 Selettività delle protezioni

Avendo l'impianto una struttura ramificata, l'intervento di un interruttore o di un fusibile comporta l'esclusione di tutte le utenze a valle. Per ridurre al minimo il numero di linee messe fuori servizio, i dispositivi di protezione devono avere caratteristiche di intervento opportunamente coordinate tra loro.

Ad esempio, nella porzione di impianto rappresentata in Figura 10.1.3.1a, in caso di sovraccorrente nella sezione a valle di uno degli interruttori S_2 è opportuno che apra quest'ultimo e non S_1 in modo che non sia tolta l'alimentazione alle altre linee poste a valle di quest'ultimo. Tale condizione viene ottenuta con la *selettività degli interventi di protezione*, che consiste nell'utilizzare per S_1 e S_2 interruttori (o fusibili) aventi diversi tempi di intervento, quali quelli indicati in Figura 10.1.3.1b, in modo che per ogni guasto a valle di uno degli S_2 apra questo e non S_1 . Quest'ultimo interviene in caso di guasti che si manifestano tra S_2 e S_1 , oppure in caso di malfunzionamento degli S_2 .

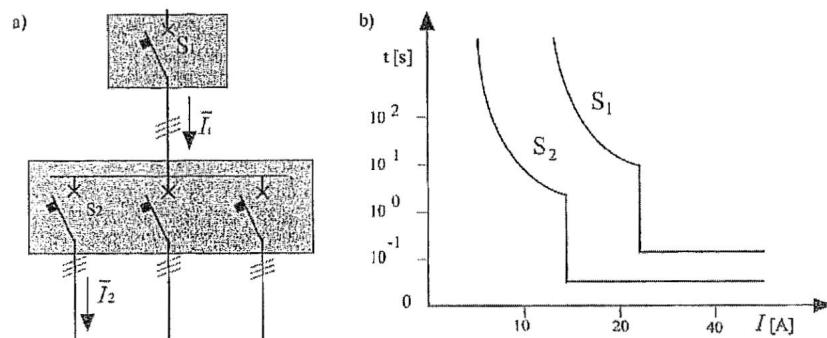


Figura 10.1.3.1

10.2 SICUREZZA DELLE PERSONE

Prima di esaminare la tipologia degli impianti in BT, è opportuno analizzare gli effetti della corrente elettrica sul corpo umano, in quanto le persone che utilizzano apparecchiature elettriche o operano in loro prossimità sono soggette al rischio di *infortunio elettrico*, che può avvenire quando esse vengono in contatto contemporaneamente con più parti conduttrici poste reciprocamente in tensione.

10.2.1 Infortunio elettrico

10.2.1.1 Pericolosità della corrente elettrica

La soglia di percezione della corrente elettrica nella persona umana, per un contatto tra i polpastrelli, è circa di 0,5 mA in AC a frequenza industriale ($f = 50 \pm 60$ Hz) e di 2 mA in DC. Con intensità maggiori si producono nel corpo umano i seguenti effetti fisiopatologici.

- **Tetanizzazione muscolare:** i muscoli, sottoposti ad una corrente alternata, subiscono una sequenza di stimoli elettrici; non riuscendo a contrarsi e rilassarsi con la frequenza della corrente, i muscoli restano contratti permanentemente, come avviene nelle infezioni da tetano. Tale circostanza è particolarmente grave quando un oggetto in tensione rispetto a terra viene impugnato volontariamente, poiché la tetanizzazione paralizza i muscoli impedendone il rilascio; la massima corrente per la quale si riesce a lasciare la presa viene chiamata *corrente di rilascio* e si aggira sui $10 \div 30 \text{ mA}$ a frequenza industriale.
- **Blocco respiratorio:** una corrente alternata sufficientemente elevata ($> 50 \text{ mA}$ a frequenza industriale) che interessi la regione toracico-polmonare può provocare la tetanizzazione dei muscoli respiratori e quindi paralizzare la respirazione, con ipossia e danni irreversibili al cervello se la paralisi non cessa entro pochi minuti.
- **Fibrillazione ventricolare:** una corrente alternata sufficientemente elevata ($> 50 \text{ mA}$ a frequenza industriale) che interessi la regione toracica può provocare la perdita del coordinamento dei muscoli cardiaci che iniziano a pulsare in modo scoordinato; allora il cuore non riesce più a pompare il sangue, causando ancora ipossia e danni irreversibili al cervello, se la fibrillazione non cessa entro pochi minuti.
- **Arresto cardiaco:** forti intensità di corrente possono provocare l'arresto cardiaco anziché la fibrillazione ventricolare.
- **Ustioni:** densità di corrente di pochi mA/mm^2 sulla superficie di contatto tra acute e conduttori in tensione provocano surriscaldamenti per effetto Joule che se durano per qualche secondo sono sufficienti a causare ustioni anche gravi; densità via via maggiori producono la carbonizzazione dei tessuti superficiali e di quelli interni o addirittura di interi arti. In corrispondenza dei tessuti necrotizzati si forma una particolare sostanza, la mioglobina, che si muove nell'organismo con particolare lentezza ma che, una volta giunta ai reni, ne provoca il blocco e la morte dell'infortunato.

Tetanizzazione muscolare, blocco respiratorio e fibrillazione ventricolare, che sono provocati principalmente dalla sequenza di stimoli tipici della corrente *alternata*, possono manifestarsi anche in *corrente continua*, ma solo a correnti notevolmente più elevate. La corrente continua ha invece effetti comparabili con quelli dell'alternata per quanto concerne l'arresto cardiaco e le ustioni e, a differenza di quella, può anche produrre gravi fenomeni di *elettrolisi* dei liquidi organici.

Per quanto detto gli effetti dalla corrente elettrica nel corpo umano sono determinati dai seguenti fattori:

- *organi colpiti* in relazione al percorso della corrente tra i punti di contatto (mano-mano, mano-piede, ...);
- *intensità, frequenza e permanenza* della corrente;
- *fattori fisiologici soggettivi*, variabili da individuo a individuo.

10.2.1.2 Limiti di corrente

Per una data frequenza la *corrente pericolosa* I_p e la durata Δt sono tra loro correlate, potendo essere tollerate correnti tanto maggiori quanto minore è la loro durata; tale correlazione può essere espressa dalla *soglia media di pericolosità* (Fig. 10.2.1.1):

$$I_p = I_0 + \frac{Q}{\Delta t} \quad (10.2.1.1)$$

che individua il limite al di sotto del quale la corrente è percepibile ma non pericolosa; al di sopra di esso la corrente deve considerarsi potenzialmente pericolosa, iniziando a manifestarsi la tetanizzazione.

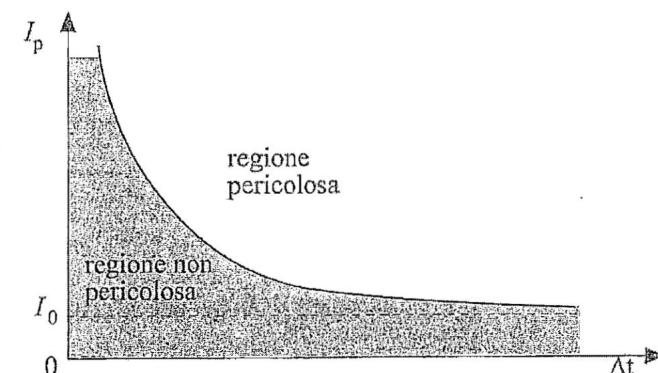


Figura 10.2.1.1

I parametri I_0 e Q che compaiono nella (10.2.1.1) dipendono marcatamente dalla frequenza della corrente: a frequenza industriale si può assumere $I_0 = 10 \div 30 \text{ mA}$ e $Q \cong 10 \text{ mAs}$; ad esempio una corrente permanente di 10 mA comporta rischio simile a quello di una corrente di 1 A che permane per 10 ms . Per frequenze minori la curva di pericolosità presenta valori più elevati fino a raggiungere $I_0 \cong 60 \text{ mA}$ in corrente continua. Per frequenze elevate risultano pure tollerabili correnti maggiori, perché esse, divenendo superficiali per l'*effetto pelle*, tendono a non interessare gli organi interni. Pertanto la maggiore pericolosità della corrente elettrica si presenta proprio alle frequenze industriali, con le quali interagisce la maggior parte delle persone.

