

# Attuatori

## OBIETTIVI CONTENUTI

- 1 Introduzione
- 2 Principi di funzionamento delle macchine elettriche
- 3 La macchina elettrica rotante
- 4 Il motore in corrente continua

- 5 Eccitazione e pilotaggio dei motori C.C.
- 6 Motori passo-passo
- 7 Motori speciali
- 8 Altoparlanti

### Conoscenze

- La funzione di un attuttore in un sistema di controllo
- Modello matematico della macchina elettrica
- Funzionamento e utilizzazione di motori passo-passo

### Abilità

- Analizzare il comportamento della macchina elettrica attraverso il suo modello matematico
- Confrontare i motori in corrente continua e i motori passo-passo come dispositivi di azionamento

## 1 Introduzione

Gli **attuatori** sono dispositivi che hanno il compito di convertire un segnale elettrico (tensione) in una grandezza fisica.

Nella maggior parte dei casi gli attuatori hanno il compito di produrre lo spostamento di un organo meccanico. In alcuni casi lo spostamento è il risultato finale desiderato; in altri casi lo spostamento serve a produrre la variazione di altre grandezze. A titolo di esempio indichiamo alcuni casi pratici di uso particolarmente frequente:

- *pompe idrauliche*: un motore elettrico fa girare più o meno velocemente un'elica per aumentare o diminuire la portata di liquido;
- *elettrovalvole*: un pistone viene spostato per aprire o chiudere il passaggio del fluido in un tubo;
- *servomotori*: spostano una parte di macchina per farle assumere una posizione desiderata.

Nella maggior parte dei casi l'attuatore è un motore elettrico o un'apparecchiatura contenente un motore elettrico; in altri casi è, oppure contiene, un elettromagnete.

I motori elettrici usati più frequentemente nel campo dell'automazione sono:

- *motori in corrente continua*;
- *motori passo-passo*.

Per poter approfondire adeguatamente il funzionamento dei motori elettrici faremo alcuni richiami sui principi di funzionamento delle macchine elettriche.

## 2 Principi di funzionamento delle macchine elettriche

Le **macchine elettriche** sono utilizzate per convertire energia meccanica in energia elettrica (generatori elettrici) o, viceversa, per convertire energia elettrica in energia meccanica (motori elettrici).

I due tipi di conversione sono governati rispettivamente:

- dalla legge di Faraday-Newman-Lenz (detta comunemente legge di Lenz);
- dalla forza magnetoelettrica.

La **legge di Lenz** afferma che, se una linea chiusa concatena un flusso magnetico che varia nel tempo, su tale linea nasce una forza elettromotrice indotta f.e.m.i. ( $e$ ), che è pari alla velocità con cui varia il flusso concatenato.

$$e = - \frac{d\Phi_c(t)}{dt}$$

2

in cui:

$e$  = forza elettromotrice indotta (f.e.m.i.);

$\Phi_c(t)$  = flusso magnetico concatenato dalla linea chiusa;

$-\frac{d\Phi_c(t)}{dt}$  = velocità di variazione del flusso = derivata del flusso rispetto al tempo.

Il segno "meno" sta a indicare che la forza elettromotrice indotta  $e$  si oppone alla causa che l'ha generata, per cui, se il flusso sta aumentando, la f.e.m.i. tenderà a produrre un effetto (corrente elettrica) che tende a farlo diminuire.

Se il flusso varia nel tempo per effetto di un movimento (energia meccanica) si ottiene la conversione da energia meccanica in energia elettrica.

La **forza magnetoelettrica** (o *elettromagnetica*) è una forza che agisce su un conduttore percorso da corrente quando esso è immerso in un campo magnetico di induzione  $\vec{B}$ .

La forza magnetoelettrica  $\vec{F}_{me}$  può essere calcolata con la seguente formula:

$$\vec{F}_{me} = l \cdot \vec{I} \wedge \vec{B}$$

2

in cui:

$\vec{F}_{me}$  = forza magnetoelettrica espressa in newton [N];

$l$  = lunghezza del conduttore investito dal campo magnetico [m];

$\vec{I}$  = corrente elettrica che passa nel conduttore [A];

$\vec{B}$  = induzione magnetica espressa in tesla [T];

$\wedge$  = prodotto vettoriale fra il vettore  $\vec{I}$  e il vettore  $\vec{B}$ .

