

A09

A mia moglie Angela con infinito amore  
E. Chiricozzi

Ai miei cari Maria Grazia e Nicola  
A. Ometto

Enzo Chiricozzi  
Antonio Ometto

# Macchine elettriche





Aracne editrice

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

Copyright © MMXVII  
Giacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

[www.giacchinoonoratieditore.it](http://www.giacchinoonoratieditore.it)  
[info@giacchinoonoratieditore.it](mailto:info@giacchinoonoratieditore.it)

via Vittorio Veneto, 20  
00020 Canterano (RM)  
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-0677-8

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: ottobre 2017

# Indice

- 7 *Prefazione*
- 11 **Capitolo I**  
*Introduzione alle macchine elettriche*
- 41 **Capitolo II**  
*Fondamenti di elettromagnetismo*
- 91 **Capitolo III**  
*Principi di conversione elettromeccanica*
- 111 **Capitolo IV**  
*Il trasformatore monofase*
- 207 **Capitolo V**  
*Il trasformatore trifase*
- 209 **Capitolo VI**  
*I trasformatori speciali*
- 323 **Capitolo VII**  
*Il campo magnetico nelle macchine rotanti*
- 417 **Capitolo VIII**  
*Avvolgimenti distribuiti reali*
- 457 **Capitolo IX**  
*La macchina asincrona trifase*

6	<i>Indice</i>
633	Capitolo X <i>La macchina asincrona monofase</i>
659	Capitolo XI <i>La macchina sincrona</i>
811	Capitolo XII <i>Le macchine a collettore</i>
965	<i>Bibliografia</i>

## Prefazione

Tradizionalmente lo studio della teoria, del funzionamento e del progetto delle macchine elettriche rappresenta una parte importante del curriculum di un ingegnere elettrico. Oggi, stante il rapido sviluppo della tecnologia elettrica e la crescente domanda, da parte della società, di energia elettrica, lo studio delle macchine elettriche è ancor più importante. Ciò risulta evidente se si comprende che le macchine elettriche sono, escludendo quelle statiche, dispositivi di collegamento tra l'energia elettrica e l'energia meccanica, ovvero convertitori elettromeccanici dell'energia.

Le macchine elettriche sono presenti ovunque nell'ambiente di vita moderna. Il numero di motori elettrici, ad esempio, in una casa americana oscilla in media da un minimo di dieci e può facilmente superare i cinquanta; essi provvedono a far funzionare i frigoriferi, i congelatori, gli aspirapolvere, i frullatori, i condizionatori, i ventilatori, le lavatrici, le lavastoviglie e molti altri elettrodomestici. In un'automobile ce ne sono almeno una decina e questo numero è destinato ad aumentare considerevolmente. In un aereo ce ne sono molti di più, così come nei sistemi aerospaziali. Molti mezzi di trasporto oggi usano la propulsione di tipo elettrico, come le scale mobili, gli elevatori, le auto elettriche, i treni, le navi, ecc.

Perché le macchine elettriche sono così diffuse? La risposta è molto semplice. L'energia elettrica è una forma di energia pulita ed efficiente che può essere utilizzata anche in luoghi distanti da dove viene generata. Inoltre lo sviluppo di nuove tecnologie elettriche ed elettroniche e di nuovi materiali stanno cambiando drasticamente lo stato dell'arte della progettazione e costruzione dei sistemi elettromeccanici. Accanto alle macchine elettriche convenzionali, riproposte con nuovi metodi di progettazione per ottenere sempre più consistenti risparmi energetici e per ridurre l'inquinamento dell'ambiente, si sono sviluppate nuove configurazioni di macchine elettriche insieme a sofisticati sistemi di controllo. Molte delle più recenti applicazioni hanno comportato il semplice rifacimento di un nuovo look per alcuni tipi di macchine elettriche convenzionali come ad esempio una più accurata riprogettazione oppure la scelta di una idonea alimentazione tramite convertitore, come nel caso del motore asincrono a doppia gabbia alimentato tramite inverter a transistor per ren-

dere economicamente competitiva l'auto elettrica. Altre applicazioni comportano il progetto di macchine elettriche con configurazioni completamente nuove, come ad esempio i motori a flusso assiale o i motori di tipo brushless utilizzati in applicazioni industriali, aerospaziali, nell'industria automobilistica e nella robotica.