10.2.1.3 Limiti di tensione

Il corpo umano presenta comportamento prevalentemente resistivo; peraltro la tensione $V_p = R_u I_p$ che corrisponde alla corrente pericolosa (10.2.1.1) è di difficile definizione perché la resistenza del corpo R_u può variare in un campo molto ampio, dipendendo da molteplici fattori quali i punti di contatto, l'estensione delle superfici di contatto, la pressione di contatto, lo spessore della pelle e il suo grado di umidità. Inoltre R_u decresce al crescere della tensione e varia nel tempo durante la persistenza del contatto. Con tensioni sinusoidali di valore efficace di alcune decine di volt difficilmente si ha $R_u < 2000 \Omega$: per questo motivo si considera che, per la media degli individui, non siano pericolose tensioni sinusoidali con valore efficace $V \leq 50 \text{ V}$ e tensioni continue $V \leq 120 \text{ V}$, applicate per un tempo illimitato.

Questi livelli corrispondono ai limiti previsti dalle norme tecniche per i sistemi di categoria 0 (detti a *bassissima tensione*, Tab. 9.1.3.2), che pertanto usualmente non comportano pericoli per l'incolumità delle persone.

Invece i sistemi della categoria 1 ($50 \text{ V} < V \leq 1.000 \text{ V}$ in AC e $120 \text{ V} < V \leq 1.500 \text{ V}$ in DC) presentano livelli di tensione pericolosi; dato che con essi interagisce la quasi totalità della popolazione, generalmente priva di specifiche competenze tecniche, questi sistemi richiedono misure di protezione particolarmente efficaci contro gli infortuni elettrici.

Con i sistemi delle categorie 2 e 3, aventi tensioni maggiori, interagisce solo personale specializzato e specificamente addestrato.

Al fine di limitare i rischi di infortuni elettrici, le norme giuridiche e tecniche stabiliscono vari criteri ai quali gli impianti e le apparecchiature elettriche devono essere conformi, come si vedrà nel § 10.3.

10.2.2 Contatti diretti e indiretti

I tipi di contatti elettrici ai quali può essere sottoposto un individuo si distinguono in diretti ed indiretti:

- un *contatto diretto*^{IV} si verifica quando un individuo viene in contatto con parti attive, ovvero normalmente in tensione;
- un *contatto indiretto*^V si verifica quando un individuo viene in contatto con parti metalliche che si trovano in tensione accidentalmente ed imprevedibilmente. Ciò può accadere perché sollecitazioni di varia natura (termiche, meccaniche, ecc.) possono produrre cedimenti degli isolamenti o degli involucri protettivi delle parti in tensione di macchine, apparecchiature o impianti; in tal modo parti metalliche (dette *masse*) accessibili alle persone, perché normalmente non in tensione rispetto a terra, possono divenire equipotenziali con conduttori in tensione.

10.2.3 Protezione contro i contatti diretti

La protezione contro i contatti diretti si attua prevenendo i contatti accidentali con le parti in tensione. Nel caso dei sistemi elettrici di categoria 1 essa può effettuarsi per mezzo dei seguenti provvedimenti^{VI}:

- *isolamento delle parti attive* (ossia in tensione) con materiali isolanti non rimmovibili;
- *involucri o barriere* tali da impedire ogni contatto con parti attive^{VII};
- *ostacoli o distanziamento* tali da impedire il contatto accidentale con le parti attive;

^{IV} Norme CEI 11-1 art. 1.2.07 e CEI 64-8/2 art. 23.5.

^V Norme CEI 11-1 art. 1.2.08 e CEI 64-8/2 art. 23.6.

^{VI} D.lgs. n. 81 del 9.4.08 e seguenti; Norme CEI 64-8/4 art. 412.

^{VII} Il livello di protezione offerto da involucri e barriere è quantificato per mezzo del grado di protezione, espresso da una sigla costituita dalle lettere IP seguite da due cifre (Norme CEI 70-1); la prima si riferisce alla protezione contro la penetrazione dei corpi solidi, la seconda a quella dei liquidi. Il grado di protezione cresce con le rispettive cifre. Ad esempio IP-43 indica che è garantita la protezione contro l'intrusione di fili con diametro non inferiore a 1 mm e contro pioggia battente con inclinazione fino a 60°.

- *interruttori differenziali ad alta sensibilità*, con correnti differenziali di soglia $I_{\Delta s} \leq 30 \text{ mA}$ (§ 9.5.2.2)^{VIII}; si tratta di un metodo di protezione *addizionale*: questi interruttori possono infatti intervenire efficacemente contro i contatti diretti che si verificassero malgrado gli accorgimenti precedenti. La corrente differenziale I_{Δ} che determina l'intervento del relè circola anche nel corpo umano, restandovi applicata fino all'apertura dell'interruttore.

10.2.4 Protezione contro i contatti indiretti

La protezione contro i contatti indiretti, come si vedrà nel § 10.3, si realizza nei seguenti modi^{IX}:

- *massa a terra* delle masse, realizzata connettendole all'impianto di terra, che ha lo scopo di evitare che, in caso di guasto, esse assumano potenziali elevati rispetto a terra;
- *interruzione automatica dell'alimentazione*; è garantita da *interruttori automatici* che intervengono in caso di guasto in modo da impedire che le masse assumano potenziali elevati per tempi tali da divenire pericolose.
- *doppio isolamento* delle parti in tensione che rende bassissima la probabilità di un cedimento completo dell'isolamento e permette di non ricorrere a dispositivi di interruzione; gli apparecchi che ne sono dotati recano il simbolo 
- *separazione elettrica*, che si attua, in alternativa all'interruzione automatica, fornendo l'alimentazione attraverso un trasformatore di isolamento e permette di evitare l'interruzione in caso di guasto; esso viene utilizzato nei locali ad uso medico.

10.3 IMPIANTI UTILIZZATORI PER TENSIONI FINO A 1000 V

10.3.1 Generalità

Gli impianti utilizzatori in bassa tensione, che tipicamente alimentano carichi trifasi a 400 V o monofasi a 230 V, sono connessi ai secondari di trasformatori con le fasi collegate a stella, centro stella accessibile e neutro distribuito insieme alle tre fasi. Essi rientrano tra i sistemi elettrici con tensione alternata compresa tra 50 V e 1000 V (Categoria 1 di Tab. 8.1.3.2).

Ai fini anti-infortunistici le norme tecniche prevedono che i sistemi elettrici con tensioni alternate fino a 1000 V (quindi quelli con tensioni appartenenti alle Categorie 0 e 1) rispettino specifiche modalità di messa a terra del neutro, delle masse e di tutti gli involucri metallici che contengono i dispositivi elettrici utilizzatori^X. Tali norme distinguono i sistemi elettrici in base ad una sigla composta da gruppi di lettere con i seguenti significati.

- *Prima lettera* - condizione del sistema di alimentazione rispetto a terra:
 - T: un punto del sistema (in genere il neutro) è collegato direttamente a terra;
 - I: il sistema è isolato da terra, oppure un suo punto (in genere il neutro) è collegato a terra tramite un'impedenza elevata.

^{VIII} D.P.R. 447/91 art. 5 comma 6.

^{IX} D.lgs. n. 81/2008 e seguenti; Norme CEI 64-8/4 art. 413.

^X Norme CEI 64-8/3 art. 312.2.

- *Seconda lettera* - condizione delle masse rispetto a terra:
 - T: le masse sono collegate direttamente a terra con impianto di terra proprio;
 - N: le masse sono collegate al punto di messa a terra del sistema di alimentazione.
- *Eventuali lettere successive* - condizione dei conduttori di neutro e di protezione:
 - S: funzioni di neutro (N) e di protezione (PE) svolte da conduttori separati;
 - C: funzioni di neutro e di protezione svolte da un unico conduttore comune (PEN).