Notare che la corrente va considerata come un vettore poiché, per essere definita completamente, è necessario conoscerne intensità e verso.

Per ricavare il vettore  $\vec{F}_{me}$  è necessario calcolare:

- il *modulo* o intensità  $F_{me}$ ;
- il *verso*.



Per calcolare il **modulo** si usa la seguente formula:

$$F_{me} = l \cdot I \cdot B \cdot \sin \widehat{IB}$$

3

in cui:

$l$  = modulo o intensità della corrente;

$B$  = modulo dell'induzione magnetica;

$\widehat{IB}$  = angolo compreso fra il vettore  $\vec{I}$  e il vettore  $\vec{B}$ .

Se l'angolo è di  $90^\circ$  si ottiene:

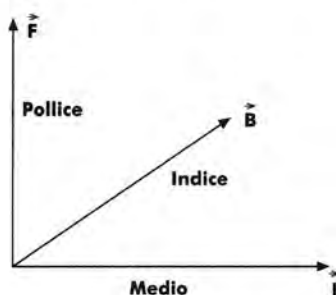
$$F_{me} = B \cdot l \cdot I$$

4

Il **verso** di  $\vec{F}_{me}$  può essere ricavato con la *regola della mano sinistra* schematizzata in figura 1.

Figura 1

Regola della mano sinistra

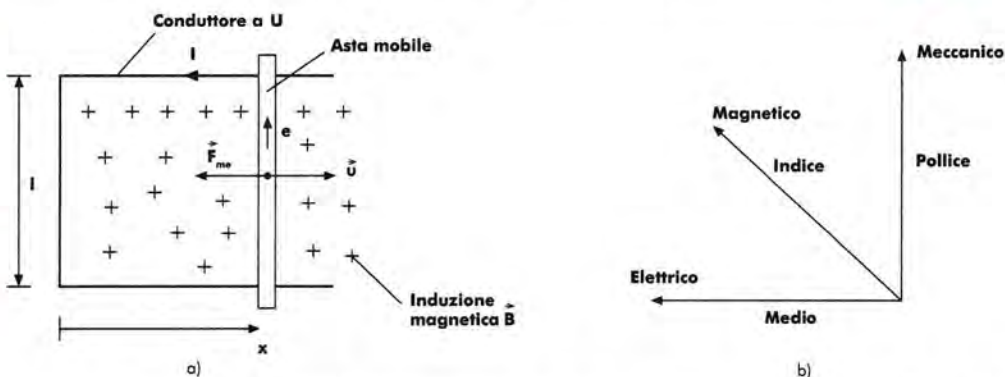


Macchina elettrica elementare

Il funzionamento di qualunque macchina elettrica si basa sulla interazione di due fenomeni: la f.e.m.i. governata dalla legge di Lenz e la forza magnetoelettrica  $\vec{F}_{me}$ . Per capire come si possono manifestare e come interagiscono questi due fenomeni in una macchina elettrica analizziamo il sistema rappresentato schematicamente in figura 2.

Figura 2

Azioni presenti nella macchina elettrica: schema di principio (a); regola della mano destra (b)



In essa si può notare un conduttore piegato a  $U$  sul quale scorre un'asta mobile che si muove con velocità  $\vec{u}$  da sinistra verso destra. Il tutto è immerso in un campo magnetico di induzione  $\vec{B}$  perpendicolare al piano del conduttore e con verso entrante nel foglio. In tale situazione la linea chiusa, formata dall'asta mobile e dal pezzo conduttore a  $U$  che si trova alla sinistra dell'asta stessa, concatena un flusso dato dalla relazione:

$$\Phi_c = B \cdot l \cdot x$$

5

in cui :

- $\Phi_c$  è il flusso concatenato;
- $l$  è la lunghezza dell'asta che concorre a formare la linea chiusa;
- $x$  è la posizione dell'asta.