Il controllo elettronico della macchina elettrica è stato applicato fin dall'alba dell'era elettronica. Tuttavia con l'avvento e, oggi, con il rapido sviluppo dei componenti allo stato solido, dei circuiti integrati e dei processori, la scelta, la qualità e la precisione del sistema di controllo sono diventate praticamente illimitate. L'integrazione dei sistemi elettromeccanici e dei circuiti elettronici è appena iniziata e prospetta sviluppi entusiasmanti e molto interessanti in molteplici applicazioni. Recentemente le macchine elettriche rotanti e altri sistemi elettromeccanici, integrati con i relativi sistemi di controllo, sono stati sviluppati per particolari ambienti, includendo quelli in presenza di vari tipi di radiazioni nucleari, in impianti di generazione termonucleare e per molti veicoli spaziali. Infine, dato che nuove sorgenti di energia sono più facilmente ed economicamente accessibili, i convertitori elettromeccanici di energia dovranno possedere caratteristiche opportune per adattarsi alle nuove sorgenti di energia quali i sistemi di conversione fotovoltaica, eolica, ad idrogeno, ecc.

Nel volume sono trattati tutti gli aspetti più importanti delle macchine elettriche, e l'intenzione degli autori è stata quella di evidenziarne i principi fisici di funzionamento, sintetizzati attraverso i modelli matematici e le reti equivalenti.

In particolare, si è preferito dedurre i modelli delle macchine a regime permanente, utilizzati per determinare le caratteristiche statiche di funzionamento, a partire da quelli dinamici, che meglio evidenziano il processo di analisi e di sintesi. Tale scelta è dettata da diverse motivazioni:

- la difficoltà di inserire due corsi di macchine elettriche, uno di base per il regime permanente e uno avanzato per la dinamica, nei moderni corsi di laurea;
- la convinzione degli autori che non è possibile spiegare, e quindi comprendere, neanche il funzionamento a regime permanente tramite strumenti matematici non adeguati (calcolo con i fasori), a meno di non introdurre “vuoti concettuali” non più colmabili;
- la volontà di gettare delle solide basi per facilitare l'apprendimento di concetti di altri corsi come, ad esempio, quelli che trattano il controllo vettoriale delle macchine elettriche.

È stato quindi necessario utilizzare la *teoria dei vettori di spazio* per determinare i modelli dinamici e soltanto a regime permanente si è potuto passare al calcolo con i fasori, come caso particolare.

In conclusione, lo scopo principale, che gli autori si sono prefissi di raggiungere, è quello di fornire agli studenti dei Corsi della Classe di Laurea in Ingegneria Industriale un moderno approccio e una guida esauriente per la comprensione dei concetti e dei principi fondamentali che presiedono al funzionamento delle macchine elettriche.

Il volume è stato così organizzato: I primi tre capitoli sono dedicati ai materiali impiegati nella costruzione delle macchine elettriche e ai fenomeni termici (cap.1), ai fondamenti di elettromagnetismo (cap.2), ai principi di conversione elettromeccanica dell'energia (cap.3).

I successivi tre capitoli sono dedicati ai trasformatori monofase (cap.4), trifase (cap.5) e speciali (cap.6). Per ciascun tipo sono dati cenni costruttivi, definiti i modelli matematici dinamici, a regime permanente e dedotte le corrispondenti reti equivalenti.

Il cap.7 è dedicato alla teoria del campo magnetico rotante in termini di vettori di spazio e alla relativa modellistica nel dominio del tempo e a regime permanente.

Nel cap.8 sono descritti i principali tipi di avvolgimenti reali e definite le loro principali caratteristiche.