Dato che la normativa impone il collegamento a terra delle masse, risultano possibili le seguenti combinazioni delle prime due lettere: TT, TN e IT.

10.3.2 Sistema TT

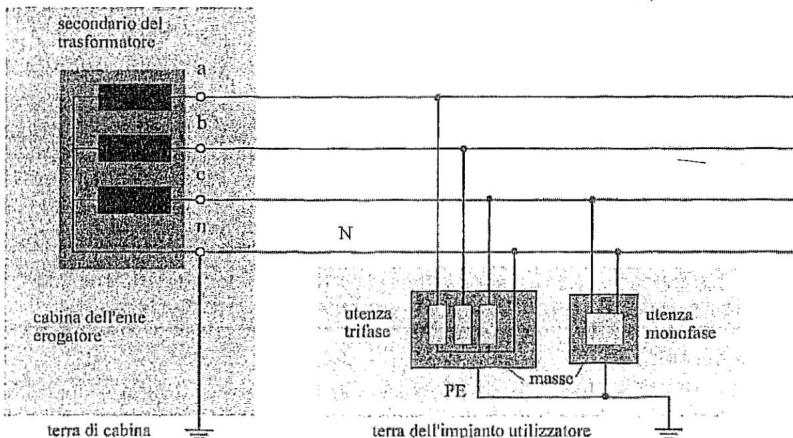


Figura 10.3.2.1

Il *sistema TT* viene sempre impiegato per alimentare impianti utilizzatori di piccola potenza, privi di cabina di trasformazione propria, quali sono le utenze domestiche.

In questo sistema il neutro (N) è collegato all'impianto di terra della cabina elettrica, che appartiene all'ente erogatore: gli impianti utilizzatori devono essere dotati di impianto di terra proprio, necessariamente distinto da quello della cabina, per connettervi le masse delle proprie apparecchiature tramite i conduttori di protezione (PE). La situazione è illustrata in Figura 10.3.2.1, dove a titolo di esempio sono rappresentate due utenze, una trifase ed una monofase.

Il sistema elettrico TT ha il neutro collegato direttamente a terra in cabina (con resistenza di terra pari ad R_N) e le masse delle utenze collegate ad impianti di terra (con resistenza di terra pari ad R_T) elettricamente indipendenti da quello che

realizza il collegamento a terra del sistema di alimentazione (vedi Fig. 10.3.2.1). Generalmente questo sistema di distribuzione viene adottato per potenze installate inferiori a circa 30 kW.

Nei sistemi TT non vengono prese particolari misure per rendere innocuo il conduttore di neutro, che deve pertanto essere considerato un conduttore attivo a tutti gli effetti. Ciò significa che:

- il conduttore di neutro deve essere sezionabile;
- nei casi particolari in cui si utilizzino i dispositivi a massima corrente per la protezione contro i contatti diretti, essi devono essere installati anche sul conduttore di neutro, indipendentemente dalle esigenze di protezione contro le sovraccorrenti.

10.3.2.1 Sicurezza e protezione nei sistemi TT

Per questo sistema di distribuzione, la protezione contro i contatti indiretti avviene con la messa a terra di tutte le masse metalliche, in maniera coordinata con i dispositivi di protezione, in modo da soddisfare la condizione imposta dalle Norme CEI 64-8/4:

$$R_{\text{tot}} \leq \frac{50}{I_g} ; \quad (10.3.2.1)$$

dove:

- R_{tot} corrisponde alla somma della resistenza R_T del dispersore e di quella dei conduttori di protezione delle masse;
- 50 rappresenta la tensione limite ammessa dalla normativa per ambienti normali (in taluni ambienti essa può essere ridotta, ad esempio 25 V);
- I_g è la corrente di guasto circolante che provoca l'intervento automatico del dispositivo di protezione. Quando il dispositivo di protezione è del tipo a corrente differenziale, I_g è la corrente nominale differenziale.

Un *guasto fase-terra*, causato dal cedimento dell'isolamento tra una fase e la massa di un'apparecchiatura, dà luogo ad una corrente che può coinvolgere anche le persone che si trovano in prossimità dell'apparecchiatura e provocare un infortunio per contatto indiretto (§ 10.2.2). Il percorso della corrente di guasto (Fig. 10.3.2.2) comprende, per un tratto, anche il terreno. In caso di guasto monofase a terra presso l'utente, la corrente di guasto \bar{I}_g che circola dipende dai valori delle resistenze di terra dei due impianti, essendo in confronto trascurabili le impedanze dei tratti di conduttore e l'impedenza di corto circuito del trasformatore.

$$\bar{I}_g = \frac{\bar{E}}{\dot{Z}_g} = \frac{\bar{E}}{R_T + R_N + \dot{Z}_{2g} + \dot{Z}_f} \approx \frac{\bar{E}}{R_T + R_N} . \quad (10.3.2.2)$$

Il valore efficace della tensione totale di terra $V_t = R_t I_g$, che è la massima che può essere applicata tra mano e piede della persona di Figura 10.3.2.2 è dato da:

$$V_t = \frac{E}{R_T + R_N} \cdot R_T = \frac{E}{1 + \frac{R_N}{R_T}} ; \quad (10.3.2.3)$$

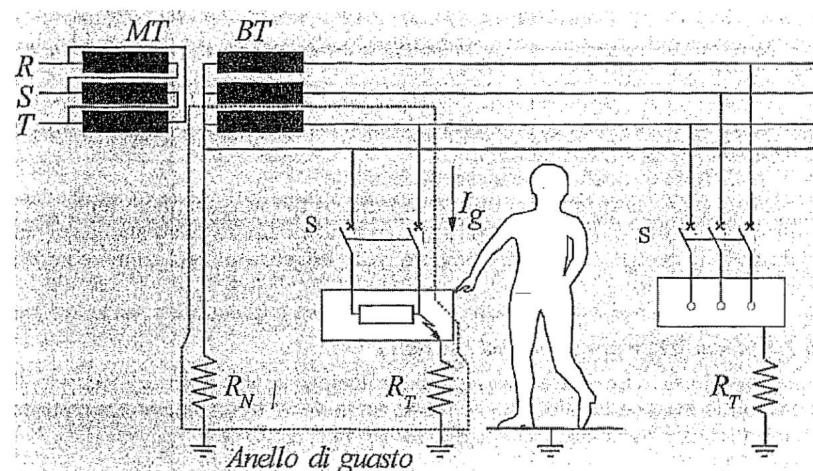


Figura 10.3.2.2

Essendo nella realtà $R_N < R_T$ (da un quinto ad un terzo) si ha:

$$V_t \approx (0,75 \div 0,85)E > 50 \text{ V}; \quad (10.3.2.4)$$

per cui la semplice adozione dell'impianto di terra non permette di soddisfare la (10.3.2.1); è allora necessario predisporre dispositivi di protezione, come gli interruttori automatici S di Figura 10.3.2.2, capaci di interrompere tempestivamente la corrente di guasto.

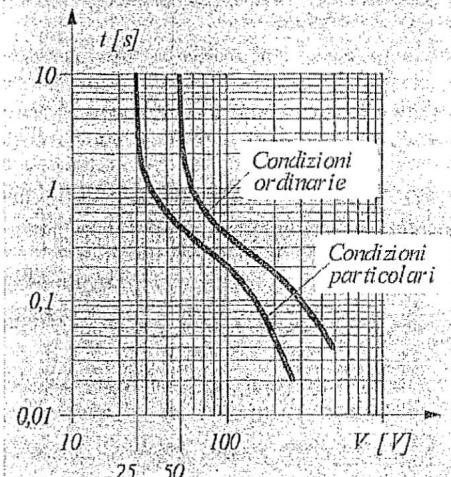


Figura 10.3.2.3

Si può quindi concludere che per la protezione delle persone

con il sistema TT il tempo di intervento degli interruttori S di Figura 10.3.2.2 deve essere ≤ 200 ms; questo tempo di intervento è garantito dagli interruttori magnetotermici, purché installati in accordo con le normative vigenti.