Poiché l'asta si muove con velocità

$$u = \frac{dx}{dt}$$

6

il flusso concatenato varia nel tempo secondo la relazione seguente:

$$\frac{d\Phi_c}{dt} = \frac{d(B \cdot l \cdot x)}{dt} = B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} \quad 7$$

cioè:

$$\frac{d\Phi_c}{dt} = B \cdot l \cdot u \quad 8$$

Per la legge di Lenz la linea chiusa in questione risulta sede di una f.e.m.i. data dalla seguente relazione:

$$e = -\frac{d\Phi_c}{dt} = -B \cdot l \cdot u \quad 9$$

Il segno meno serve a indicare che la f.e.m.i. si oppone alla causa che l'ha generata. Se ipotizziamo che la f.e.m.i. sia tutta concentrata nell'asta, essa è diretta verso l'alto. Il verso della f.e.m.i. può essere ricavato con la regola della mano destra riportata in **figura 2b**.

Se l'asta è di materiale resistivo (non isolante) forma, assieme al conduttore, un circuito chiuso nel quale circola una corrente  $I$  che dipende dal valore della resistenza ( $R$ ) e dalla f.e.m.i. ( $e$ ):

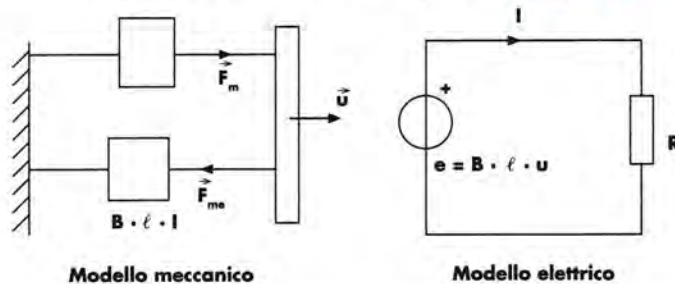
$$I = \frac{e}{R} \quad 10$$

La corrente circolante nell'asta, a causa della presenza del campo magnetico, produce sull'asta stessa una forza magnetoelettrica  $\vec{F}_{me}$ , il cui valore è dato dalla seguente relazione:  $F_{me} = B \cdot l \cdot I$ .

Il verso di tale forza è ricavabile con la regola della mano sinistra (**figura 1**) e nel caso specifico è diretta verso sinistra. Si deduce che questa forza è contraria al verso di spostamento dell'asta e, quindi, rappresenta un'azione che si oppone alla causa che l'ha generata.

Tutte le considerazioni sviluppate analizzando il movimento dell'asta possono essere riassunte schematicamente mediante i modelli riportati in **figura 3**.

**Figura 3**  
Generatore elettrico



La parte a sinistra mostra il modello meccanico in cui sono riportate tutte le grandezze di tipo meccanico; in esso è rappresentata l'asta mobile a cui sono applicate due forze:

- la forza motrice  $\vec{F}_m$  applicata all'asta per produrne il movimento;
- la forza di magnetoelettrica  $\vec{F}_{me}$  di origine elettrica che si oppone alla causa  $\vec{F}_m$  che l'ha generata.

Il risultato di queste due forze produce la velocità  $\vec{u}$  con cui si muove l'asta.

A fianco del modello meccanico è riportato il modello (circuito) elettrico che raggruppa tutte le grandezze di tipo elettrico: la f.e.m.i. ( $e$ ), la resistenza elettrica complessiva del circuito, la corrente  $I$ .

Il modello di **figura 3** è molto semplice e ipotizza che nel sistema meccanico siano presenti solo due forze: la forza motrice  $\vec{F}_m$  e la forza magnetoelettrica  $\vec{F}_{me}$ . Se esse



sono uguali e contrarie la velocità dell'asta è costante; se hanno un valore diverso possiamo ottenere i seguenti risultati:

- $F_{me} < F_{res}$ , l'asta si muove verso destra accelerando;
- $F_{me} > F_{res}$ , l'asta si muove verso destra rallentando.