Nei capitoli 9, 10, 11 e 12 è svolta la teoria delle varie tipologie di macchine elettriche e per ciascuna delle quali sono riportati cenni costruttivi, dedotti modelli matematici dinamici e a regime permanente e le rispettive reti equivalenti. In particolare i cap. 9 e 10 sono dedicati rispettivamente alle macchine asincrone trifase e monofase; il cap.11 è dedicato alle macchine sincrone trifase e il cap. 12 alle macchine a collettore a c.c. e a c.a.

Infine si fa presente al lettore che può non soffermarsi sulle parti indicate con un asterisco in quanto non strettamente necessarie per analizzare e comprendere il funzionamento delle macchine elettriche.

Enzo Chiricozzi  
Antonio Ometto

Così rispose Galileo Ferraris a una giovane curiosa che desiderava avere qualche informazione sulla “elettricità”, che all’epoca (verso la fine del XIX secolo) destava tra la gente comune un grande interesse (la lettera autografa è attualmente custodita presso la sezione di Trieste dell’Associazione Elettrica ed Elettronica Italiana):

*Poiché Maxwell dimostrò che le vibrazioni luminose possono consistere in periodiche variazioni delle forze elettro-magnetiche e poiché Hertz, provando col fatto che le oscillazioni elettro-magnetiche si propagano come la luce, diede alla teoria di Maxwell una base sperimentale, si andò assodando l’idea che l’etere luminifero ed il mezzo ove hanno sede le forze elettriche e magnetiche siano una stessa cosa.*

*Perciò a te, fanciulla colta e gentile, che amabilmente mi domandi che cosa sia l’elettricità, posso rispondere: essa non è soltanto l’agente pauroso, che rompendo talora la compagine dell’atmosfera ti sgomenta col fragore della folgore, ma è eziandio l’agente vivificatore che tramanda dal sole alla terra colla luce e col calore la magia dei colori e l’alito della vita, quello che partecipa al tuo cuore il palpito del mondo esterno, quello che sa trasmettere all’anima tua l’incanto di uno sguardo e di un sorriso.*

Galileo Ferraris

## Introduzione alle macchine elettriche

I sistemi fisici in cui avvengono trasformazioni di energia da una forma ad un'altra prendono il nome di macchine. Le macchine elettriche sono quelle in cui almeno una delle forme di energia, assorbita o resa, è di natura elettrica.

Il processo di trasformazione di energia comporta sempre fenomeni dissipativi che, trasformando parte dell'energia assorbita in calore, determinano un riscaldamento della macchina stessa. Nelle macchine elettriche i fenomeni dissipativi, che hanno luogo principalmente nei materiali attivi (magnetici e conduttori), determinano due effetti negativi.

Oltre all'ovvia incidenza che hanno sul valore del rendimento, essi limitano il valore della potenza erogata dalla macchina in rapporto alle sue caratteristiche costruttive e dimensionali. All'aumentare della potenza erogata, infatti, aumenta la potenza dissipata e, di conseguenza, il riscaldamento della macchina stessa. La temperatura di esercizio, non potendo però raggiungere valori dannosi per i materiali isolanti che costituiscono la parte più delicata della macchina, determina un limite della potenza dissipata e, quindi, della potenza erogata.

A questo riguardo ciascuna macchina elettrica viene caratterizzata precisando la sua potenza nominale, ovvero la potenza massima che la macchina può erogare in relazione al tipo di servizio, senza superare in nessuna parte i limiti di temperatura ammessi dalle Norme C.E.I. (*Comitato Elettrotecnico Italiano*) per i materiali isolanti.

### 1.1 Definizione e classificazione

Una macchina è un sistema costituito da un insieme di componenti o elementi riuniti in un dispositivo unico allo scopo di operare una trasformazione di energia.

L'energia viene fornita al sistema dall'esterno (energia d'entrata  $E_{in}$ ) e dopo la trasformazione viene restituita di nuovo all'esterno (energia d'uscita  $E_{out}$ ), figura 1.1. La trasformazione di energia che si verifica in una macchina va intesa nel senso più generale, in quanto può aversi un cambiamento di natura dell'energia dall'entrata all'uscita, oppure un cambiamento di caratteristiche dell'energia, pur rimanendo della stessa natura.