10.3.3 Sistema TN

Il sistema TN viene sempre impiegato nel caso di forniture di potenza media-alta, che comprendono una cabina di trasformazione propria. La cabina può essere situata all'interno del fabbricato, come nel caso di grandi edifici civili e commerciali; in questo caso non è possibile separare l'impianto di terra di cabina da quello degli utilizzatori.

Altro caso è rappresentato da medi o grandi impianti industriali, dove la cabina è parte dell'impianto ed esiste una responsabilità centralizzata per la gestione dell'impianto stesso.

In questo sistema si ha un unico impianto di terra a cui sono collegati sia il centro stella (neutro) del trasformatore che il conduttore di protezione delle masse delle utenze. Si distinguono i seguenti tipi di sistemi TN:

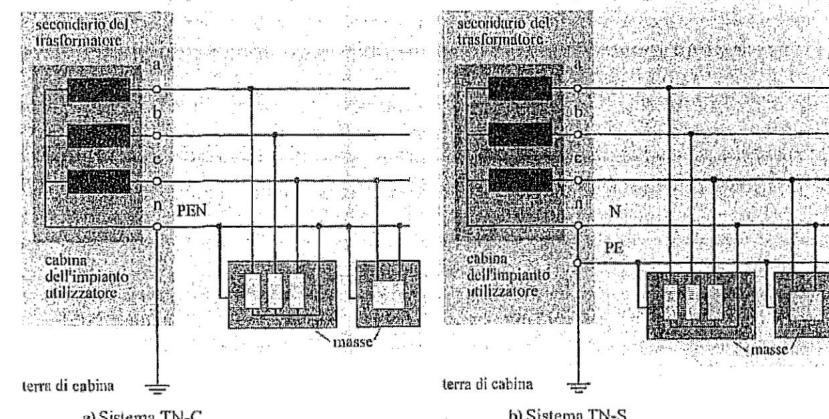


Figura 10.3.3.1

- TN-C in cui le funzioni di neutro e di protezione sono svolte dall'unico conduttore PEN (Fig. 10.2.3.1a);
- TN-S in cui le due funzioni sono svolte separatamente dal neutro N e dal conduttore di protezione PE (Fig. 10.2.3.1b);
- TN-C-S in cui le due funzioni sono in parte combinate in un unico conduttore e in parte separate.

I sistemi TN-C e TN-S possono essere anche applicati insieme a due parti diverse dello stesso impianto, ma il sistema TN-C non può mai essere utilizzato a valle di un sistema TN-S.

10.3.3.1 Sicurezza e protezione nei sistemi TN

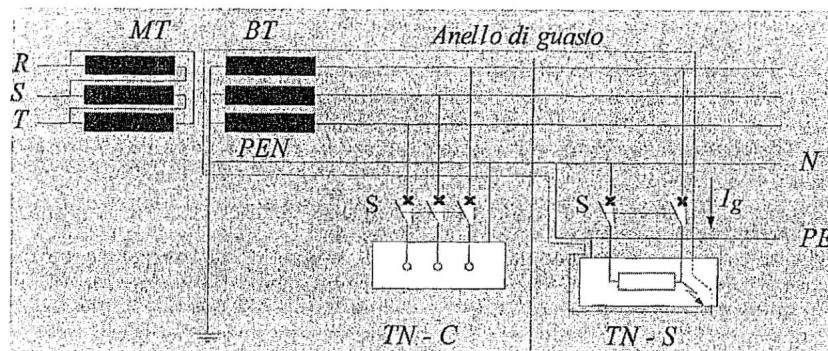


Figura 10.3.3.2

In caso di *guasto fase-terra* (causato dal cedimento dell'isolamento tra una fase e la massa di un'apparecchiatura, che può comportare un contatto indiretto), l'anello di guasto non interessa il terreno, ma comprende il conduttore di protezione (PEN o PE, Fig. 10.3.3.2) e quindi presenta impedenza complessiva data dalla somma delle impedenze di cortocircuito a secondario del trasformatore, della linea e del conduttore di protezione fino al punto di guasto. In tale anello agisce la tensione di fase \bar{E} a secondario del trasformatore e pertanto viene a stabilirsi la corrente di guasto:

$$\bar{I}_g = \frac{\bar{E}}{Z_g} = \frac{\bar{E}}{Z_{2c} + Z_\ell + Z_p}, \quad (10.3.3.1)$$

sempre nettamente maggiore della corrente nominale dell'impianto I_n .

Il terreno, che non è interessato da \bar{I}_g , risulta in ogni punto equipotenziale con il centro stella del sistema, sicché la tensione di contatto V_c , pari alla differenza di potenziale tra il punto di contatto sulla massa ed il centro stella, a regime è data da:

$$V_c = Z_p I_g = \frac{Z_p}{Z_g} E. \quad (10.3.3.2)$$

Pertanto con il sistema TN la tensione di contatto V_c risulta una frazione del valore efficace della tensione di fase E , ma può comunque raggiungere valori pericolosi per le persone: è allora necessario predisporre un dispositivo di protezione, tipicamente un interruttore automatico (S in Fig. 10.3.3.2), capace di interrompere tempestivamente la corrente di guasto. In particolare la normativa^{XI} impone la condizione:

^{XI} Norme CEI 64-8/4 art. 413.1.33.

$$\frac{V_0}{Z_g} = I_g \geq I_{int}, \quad (10.3.3.3)$$

ove V_0 è la tensione nominale tra fase e terra; Z_g è la massima impedenza dell'anello di guasto, cioè quella relativa ad un guasto nel punto più remoto; I_{int} è la corrente per la quale il dispositivo di protezione interviene automaticamente entro il tempo t_a indicato nella Tabella 10.3.3.1 in funzione della tensione nominale.

V_0 [V]	120	230	400	>400
t_a [s]	0,8	0,4	0,2	0,1

Tabella 10.3.3.1 Tempi di intervento del dispositivo di protezione.

Pertanto in caso di contatto indiretto a seguito di un guasto fase-terra, una persona non può essere sottoposta alla tensione di contatto per tempi maggiori di quelli di tabella. Essendo $I_g \gg I_n$, tale protezione può sempre essere realizzata mediante interruttore magnetotermico.

10.3.4 Sistema IT

Il sistema *IT* viene utilizzato solo dove sussistono particolari esigenze di continuità di esercizio (sale operatorie, aeroporti, impianti a ciclo continuo, impianti di bordo, ...) e richiede che l'impianto utilizzatore sia dotato di cabina di trasformazione realizzata dall'utente; il neutro generalmente non viene distribuito. I secondari del trasformatore hanno il centro stella connesso all'impianto di terra della

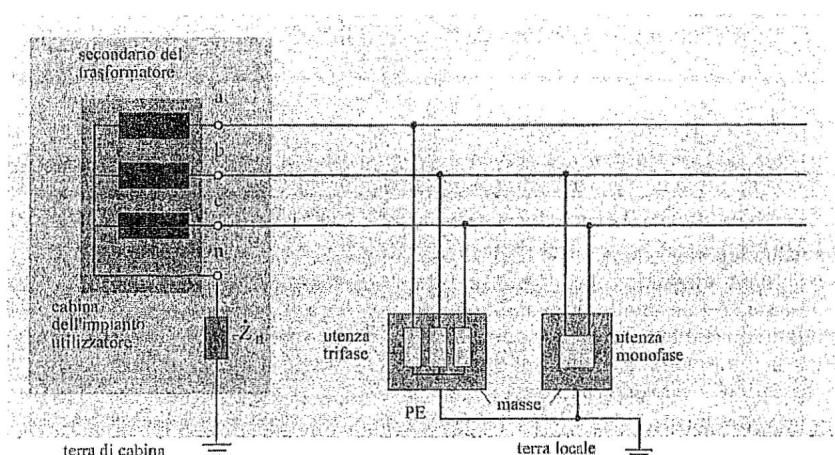


Figura 10.3.4.1

$$C_{nM} = \sqrt{A_{nM}^2 + B_{nM}^2} \quad \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{B_{nM}}{A_{nM}} \quad (\text{A.1.2.4})$$

I coefficienti della (A.1.2.3) si determinano mediante i seguenti integrali:

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \\ C_{nM} &= \frac{2}{T} \sqrt{\left(\int_0^T y(t) \sin(n\omega t) dt \right)^2 + \left(\int_0^T y(t) \cos(n\omega t) dt \right)^2} \\ \varphi_n &= \arctg \frac{\int_0^T y(t) \sin(n\omega t) dt}{\int_0^T y(t) \cos(n\omega t) dt} \end{aligned} \quad (\text{A.1.2.5})$$

Il termine $C_{1M} \sin(\omega t + \varphi_1)$ è detto *fondamentale*, gli altri *armoniche*. Dalla definizione di valore efficace di una grandezza periodica, si ricava subito che il valore efficace Y di $y(t)$ sviluppata in serie di Fourier risulta:

$$Y = \sqrt{A_0^2 + \left(\frac{C_{1M}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{C_{2M}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots} = \sqrt{A_0^2 + C_1^2 + C_2^2 + \dots} \quad (\text{A.1.2.6})$$

ovvero pari alla radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci dei singoli termini della serie.