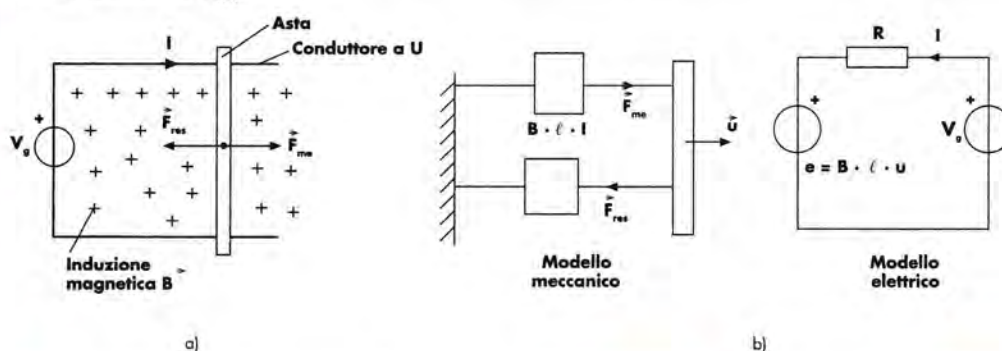
Se nel circuito elettrico non circola corrente (circuito aperto) la forza  $F_{me}$  ha valore nullo, per cui, a causa della sola  $F_{res}$ , si muove di moto accelerato.

Il modello elettrico e quello meccanico interagiscono fra di loro in quanto:

- la corrente  $I$  del circuito elettrico produce sul modello meccanico la forza magnetoelettrica  $F_{me} = B \cdot l \cdot I$ ;
- la velocità dell'asta (grandezza meccanica) produce sul circuito elettrico la f.e.m.i.  $e = B \cdot l \cdot u$ .

#### Motore elettrico

**Figura 4**  
Motore elettrico:  
schema di  
principio  
(a); modelli  
meccanico ed  
elettrico (b)



Il comportamento del sistema elettromeccanico di **figura 4a** è schematizzato in **figura 4b** mediante i due modelli: meccanico ed elettrico.

Se l'asta è ferma perché  $F_{me} = F_{res}$ , la velocità  $u$  è nulla e quindi è nulla anche la f.e.m.i.  $e = B \cdot l \cdot u$ .

Ad asta ferma nel circuito circola una corrente:

$$I = \frac{V_g}{R} \quad 11$$

Che produce sull'asta una forza magnetoelettrica  $F_{me} = B \cdot l \cdot I$ . Se  $F_{me} > F_{res}$ , l'asta si muove verso destra di moto accelerato producendo una f.e.m.i.  $e = B \cdot l \cdot u$  che aumenta con l'aumentare della velocità  $u$ . L'aumento della velocità fa aumentare la f.e.m.i.  $e$  quindi produce una diminuzione della corrente che è data da:

$$I = \frac{V_g - e}{R} \quad 12$$

Poiché la  $F_{me}$  dipende dalla corrente, diminuisce anche  $F_{me}$  fino a quando  $F_{me} = F_{res}$ . In tali condizioni la velocità si stabilizza e rimane costante.

I modelli di **figura 3** e **figura 4** riportano solo alcuni fenomeni che entrano in gioco nel funzionamento di una macchina elettrica. Per una analisi più dettagliata del sistema in questione occorre considerare tutti i seguenti fenomeni:

- forza elettromotrice indotta;
- resistenza elettrica dei conduttori;
- effetti di tipo capacitivo;
- effetti di tipo induttivo;
- forza magnetoelettrica;

Modello  
completo di  
macchina  
elettrica

- l'attrito delle parti in movimento;
- l'inerzia meccanica delle parti in movimento;
- elasticità degli organi meccanici.

Per poter trattare in modo sistemico questi fenomeni è conveniente rappresentare ognuno di essi mediante un simbolo. A ogni simbolo vanno associate le grandezze in gioco e la relazione che le lega. Nella **tabella 1** sono riportati i simboli, le grandezze e le relazioni che descrivono i suddetti fenomeni.