Una macchina elettrica è appunto un sistema costituito di componenti magnetici, elettrici e meccanici che opera una trasformazione di energia di altra natura in elettrica o viceversa, oppure energia elettrica di date caratteristiche in energia elettrica di caratteristiche diverse.

Per quanto riguarda una classificazione delle macchine elettriche essa può essere fatta:

1. in base alla trasformazione di energia;
  2. in base al tipo di funzionamento (cioè a come viene realizzata la trasformazione di energia);
  3. in base alla presenza o meno di masse in movimento.
1. *In base alla trasformazione di energia* le macchine elettriche si distinguono in:
- (a) *generatori*;
  - (b) *motori*;
  - (c) *trasformatori*;
  - (d) *macchine convertitrici*.

*I generatori elettrici* sono macchine che trasformano energia di diversa natura in energia elettrica. Le pile primarie o di Volta, le pile secondarie o accumulatori e le



**Figura 1.1.** Trasformazione di energia

pile a combustibile<sup>1</sup> trasformano energia chimica in energia elettrica e sono generatori elettrochimici. I generatori elettromeccanici trasformano energia meccanica in elettrica e possono essere a corrente continua (c.c.) (dinamo) e a corrente alternata (c.a.): generatori sincroni o alternatori, generatori asincroni.

*I motori elettrici* trasformano energia elettrica in energia meccanica e sono sia a c.c. che a c.a.: asincroni, sincroni e a commutazione.

*I trasformatori* sono macchine elettriche che trasformano energia elettrica a c.a. in energia elettrica a c.a. con caratteristiche diverse, ma con la stessa frequenza.

Le *macchine convertitrici*, infine, trasformano energia elettrica con certe caratteristiche, ancora in energia elettrica di caratteristiche diverse, compresa la frequenza.

2. *In base al tipo di funzionamento* le macchine elettriche si distinguono in:

- (a) macchine che si basano sui *fenomeni elettrochimici*;
- (b) macchine che si basano sul principio dell'*induzione elettromagnetica*;
- (c) macchine che si basano su altri fenomeni, per esempio quelli che avvengono nelle giunzioni di elementi semiconduttori (tiristori, transistori, ecc.).

3. *In base alla presenza o meno di masse in movimento* le macchine elettriche possono classificarsi in:

- (a) *macchine statiche*;
- (b) *macchine rotanti e traslanti*.

Alla categoria delle *macchine statiche*, caratterizzate dal fatto che l'energia di entrata e quella di uscita sono entrambe elettriche, appartengono:

- *i trasformatori*, che convertono, mediante l'azione di un campo magnetico, l'energia elettrica a c.a. avente un assegnato livello di tensione e di corrente in energia elettrica della stessa frequenza ma ad altro livello di tensione e di corrente;

1. La pila a combustibile è un sistema elettrochimico nel quale l'energia chimica di sostanze fornite con continuità (metano, idrogeno, ecc.) è trasformata direttamente in energia elettrica a corrente continua a bassa tensione. I rendimenti globali di trasformazione sono dell'ordine del 60-70% e sono sostanzialmente indipendenti dal carico. Sono stati realizzati prototipi di generatori a pile a combustibile di potenza fino a 5 MW per la produzione contemporanea (cogenerazione) di elettricità e di calore per uso civile.

- *i convertitori statici*, che convertono energia elettrica di assegnate caratteristiche (tensione, corrente, frequenza) in energia elettrica con caratteristiche diverse. Negli ultimi trenta anni, lo sviluppo e il miglioramento di una serie di componenti di potenza a semiconduttore utilizzati come interruttori statici - diodi, tiristori (SCR, GTO e MCT), transistor bipolari (BJT), transistor a effetto di campo tradizionali (MOSFET) e bipolari (IGBT) - e dei circuiti elettronici di potenza hanno determinato una rivoluzione nel campo della conversione statica dell'energia e del controllo delle macchine elettriche.