A.3 APPLICAZIONE ALLE RETI ELETTRICHE

Si consideri una rete costituita da bipoli lineari non contenenti generatori e da generatori di tensione (o corrente) periodica non sinusoidale (ad esempio inverter, § 2.3).

Per risolvere la rete con il metodo fasoriale si analizzerà separatamente ogni frequenza presente e si calcolerà l'impedenza dei vari bipoli non contenenti generatori. Poi si considereranno separatamente i diversi generatori e le diverse armatiche di ogni generatore e, note le rispettive impedenze \dot{Z} , si calcoleranno le correnti nei lati relative ad ogni armonica. Per l'ipotesi di linearità della rete, si può applicare il principio di sovrapposizione degli effetti, per cui la corrente in ogni lato sarà la somma delle correnti armatiche.

Dalla definizione di valore efficace di grandezze periodiche, su ciascun bipolo si avranno:

$$\begin{cases} V = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + \dots} \\ I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots} \end{cases} \quad (\text{A.1.3.1})$$

Su ciascun bipolo, la potenza attiva (che, ricordiamo, è la media di $p(t)$ in un periodo) è data dalla somma delle potenze relative alle varie armatiche:

$$P = V_0 I_0 + \sum_{r=1}^{\infty} V_r I_r \cos \varphi_r \quad (\text{A.1.3.2})$$

Analogamente, ma senza attribuire ad esse alcun significato fisico si possono definire:

$$\begin{cases} Q = \sum_{r=1}^{\infty} V_r I_r \sin \varphi_r \\ S = VI = \sqrt{\sum_{r=0}^{\infty} V_r^2} \sqrt{\sum_{r=0}^{\infty} I_r^2} \end{cases} \quad (\text{A.1.3.3})$$

Quando siano presenti più armatiche, non vale più la relazione $S^2 = P^2 + Q^2$. A parità di potenza attiva e reattiva, la presenza di componenti armatiche nelle reti comporta un aumento di potenza apparente (che determina il dimensionamento, e quindi il costo, dei vari componenti di rete, inclusi i generatori).

Appendice

B

ESEMPI DI PORTATE DEI CAVI ELETTRICI

■ B.1 CAVI ELETTRICI ISOLATI

Si definisce portata di un conduttore il valore della corrente (valore efficace) per la quale la temperatura del conduttore è contenuta entro limiti accettabili. Nelle Tabelle B.1.1 e B.1.2 sono indicate le portate di cavi trifase per bassa tensione con conduttori in rame o in alluminio posati in aria libera o interrati con isolamento in polivinilcloruro (PVC - temperatura di esercizio limite 70 °C) e polietilene reticolato (XLPE - temperatura di esercizio limite 90 °C) a seconda delle diverse condizioni di installazione.

B.1.1 Condizioni di posa

B.1.1.1 Posa tipo A (Figura B.1.1.1)

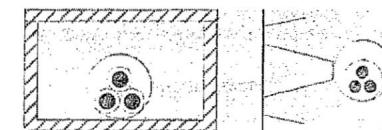


Figura B.1.1.1

- Cavi uni-multipolari in condotti in parete isolante.
- Cavi uni-multipolari in parete isolante.
- Cavi multipolari direttamente in parete isolante.
- Conduttori in tubo in cunicolo chiuso.

B.1.1.2 Posa tipo B (Figura B.1.1.2)



Figura B.1.1.2

- Conduttori isolati in condotti (tubi, canalette aperte, cunicoli ventilati) a parete o sotto intonaco.
- Cavi uni-multipolari in tubo sottointonaco.

B.1.1.3 Posa tipo C (Figura B.1.1.3)

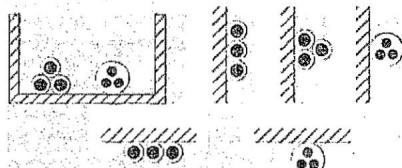


Figura B.1.1.3

- Cavi uni-multipolari posati su parete.
- Cavi uni-multipolari direttamente sotto intonaco.
- Conduttori in tubo in cunicoli aperti o ventilati.

B.1.1.4 Posa tipo D (Figura B.1.1.4)



Figura B.1.1.4

- Cavi uni-multipolari in condotti interrati
- Cavi uni-multipolari direttamente nel suolo

B.1.1.5 Posa tipo E (Figura B.1.1.5)

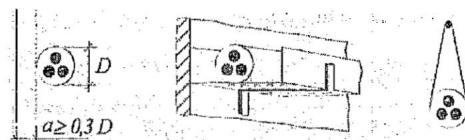


Figura B.1.1.5

- Cavi multipolari in aria libera: su passerelle, perforate e non perforate, mensole o sospesi a funi portanti

B.1.1.6 Posa tipo F (Figura B.1.1.6)

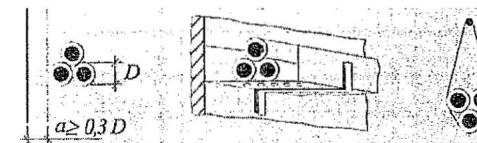


Figura B.1.1.6

- Cavi unipolari disposti a trifoglio in aria libera, posa ravvicinata: su passerelle perorate e non perorate, mensole o sospesi a funi portanti

B.1.1.7 Posa tipo G (Figura B.1.1.7)

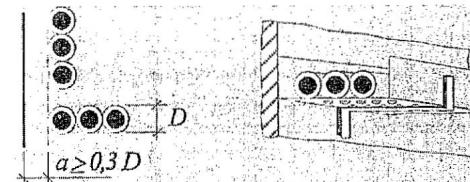


Figura B.1.1.7

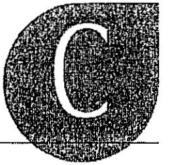
- Cavi unipolari disposti su un piano in aria libera, posa ravvicinata: su passerelle perorate e non perorate, mensole o sospesi a funi portanti

Isolamento in PVC ($T_{lim} 70^{\circ}\text{C}$)								Isolamento in XLPE ($T_{lim} 90^{\circ}\text{C}$)							
Sezione (mm ²)	Posa A	Posa B	Posa C	Posa D	Posa E	Posa F	Posa G	Posa A	Posa B	Posa C	Posa D	Posa E	Posa F	Posa G	
1,5	13	15,5	17,5	18	18,5	--	--	17	20	22	22	23	--	--	
2,5	18	21	24	24	25	--	--	23	27	30	29	32	--	--	
4	24	28	32	31	34	--	--	31	37	40	37	42	--	--	
6	31	36	41	39	43	--	--	40	48	52	46	54	--	--	
10	42	50	57	52	60	--	--	54	66	71	61	75	--	--	
16	56	68	76	67	80	--	--	73	89	96	79	100	--	--	
25	73	89	96	86	101	110	114	95	117	119	101	127	135	141	
35	89	111	119	103	126	137	143	117	144	147	122	157	169	176	
50	108	134	144	122	153	167	174	141	175	179	144	192	207	215	
70	136	171	184	151	196	216	225	179	222	229	178	246	268	279	
95	164	207	223	179	238	264	275	216	262	278	211	298	328	341	
120	188	239	259	203	276	307	320	249	312	322	240	346	382	399	
150	216	--	294	230	319	356	371	285	--	371	271	399	443	462	
185	248	--	341	257	364	407	426	324	--	424	304	456	509	531	
240	286	--	403	297	430	482	504	380	--	500	351	538	604	631	
300	328	--	464	336	497	556	582	435	--	576	396	620	699	731	

Tabella B.1.1 Portate di corrente [A] per cavi trifase in rame
(Temperatura ambiente per posa in aria 30 °C) (Temperatura ambiente per posa interrata 20 °C).