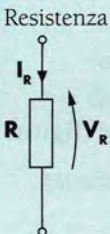
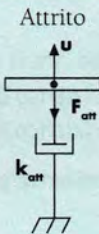
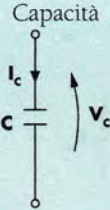

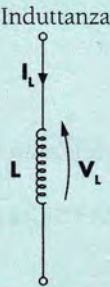
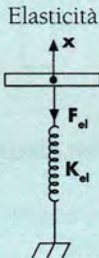

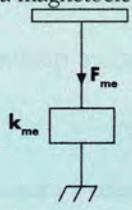
La **forza elettromotrice indotta**  $e$  dipende dalla velocità  $u$  attraverso una **costante elettrica** di proporzionalità  $k_e$ ,  $e = k_e \cdot u$ .

La **resistenza elettrica** dei conduttori produce una caduta di tensione  $V_R$  che dipende dalla corrente  $I_R$  e dalla resistenza  $R$  stessa,  $V_R = R \cdot I_R$ .

Gli **effetti capacitivi** sono tipici dei condensatori; la corrente che trasporta le cariche sulle armature produce una variazione della tensione ai capi delle armature stesse.

Gli **effetti induttivi** producono una tensione ai capi di una induttanza  $L$ , che dipende dalla velocità con cui varia la corrente  $\frac{dI}{dt}$ . La costante di proporzionalità è il valore della induttanza  $L$ .

**Tabella 1**  
Schematizzazione dei  
fenomeni  
elettro-  
meccanici

FENOMENI ELETTRICI		FENOMENI MECCANICI	
Simbolo	Relazione	Simbolo	Relazione
Resistenza 	$V_R = R \cdot I_R$	Attrito 	$F_{att} = k_{att} \cdot u$ $k_{att}$ = coeff. di attrito
Capacità 	$I_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt}$	Inerzia 	$F_{in} = m \cdot \frac{du}{dt}$ $m$ = massa
Induttanza 	$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$	Elasticità 	$F_{el} = k_{el} \cdot x$ $k_{el}$ = costante di elasticità
Legge di Lenz 	$e = k_e \cdot u$ $u$ = velocità	Forza magnetoelettrica 	$F_{me} = k_{me} \cdot I$ $I$ = corrente elettrica



## Modello completo di generatore

L'attrito produce una forza  $F_{att}$  che si oppone al movimento ed è proporzionale alla velocità attraverso la costante di attrito  $k_{att}$ .

L'inerzia è una forza che si oppone alla variazione di velocità  $\frac{du}{dt}$  (accelerazione o decelerazione) attraverso una costante di proporzionalità che è la massa dell'asta.

L'elasticità è una forza che dipende dallo spostamento  $x$ . È presente quando un oggetto si deforma. Nel caso in questione si suppone che gli organi meccanici siano rigidi e indeformabili, per cui il fenomeno elastico non viene preso in considerazione.

Prendendo in esame tutti i fenomeni sopra esaminati possiamo schematizzare il generatore elettrico mediante i modelli di figura 5a.

In esso la forza motrice  $F_m$  produce il movimento dell'asta e ha lo stesso verso della velocità, da cui dipende la f.e.m.i.  $e = k_e \cdot u$ . Le altre forze  $F_{me}$ ,  $F_{in}$ ,  $F_{att}$  si oppongono a  $F_m$ . Nel circuito elettrico sono omessi i fenomeni capacitivi e induttivi; la resistenza rappresenta la resistenza  $R_i$  dei conduttori interni alla macchina elettrica, mentre  $R_u$  è la resistenza dell'utilizzatore elettrico.