I principali tipi di convertitori statici più frequentemente utilizzati sono:

- *controllore di tensione a c.a. (o convertitore c.a./c.a. a frequenza fissa)*: converte una tensione fissa a c.a. in una tensione variabile a c.a.; può essere usato per controllare la velocità e per l'avviamento di un motore asincrono;
- *raddrizzatore controllato (o convertitore c.a./c.c. controllato)*: converte una tensione fissa a c.a. in una tensione variabile a c.c.; è usato principalmente per controllare la velocità di motori a c.c.;
- *inverter (o convertitore c.c./c.a.)*: converte una tensione fissa a c.c. in una tensione fissa (o variabile) a c.a. con frequenza variabile; è utilizzato per controllare la velocità di motori a c.a.;
- *chopper (o convertitore c.c./c.c.)*: converte una tensione fissa a c.c. in una tensione variabile a c.c.; è utilizzato principalmente per il controllo di velocità dei motori a c.c.;
- *cicloconvertitore (o convertitore c.a./c.a.)*: converte una tensione a c.a. di data ampiezza e frequenza in una tensione a c.a. di ampiezza variabile e di frequenza variabile (più bassa di quella di ingresso).

*Le macchine rotanti*, che trasformano energia elettrica in meccanica, oppure energia meccanica in elettrica, sono costituite da due parti fondamentali: una fissa, detta *statore* e una mobile detta *rotore*.

Nelle macchine tradizionali tanto nello statore che nel rotore sono presenti uno o più avvolgimenti che servono a sostenere il flusso magnetico risultante e a generare la coppia elettromagnetica. Tra il rotore e lo statore c'è uno spazio, detto *traferro*, che consente il movimento del rotore. Alle macchine rotanti appartengono:

- *i generatori a c.c. e a c.a.*;
- *i motori a c.c. e a c.a.*;
- *le macchine convertitrici rotanti*, nelle quali si ha trasformazione di energia elettrica in energia elettrica di caratteristiche diverse. Poiché la conversione dell'energia elettrica avviene attraverso il movimento di una parte della macchina esse possono essere considerate come la compenetrazione di due macchine: un motore, in cui si ha la trasformazione dell'energia elettrica di entrata in energia meccanica, e un generatore, in cui l'energia meccanica è convertita in energia elettrica d'uscita. Quando le due trasformazioni non avvengono nella stessa struttura ma si hanno due macchine meccanicamente accoppiate si parla più propriamente di *gruppi convertitori*.

Le macchine elettriche rotanti con avvolgimenti sul rotore possono essere classificate, in base al tipo di contatto strisciante che permette di accedere a tali avvolgimenti tramite le spazzole, in:

- *macchine con collettore ad anelli* (macchine sincrone e macchine asincrone), nelle quali le correnti degli avvolgimenti hanno la stessa frequenza di quelle esterne (circuito di alimentazione o carico);
- *macchine con collettore a lamelle* (macchine a corrente continua e macchine a collettore a corrente alternata), nelle quali le correnti nei due circuiti, esterno e interno, non hanno la stessa frequenza.

Nelle macchine convertitrici rotanti c.a./c.c. sono presenti entrambi i tipi di contatti striscianti.

In generale, ciascun tipo di macchina elettrica rotante può essere realizzato anche nella versione *lineare*, in cui la struttura mobile, detta normalmente *primario*, può compiere meccanicamente solo un movimento traslante rispetto alla parte fissa, detta normalmente *secondario*. L'analisi delle macchine elettriche lineari è simile, ma più complessa, a quella delle macchine elettriche rotanti, tenendo conto che lo *spostamento lineare* si sostituisce a quello angolare e che la *forza* si sostituisce alla coppia.