Isolamento in PVC ($T_{lim} 70^{\circ}\text{C}$)								Isolamento in XLPE ($T_{lim} 90^{\circ}\text{C}$)							
Sezione (mm ²)	Posa A	Posa B	Posa C	Posa D	Posa E	Posa F	Posa G	Posa A	Posa B	Posa C	Posa D	Posa E	Posa F	Posa G	
1,5	10	12	13,5	14	14	--	--	14	16	17,5	16,5	17,5	--	--	
2,5	14	16,5	19	19	19,5	--	--	19	22	24	22	24	--	--	
4	19	22	25	24	26	--	--	25	29	32	29	32	--	--	
6	24	28	32	30	33	--	--	32	38	41	36	42	--	--	
10	32	39	44	40	45	--	--	43	52	57	47	58	--	--	
16	43	53	59	52	61	--	--	58	71	76	61	77	--	--	
25	57	69	73	66	78	84	87	76	93	90	68	97	103	107	
35	70	86	91	80	96	105	109	94	116	112	94	120	129	135	
50	84	105	110	94	117	128	133	113	140	136	112	147	159	165	
70	107	133	140	117	150	166	173	142	179	174	138	187	209	215	
95	129	161	170	138	182	203	212	171	216	211	164	227	253	264	
120	149	186	197	157	212	237	247	197	250	245	186	263	296	308	
150	170	--	227	178	245	274	287	226	--	283	210	302	343	358	
185	194	--	259	200	280	315	330	256	--	323	236	346	395	413	
240	227	--	305	230	330	375	392	300	--	382	272	409	471	492	
300	261	--	351	260	384	434	455	345	--	440	308	471	547	571	

Tabella B.1.2 Portate di corrente [A] per cavi trifase in alluminio
(Temperatura ambiente per posa in aria 30 °C) (Temperatura ambiente per posa interrata 20 °C).



NORMATIVA ELETTRICA

La progettazione, costruzione e conduzione dei dispositivi elettrici (macchine, apparecchiature, componenti) e degli impianti elettrici devono avvenire in conformità a specifiche disposizioni normative sia giuridiche che tecniche.

In Italia le prime sono costituite da leggi e decreti della Repubblica e la loro mancata osservanza può comportare sanzioni, anche di tipo penale, nei confronti di progettisti, costruttori e conduttori.

Le seconde, assai più dettagliate delle prime, precisano i criteri che rendono affidabili e non pericolosi i sistemi elettrici. Esistono diversi tipi di norme tecniche, con diversi ambiti territoriali. In Italia le norme di maggiore importanza sono stabilite dal *Comitato Elettrotecnico Italiano*. Norme analoghe sono in vigore nelle altre nazioni; queste norme tecniche nazionali in gran parte si riconducono alle norme di specifici comitati internazionali (EN, IEC, UNI, ISO, CENELEC, ecc.) ai quali aderiscono i diversi comitati nazionali.

Le norme tecniche hanno, almeno in linea di principio, carattere di direttiva, non impositivo; di fatto invece la rispondenza risulta obbligatoria.

C.1 NORME GIURIDICHE

Tra le disposizioni stabilite in materia elettrica dalla normativa giuridica, hanno particolare rilevanza le seguenti: art. 437 del Codice Penale, Legge n. 186 del 1.3.68, D.M. n. 37 del 22.1.08, D.Leg. n. 81 del 9.4.08 e n. 106 del 3.8.09 e i relativi regolamenti di attuazione¹. In particolare esse impongono quanto segue.

I) Codice Penale

art. 437:

"Chiunque omette di collocare impianti, apparecchi o segnali destinati a prevenire disastri o infortuni sul lavoro, ovvero li rimuove o danneggia, è punito con la reclusione da sei mesi a cinque anni; se dal fatto deriva un disastro o infortunio, la pena è della reclusione da tre a dieci anni".

¹ Le norme giuridiche sono reperibili presso le librerie legali.

II) Legge n. 186 del 1.3.68: "Disposizioni concernenti la produzione di materiali, apparecchiature, macchinari, installazioni e impianti elettrici ed elettronici"

art. 1:

"Tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere realizzati e costruiti a regola d'arte".

art. 2:

"I materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici realizzati secondo le norme del comitato elettrotecnico italiano (CEI, n.d.r.) si considerano costruiti a regola d'arte".

III) D.M. n. 37 del 22.1.08: "Regolamento concernente l'attuazione dell'articolo 11-quaterdecies, comma 13, lettera a) della legge n. 248 del 2 dicembre 2005, recante riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici"

art. 1, ambito di applicazione:

"1. Il presente decreto si applica agli impianti posti al servizio degli edifici, indipendentemente dalla destinazione d'uso, collocati all'interno degli stessi o delle relative pertinenze. Se l'impianto è connesso a reti di distribuzione si applica a partire dal punto di consegna della fornitura."

"2. Gli impianti di cui al comma 1 sono classificati come segue: a) impianti di produzione, trasformazione, trasporto, distribuzione, utilizzazione dell'energia elettrica, impianti di protezione contro le scariche atmosferiche, nonché gli impianti per l'automazione di porte, cancelli e barriere; b) impianti radiotelevisivi, le antenne e gli impianti elettronici in genere; c) impianti di riscaldamento, di climatizzazione, di condizionamento e di refrigerazione di qualsiasi natura o specie, comprese le opere di evacuazione dei prodotti della combustione e delle condense, e di ventilazione ed aerazione dei locali; d) impianti idrici e sanitari di qualsiasi natura o specie; e) impianti per la distribuzione e l'utilizzazione di gas di qualsiasi tipo, comprese le opere di evacuazione dei prodotti della combustione e ventilazione ed aerazione dei locali; f) impianti di sollevamento di persone o di cose per mezzo di ascensori, di montacarichi, di scale mobili e simili; g) impianti di protezione antincendio."

...omissis

art. 3, imprese abilitate:

"1. Le imprese, iscritte nel registro delle imprese di cui al decreto del Presidente della Repubblica 7 dicembre 1995, n. 581 e successive modificazioni, di seguito registro delle imprese, o nell'Albo provinciale delle imprese artigiane di cui alla legge 8 agosto 1985, n. 443, di seguito albo delle imprese artigiane, sono abilitate all'esercizio delle attività di cui all'articolo 1, se l'imprenditore individuale o il legale rappresentante ovvero il responsabile tecnico da essi preposto con atto formale, è in possesso dei requisiti professionali di cui all'articolo 4.

2. Il responsabile tecnico di cui al comma 1 svolge tale funzione per una sola impresa e la qualifica è incompatibile con ogni altra attività continuativa."