Attualmente le macchine elettriche più diffuse sono i trasformatori, i generatori, i motori a c.a. e i convertitori statici. I generatori a c.c. (dinamo) sono ormai poco diffusi in quanto l'energia elettrica a c.c. viene sempre più spesso ottenuta da quella a c.a., tramite convertitori statici controllati. I motori a corrente continua

tendono ad essere sostituiti da motori asincroni alimentati tramite convertitori statici controllati che consentono di variare la frequenza e la tensione; tali convertitori permettono quindi una regolazione continua della coppia e della velocità del motore. Le convertitrici rotanti sono ormai quasi completamente sostituite dai convertitori statici. I motori a corrente alternata a collettore sono ancora usati solo per applicazioni particolari, ad esempio per elettrodomestici. L'impiego più ampiamente noto delle macchine elettriche lineari è quello come motore, soprattutto nel campo della trazione, delle macchine utensili e della robotica.

## 1.2 Materiali impiegati nelle macchine elettriche

I materiali usati nella costruzione delle macchine elettriche basate sul principio dell'induzione elettromagnetica possono essere divisi nelle seguenti tre categorie:

1. *materiali attivi (magnetici e conduttori);*
2. *materiali isolanti;*
3. *materiali di sostegno o di struttura.*

I materiali attivi, magnetici e conduttori, servono per la creazione delle condizioni richieste ai fenomeni elettromagnetici.

La principale funzione dei materiali isolanti è quella di isolare le parti attive fra loro e dalle altre parti della macchina.

I materiali di struttura sono principalmente impiegati per la costruzione delle parti della macchina con caratteristiche strettamente meccaniche: carcasse, sostegni, alberi, cuscinetti, ecc.

Molte parti delle macchine elettriche lavorano in difficili condizioni fisiche, perciò i materiali devono soddisfare diverse esigenze sia di natura magnetica ed elettrica che di natura meccanica; il conseguimento del giusto compromesso tra queste esigenze è uno dei più difficili compiti della scienza dei materiali.

### 1.2.1 Materiali magnetici

Osservazioni sperimentali hanno mostrato che alcuni materiali, quando sono posti in un campo magnetico, reagiscono al campo modificandone l'andamento delle linee di forza. Questo fenomeno è detto *magnetizzazione* e i materiali che lo manifestano

vengono denominati materiali magnetici. Tali materiali sono classificati in: *diamagnetici, paramagnetici e ferromagnetici*<sup>2</sup>. Questi ultimi rivestono maggiore interesse nella costruzione e nel funzionamento delle macchine elettriche e pertanto la nostra attenzione sarà rivolta esclusivamente ad essi.

I materiali ferromagnetici impiegati nella costruzione delle macchine elettriche sono generalmente delle leghe a base di ferro (acciai a cui vengono aggiunte delle sostanze particolari); essi devono avere caratteristiche diverse a seconda che vengano assoggettati a f.m.m. costanti o variabili nel tempo, ma devono comunque sempre offrire una riluttanza magnetica quanto minore possibile, onde richiedere una piccola f.m.m. di eccitazione a parità di flusso. Nel primo caso (f.m.m. costanti) sono utilizzati acciai a basso tenore di carbonio che vengono impiegati nella costruzione degli statori delle macchine a c.c. e dei rotor delle macchine sincrone; tali materiali sono più largamente impiegati sotto forma di fucinati o di laminati. Per quanto riguarda l'acciaio laminato, data la f.m.m. costante e l'assenza quindi delle perdite per correnti parassite, lo spessore delle lamine può essere sensibilmente grande (1 ÷ 2 mm). Si richiede a questi materiali una caratteristica di magnetizzazione piuttosto ripida e quindi una permeabilità apparente  $\mu = B/H$  elevata. Nel secondo caso (f.m.m. variabili nel tempo) sono utilizzati lamierini al silicio di minore spessore al fine di limitare le perdite per correnti parassite.

Le principali caratteristiche e le perdite per isteresi e per correnti parassite dei materiali ferromagnetici sono analizzate nel capitolo 2.

### 1.2.2 Materiali conduttori

Una prima classificazione dei materiali conduttori può essere effettuata in base alla loro natura come riportato nella tabella 1.1.

I materiali conduttori usati nelle macchine elettriche sono il rame elettrolitico, più raramente l'alluminio e, in casi particolari, i bronzi e gli ottoni. Il rame viene impiegato soprattutto per gli avvolgimenti, sotto forma di conduttori di sezione circolare (6 ÷ 10 mm<sup>2</sup>) o rettangolare (> 10 mm<sup>2</sup>), isolato con smalti, vernici, oppure con nastriatura in carta o fibre tessili. Il rame viene inoltre usato per i collettori e gli anelli. Attualmente l'alluminio viene impiegato per gli avvolgimenti a gabbia di scoiattolo dei motori asincroni. Si è anche sviluppato l'impiego di conduttori di alluminio sotto

2. I materiali diamagnetici e paramagnetici hanno una permeabilità relativa  $\mu_r \simeq 1$ ; i materiali ferromagnetici, in particolare quelli usati nelle costruzioni elettromeccaniche, hanno una permeabilità relativa molto elevata:  $\mu_r = 10^3 \div 10^4$ .

**Tabella 1.1.** Classificazione dei materiali conduttori

Conduttori	
<i>Metallici</i>	<i>Non Metallici</i>
Rame	Grafite
Alluminio	Carbone
Ottone	Agglomerati
Altri metalli	
Superconduttori	

forma di nastri (piattine con rapporto tra lato lungo e corto che può essere molto più grande di 10) per la realizzazione degli avvolgimenti di bassa tensione nei trasformatori di media tensione. Benché l'alluminio abbia una resistenza specifica più elevata esso presenta, dato il suo basso peso specifico, determinati vantaggi per le parti rotanti: sono stati ad esempio realizzati avvolgimenti rotorici in alluminio per grandi turboalternatori. Con funzioni meccaniche, l'alluminio trova inoltre impiego nella costruzione di ventole di raffreddamento e delle carcasse pressofuse di motori di serie. Gli ottoni vengono usati per pezzi fusi, soggetti a modeste sollecitazioni meccaniche, e i bronzi per anelli, collettori, portaspazzole e per cuscinetti. Tra i conduttori vanno infine ricordati i carboni, le grafiti e gli agglomerati di carbone e polveri metalliche impiegati per le spazzole nelle macchine elettriche rotanti munite di anelli e di collettori.

Nella scelta dei materiali conduttori bisogna tenere presente la necessità di limitare, quanto più possibile, le perdite ohmiche e l'eccessivo riscaldamento di quelle parti destinate alla conduzione della corrente; sono quindi necessari materiali che abbiano una bassa resistività e una elevata conducibilità termica. Si ricordi inoltre che all'aumentare della temperatura, aumenta anche la resistività secondo la relazione:

$$\rho(\theta) = \rho(\theta_0) [1 + \alpha(\theta_0)(\theta - \theta_0)]$$

in cui:

$\rho(\theta_0)$  è il valore della resistività alla temperatura  $\theta_0$  °C;

$\rho(\theta)$  è il valore della resistività alla temperatura  $\theta$  °C;

$\alpha(\theta_0)$  è il coefficiente di temperatura del materiale a  $\theta_0$  °C.

La resistività viene spesso riferita al valore di  $\rho$  corrispondente alla temperatura  $\theta_0 = 20$  °C. Per il rame, che è il materiale conduttore più importante, si ha  $\alpha(20$  °C)  $\approx 0,004$  (tab. 1.2); per ogni grado di aumento della temperatura la resisti-

**Tabella 1.2.** Conduttori maggiormente diffusi

Materiale	$\rho(20\text{ }^\circ\text{C}) \text{ } \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$	$\alpha(20\text{ }^\circ\text{C}) \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Rame ricotto	0,01724	0,00381
Rame elettrolitico	0,0176	0,0039
Rame crudo	0,01786	0,00393
Alluminio ricotto	0,0282	0,0039
Alluminio crudo	0,0289	0,0039

vità del rame cresce cioè dello 0,4%. Col crescere della temperatura si ha quindi un incremento delle perdite ohmiche, con conseguente e ulteriore sopraelevazione della temperatura.