...omissis

art. 4, requisiti tecnico-professionali:

"1. I requisiti tecnico-professionali sono, in alternativa, uno dei seguenti: a) diploma di Laurea in materia tecnica specifica conseguito presso una università statale o legalmente riconosciuta; b) diploma o qualifica conseguita al termine di scuola secondaria del secondo ciclo con specializzazione relativa al settore delle attività di cui all'articolo 1, presso un istituto statale o legalmente riconosciuto, seguito da un periodo di inserimento, di almeno due anni continuativi, alle dirette dipendenze di una impresa del settore. Il periodo di inserimento per le attività di cui all'articolo 1, comma 2, lettera d) è di un anno; c) titolo o attestato conseguito ai sensi della legislazione vigente in materia di formazione professionale, previo un periodo di inserimento, di almeno quattro anni consecutivi, alle dirette dipendenze di una impresa del settore. Il periodo di inserimento per le attività di cui all'articolo 1, comma 2, lettera d) è di due anni; d) prestazione lavorativa svolta, alle dirette dipendenze di una impresa abilitata nel ramo di attività cui si riferisce la prestazione dell'operaio installatore per un periodo non inferiore a tre anni, escluso quello computato ai fini dell'apprendistato e quello svolto come operaio qualificato, in qualità di operaio installatore con qualifica di specializzato nelle attività di installazione, di trasformazione, di ampliamento e di manutenzione degli impianti di cui all'articolo 1.

"2. I periodi di inserimento di cui alle lettere b) e c) e le prestazioni lavorative di cui alla lettera d) del comma 1 possono svolgersi anche in forma di collaborazione tecnica continuativa nell'ambito dell'impresa da parte del titolare, dei soci e dei collaboratori familiari. Si considerano, altresì, in possesso dei requisiti tecnico-professionali ai sensi dell'articolo 4 il titolare dell'impresa, i soci ed i collaboratori familiari che hanno svolto attività di collaborazione tecnica continuativa nell'ambito di imprese abilitate del settore per un periodo non inferiore a sei anni. Per le attività di cui alla lettera d) dell'articolo 1, comma 2, tale periodo non può essere inferiore a quattro anni."

art. 5, progettazione degli impianti:

"1. Per l'installazione, la trasformazione e l'ampliamento degli impianti di cui all'articolo 1, comma 2, lettere a), b), c), d), e), g), è redatto un progetto. Fatta salva l'osservanza delle normative più rigorose in materia di progettazione, nei casi indicati al comma 2, il progetto è redatto da un professionista iscritto negli albi professionali secondo la specifica competenza tecnica richiesta mentre, negli altri casi, il progetto, come specificato all'articolo 7, comma 2, è redatto, in alternativa, dal responsabile tecnico dell'impresa installatrice.

"2. Il progetto per l'installazione, trasformazione e ampliamento, è redatto da un professionista iscritto agli albi professionali secondo le specifiche competenze tecniche richieste, nei seguenti casi: a) impianti di cui all'articolo 1, comma 2, lettera a), per tutte le utenze condominiali e per utenze domestiche di singole unità abitative aventi potenza impegnata superiore a 6 kW o per utenze domestiche di singole unità abitative di superficie superiore a 400 mq; b) impianti elettrici realizzati con lampade fluorescenti a catodo freddo, collegati ad impianti elettrici,

...omissis

IV) D.lgs. n. 81 del 9.4.08: "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro- (Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108) Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L)

V) D.M. 20.11.08: "Riconoscimento dell'efficacia, ai fini della sicurezza, dell'isolamento speciale completo di cui devono essere dotati gli utensili e gli apparecchi elettrici mobili senza collegamento a terra"

Questo decreto precisa che i prototipi di tali apparecchi, ai fini della sicurezza dell'utilizzo, devono essere collaudati e certificati ad opera dell'*Istituto Italiano del Marchio di Qualità (IMQ)*, o di istituto equivalente nazionale o estero; i singoli apparecchi devono recare il simbolo relativo.

Obiettivo fondamentale del legislatore è impedire che i sistemi elettrici rechino danno alle persone e alle cose. Peraltro queste disposizioni sono insufficienti a coprire tutti gli aspetti dei sistemi elettrici. Per questo motivo la Legge indicata al punto II) stabilisce un criterio preciso ed esaustivo: è sufficiente applicare le Norme del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). Da un punto di vista teorico non è proibito disattendere tali norme: basta realizzare "a regola d'arte"; tuttavia può essere difficile dimostrare che sia a regola d'arte un'impianto o un'apparecchiatura non conformi alle norme CEI. In altre parole così operando si incorre nei seguenti rischi:

- in sede di collaudo le autorità preposte possono negare l'approvazione, impedendo in tal modo la messa in servizio;
- in caso di vertenza giuridica possono essere comminate sanzioni penali e civili;
- le compagnie assicurative possono sospendere le loro garanzie.

Oltre a ciò, il funzionamento di macchine e impianti non a norma può risultare precario o impossibile.

Sempre nello spirito di garantire la sicurezza degli impianti elettrici, il D.M. 37/08, imponendo la redazione del progetto ad opera di professionisti competenti e l'esecuzione ad opera di imprese abilitate che ne certificano la conformità alle norme, ha inteso sottrarre queste realizzazioni all'improvvisazione e all'incompetenza che sono le principali cause degli infortuni elettrici, spesso mortali.

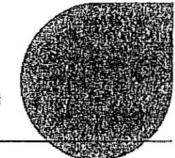
In base al regolamento di attuazione, sono esenti dall'obbligo del progetto solo utenze di potenza modesta in unità immobiliari di limitata superficie. Anche questa legge indica che il rispetto delle Norme CEI costituisce condizione sufficiente per un'esecuzione a regola d'arte.

C.2 NORME CEI

La norme del Comitato Elettrotecnico Italiano (Norme CEI) sono in costante aggiornamento, per adattarsi continuamente non solo agli sviluppi tecnologici ma anche all'evoluzione del concetto di sicurezza. Sono costituite da un vasto numero di fascicoli che coprono estesamente l'intera materia elettrica; alcune norme sono

già state citate in nota nei precedenti capitoli. Informazioni più dettagliate sono reperibili nel sito del CEI: <https://www.ceinorme.it/it/>.

Indice analitico



A

Aerogeneratore 161; 162
Albero 68
Alternatore 75; 92
Amperometro 196; 201
Ampiezza della ondulazione 48
Anello:
di guasto 170; 212
Angolo:
di cortocircuito 19
elettrico 55; 85; 124
Anodo 41; 45
Arco elettrico 172
Asse:
interpolare 80
polare 80
Autogenerazione 115
Autotrasformatore 37
Avvolgimento:
chiuso 69
di eccitazione 77
Azionamento:
a velocità costante 122
a velocità variabile 122
elettrico 119

B

Base 42
BJT 42
Blindosbarra 216
Bobina di eccitazione 64; 71; 79; 125
Brushless 77; 125; 126; 154

C

Cabina:
di trasformazione 200
primaria 165
secondaria 165
Caduta di tensione 23; 142
attiva 146
in linea 142
reattiva 146
Camera di interruzione 171
Campo geotermico 161
Canalina 216
Capacità trasversale 138
Caratteristica:
a vuoto 84
di eccitazione 84
di intervento 178; 179; 180; 184
di traferro 83
esterna 42
meccanica 110; 115; 120
Carcassa 68
Catodo 41; 45
Cava 71; 97; 118
Cavedio 216
CEI 134
Centrale:
a combustibile fossile 159
a serbatoio 159
ad acqua fluente 159
di pompaggio 159
elettronucleare 160
eolica 153; 161
geotermica 161
idroelettrica 157; 158; 159

mareomotrice 161
 solare 162
 Chopper 39; 61
 Circuito elettrico terminale 199
 Cogenerazione 153
 Collegamento:
 di testata 71
 a stella 33
 a triangolo 33
 a zig-zag 31
 Collettore 42; 63; 190
 di terra 190
 Comitato Elettrotecnico Italiano 227
 Commutazione 46; 51; 55
 Condensatore rotante 93
 Conduttanza trasversale 138
 Conduttore:
 di indotto 78
 di protezione 190; 195
 equipotenziale 190
 Contatto:
 diretto 206
 indiretto 193; 206
 strisciante 71
 Contatore 165; 199; 200
 Continuità del servizio 162; 215
 Conversione:
 a.c./d.c. 47
 d.c./a.c. 56
 Convertitore statico 39; 154
 Coppia:
 elettromeccanica 63; 105
 nominale all'albero 78; 98
 polare 84
 Corrente:
 a vuoto 11; 16; 100
 di cortocircuito 170; 177
 di cortocircuito a primario 16
 di cortocircuito a secondario 16
 di eccitazione 63; 64
 di guasto 186; 195; 201; 209; 210;
 212; 214
 di holding 46
 di indotto 63; 84; 100
 di latching 46
 di rilascio 204

di spunto 112
 di terra 190; 192; 193; 196
 magnetizzante 9
 nominale 174; 183
 nominale di indotto 78
 pericolosa 204
 secondaria riportata a primario
 10

D

Diagramma:
 circolare 105
 di Kapp 23
 Dinamo 77
 Diodo:
 a semiconduttore 40
 ideale 40
 Dispersore 190; 194
 Doppia gabbia 97
 Drogaggio 40
 Duty Cycle 62

E

Eccitazione 40; 63; 64; 69; 71; 72;
 77; 78; 79; 80; 83; 84; 86; 88; 89;
 91; 92; 125; 128; 182
 Effetto pelle 148
 Elettrodotto 134
 Emettitore 42
 Esafluoruro di zolfo 166; 175

F

F.e.m.:
 di indotto 81; 83
 F.m.m. di eccitazione 79; 80
 Fase interna 31
 Fattore:
 di avvolgimento 99
 di intermittenza 62
 di ondulazione 48
 di potenza in cortocircuito 19;

Filtraggio 56
 Flessibilità 215
 Flusso:
 di dispersione 12; 85
 polare 81
 Frequenza:
 industriale 99; 137; 148; 156;
 172; 203; 204; 205
 nominale 2; 3; 78; 98
 Fune di guardia 134
 Funzionamento:
 a mezzo passo 128; 129; 130
 a passo intero 128
 in quattro quadranti 120; 121
 Fusibile 184; 185

G

Gabbia di scoiattolo 96; 97; 100
 Generatore:
 asincrono 114
 in continua 129
 sincrono 93; 127; 163
 Giogo 3; 4; 179
 Giunzione 42
 Grandezza di comando 178; 179; 181
 Grande utenza industriale 215
 Gruppo:
 di collegamento 32
 di commutazione 51
 Guasto:
 fase-fase 214
 fase-terra 209; 210

H

HVDC (high voltage direct current)
 167

I

IGBT 44
 Impedenza:
 a vuoto 21; 22; 100
 a vuoto a primario 15
 di cortocircuito 17

M

di cortocircuito a secondario 17
 di linea 139
 in cortocircuito 17
 Impianto:
 di terra 189; 190; 194
 utilizzatore 199
 IMQ 230
 Indotto 63; 68; 71; 78; 84; 85; 96;
 100
 Induttanza:
 di dispersione 12; 112
 longitudinale 138
 Induttore 63; 68; 69; 70; 71; 78; 79
 Infortunio elettrico 203
 Interblocco 177
 Interruttore:
 a semiconduttore 183
 automatico 181; 199; 201; 202;
 207
 di potenza 171; 173; 175
 differenziale 182; 207
 elettronico 46
 magnetotermico 183; 185
 Interruzione della corrente 171;
 172; 173
 Invertitore 39; 56; 58
 Isolatore 134; 186
 Istituto del Marchio di Qualità 230

L

Lacuna 41
 Linea:
 a sbalzo 141
 ad anello 141
 aerea 146
 alimentata alle due estremità 141
 bifilare 137; 139
 elettrica 133; 148
 in cavo 134; 136; 139; 146; 221

M

Macchina:
 eccitatrice 87

a collettore 63
elettrica rotante 63
Massa 193
Matassa di indotto 81
Messa a terra 189; 207
Misura della resistenza di terra 196
Modello:
 a parametri distribuiti 137
 ridotto monofase 140
Modulazione di ampiezza 60
Motore:
 a condensatore 117
 a magneti permanenti 129
 a passo (stepping motor) 128
 a poli schermati 117
 a riluttanza variabile 130
 asincrono monofase 115
 asincrono o ad induzione 100; 111; 124
 brushless 125
 sincrono 75; 124
 sincrono a riluttanza variabile 127; 128
 switched reluctance 131

N

Nodo principale di terra 190
Nucleo:
 a colonne 3
 a mantello o corazzato 3; 30
 ferromagnetico 30
 polare 71

O

Oscillazione pendolare 91

P

Parallelo di trasformatori:
 monofase 26
 trifase 36

Passo
 polare 80; 98
Passo-a-passo 128
Perdite:
 nel ferro 15; 24; 35; 108
 nel rame 17; 24; 28; 35
Piccola utenza 154; 165
Polo:
 saliente 71; 77; 79
 schermato 117
Ponte di Graetz 50; 52
Portata
 del cavo 146
Potenza nominale 2; 79; 98
Potere nominale di interruzione 174
Presa a spina 199
Primario 1
Prova:
 a vuoto 20
 in cortocircuito 20
PWM (pulse width modulation) 61

Q

Quadro elettrico 199

R

Raddrizzamento 47
Raddrizzatore 39; 47; 51
 controllato 47; 54
Rapporto:
 di trasformazione 7; 10
 di trasformazione del motore 100
Reattanza:
 chilometrica 139
 di dispersione a primario 12
 di dispersione a secondario 12
 in cortocircuito a primario 17
 in cortocircuito a secondario 17
 longitudinale 139; 140
 sincrona 84
Reazione di indotto 84; 85
Regolazione tensione/frequenza 114
Relè 178

differenziale 179
elettromagnetico 179
termico 180
Rendimento 24; 73; 87; 105; 109
di trasmissione 148
nominale 25
Reostato di avviamento 97; 112
Resistenza:
 di terra 192; 196
 in cortocircuito a primario 17
 in cortocircuito a secondario 17
 longitudinale 138; 140
Rete di distribuzione interna 199;
215
Rotore 63; 77; 96; 99; 100
 a gabbia di scoiattolo 96; 97
 avvolto 96

S

Salvavita 182
Sbarra 97
Scaricatore 188
Scarpa polare 79
Schema:
 equivалente a primario 102
 unifilare 141; 154
Scoria radioattiva 160
Scorrimento 100; 101; 109
 nominale 105
SCR 45
Scudo di estremità 68
Secondario 1; 3
Selettività della protezione 203
Semipasso polare 69
Semiretta:
 delle coppie 108; 110
 delle potenze 109
Servizio:
 di base 161
 di punta 159
Sezionatore 176; 177; 178; 200; 201
 sotto carico 176
Sincronismo 101
Sistema:
 elettrico nazionale 153

IT 213
TN 211
TT 208
Soffiatura 174
Soglia media di pericolosità 204
Sovracorrente 170
Sovratensione 171; 189
Spazzola 63; 71
Statore 63; 67; 78; 81; 95
Stazione 165
Strumenti di misura 200

T

TA 200
Teleriscaldamento 160
Tensione:
 concatenata nominale 78; 98
 concatenata nominale dei componimenti a semiconduttore 78; 98
 d'arco 172
 di contatto 193
 di cortocircuito percentuali 18
 di eccitazione 78
 di passo 193
 di ripresa 172
 nominale del trasformatore 25; 36
 nominale di indotto 78
 primaria di cortocircuito 18
 secondaria di cortocircuito 18
 totale di terra 192
Tiristor 45
Traferro 63; 79; 80; 115
Transistor bipolare a giunzione 42
Trasferimento di impedenza 8; 16
Trasformatore:
 di corrente 200
 di potenza 3; 154
 di tensione 200
 ideale 7
 monofase 3
 trifase 29
Trazione elettrica 135; 168
Triangolo di cortocircuito 18; 19

Turbina:
a gas 160
a vapore 159
Francis 159
Kaplan 159
Pelton 159
Turboalternatore 157
TV 200

Velocità:
angolare del rotore 64; 68
angolare del campo rotante 64;
67; 68
di sincronismo 91; 92; 99; 101;
103; 110; 111; 114; 116
nominale di rotazione 78; 98
Voltmetro 165; 196

U

Utenza 190

W

Wattmetro 178; 200

V

Valore di soglia 178
Variac 38

Z

Zig-zag 31

Finito di stampare
nel Settembre 2018
da Ge.Graf - Bertinoro (FC)