Nel proporzionare i conduttori bisogna tener conto dell'effetto Joule ed è pertanto necessario valutare le perdite. Per fissare le idee si consideri un conduttore filiforme di sezione costante  $S$  percorso da corrente continua e non investito da flussi magnetici variabili. Con tali ipotesi, indicata con  $R$  la resistenza del conduttore e con  $I$  la corrente continua che lo attraversa, si può scrivere:

$$P_{cu} = R \cdot I^2$$

in cui  $R = \rho l/S$ .

Esprimendo la corrente come prodotto tra la densità di corrente  $J$  ( $\text{A mm}^{-2}$ ) e la sezione  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) e considerando il volume del conduttore  $\mathcal{V} = Sl$ , si ha:

$$P_{cu} = \rho \frac{l}{S} J^2 S^2 = \rho J^2 \mathcal{V} \quad \text{W} \quad (1.1)$$

Tale relazione mostra che per ridurre le perdite, a parità di intensità di corrente, occorre ridurre la densità di corrente a spese di un aumento della sezione del conduttore e quindi di un aumento del volume  $\mathcal{V}$ . Dividendo la (1.1) per il volume del materiale si ottiene la perdita specifica per unità di volume:

$$\tilde{P}_{cu} = \rho J^2 \quad \text{W m}^{-3}$$

È di uso più comune la perdita specifica per unità di peso:

$$\tilde{P}_{cu} = \frac{\rho J^2}{\gamma} \quad \text{W kg}^{-1}$$

essendo  $\gamma$  il peso specifico del materiale. Con riferimento ad un conduttore di rame,

esprimendo  $J$  in  $\text{A mm}^{-2}$  e assumendo per  $\rho$  il valore a  $75^\circ\text{C}$  si ha:<sup>3</sup>

$$\tilde{P}_{cu} = 2,4J^2 \quad \text{W kg}^{-1}$$

Nelle macchine elettriche il valore della densità di corrente è generalmente compreso tra 2 e 4  $\text{A mm}^{-2}$ , per cui la perdita specifica si aggira tra 10 e 40  $\text{W kg}^{-1}$  (in particolari applicazioni tali valori possono essere molto più elevati).

Poiché nelle macchine elettriche i conduttori sono generalmente investiti da flussi magnetici variabili, le precedenti relazioni non sono esattamente valide a causa delle f.e.m. indotte entro i conduttori stessi. Tali f.e.m. determinano infatti una disuniforme distribuzione della corrente e un conseguente incremento della potenza dissipata nei conduttori (*perdite addizionali*) esprimibile come:

$$\tilde{P}_{add} = K_1 \frac{f^2 B^2}{\rho} \quad \text{W m}^{-3} \quad (1.2)$$

in cui  $K_1$  dipende dalla forma e dalla disposizione del conduttore,  $B$  è l'induzione magnetica media e  $\rho$  è la resistività del conduttore. Se il campo magnetico che crea la disuniforme distribuzione di corrente è dovuto soltanto alla stessa corrente del conduttore interessato la (1.2) può esprimersi nella forma:

$$\tilde{P}_{add} = K_2 \frac{f^2 J^2}{\rho} \quad \text{W m}^{-3}$$

In quest'ultimo caso la perdita complessiva per unità di volume può pertanto esprimersi nella forma:

$$\tilde{P}_{cu} = J^2 \left( \rho + K_2 \frac{f^2}{\rho} \right) \quad \text{W m}^{-3}$$

È interessante osservare che al crescere della frequenza, a parità di corrente impressa, aumentano le f.e.m. indotte nel corpo dei conduttori dai flussi di induzione proporzionali alla corrente stessa e pertanto aumentano anche le perdite. Al crescere della resistività, ad esempio a causa di un aumento di temperatura, si ha invece una diminuzione delle correnti indotte e quindi delle perdite addizionali.

3.  $\gamma_{cu} = 8,89 \text{ kg dm}^{-3}$ ,  $\rho_{cu}(75^\circ\text{C}) = 0,0215 \text{ } \Omega \text{ mm}^2\text{m}^{-1}$