Per analizzare il modello meccanico di figura 5a applichiamo la condizione di equilibrio alle forze che agiscono sull'asta ottenendo:

$$F_m - F_{me} - F_{in} - F_{att} = 0 \quad 13$$

ossia:

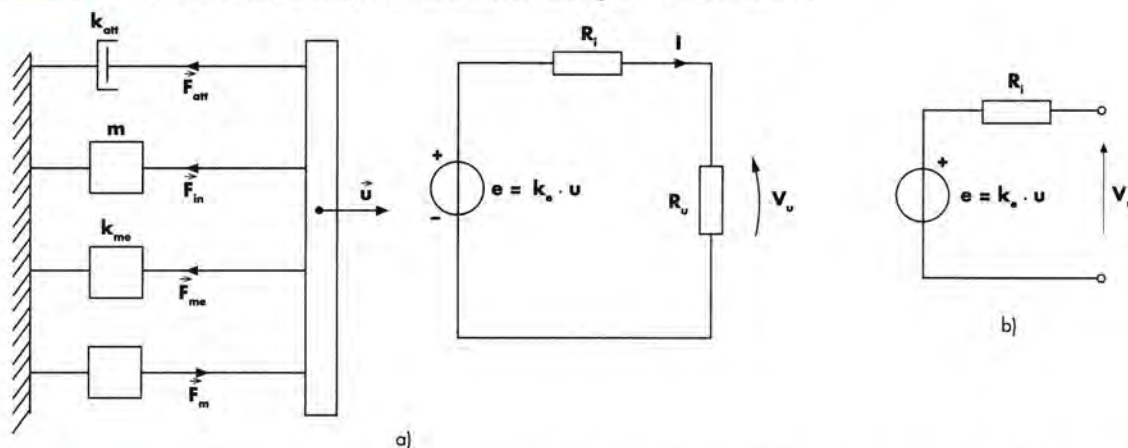
$$F_m - k_{me} \cdot I - m \cdot \frac{du}{dt} - k_{att} \cdot u = 0 \quad 14$$

Analizziamo ora il sistema in due situazioni particolari:

1. circuito elettrico aperto e velocità costante (figura 5b);
2. circuito elettrico chiuso su un carico e velocità costante (figura 5a).

Figura 5

Modello completo di generatore: con carico  $R_u$  (a); senza carico (b)



## Caso 1

Se il circuito elettrico è aperto ( $I = 0$ ) e la velocità dell'asta è costante ( $\frac{du}{dt} = 0$ ) la forza motrice serve solo a vincere gli attriti e il sistema risulta governato dalle seguenti espressioni:

$$F_m - k_{att} \cdot u = 0 \quad 15$$

$$V_u = e \quad \text{ossia} \quad V_u = k_e \cdot u \quad 16$$

Sostituendo e risolvendo otteniamo:

$$u = \frac{F_m}{k_{att}} \quad V_u = k_e \cdot \frac{F_m}{k_{att}} \quad 17$$

## Caso 2

Se il circuito è chiuso su un carico, circola una corrente  $I$  che produce una forza magnetoelettrica  $F_{me} = k_{me} \cdot I$ . In tali condizioni il sistema risulta governato dalle seguenti

equazioni:

$$V_u = e - R_i \cdot I \quad 18$$

$$F_m = F_{att} + F_{me} \quad 19$$

- La tensione  $V_u$  sul carico è data dalla f.e.m.i. meno la caduta di tensione interna  $R_i \cdot I$ .
- La forza motrice  $F_m$  deve vincere la forza di attrito ( $F_{att} = k_{att} \cdot u$ ), più la forza magnetoelettrica ( $F_{me} = k_{me} \cdot I$ ).

Sostituendo alle varie grandezze le rispettive espressioni otteniamo:

$$V_u = k_e \cdot u - R_i \cdot I \quad F_m = k_{att} \cdot u + k_{me} \cdot I \quad 20$$

Risolviendo ricaviamo:

$$u = \frac{F_m}{k_{att}} - \frac{k_{me} \cdot I}{k_{att}} \quad V_u = k_e \frac{F_m}{k_{att}} - \left( \frac{k_e \cdot k_{me}}{k_{att}} + R_i \right) \cdot I \quad 21$$

La presenza di una corrente produce due fenomeni: uno di tipo meccanico, dovuto alla riduzione della velocità per l'aumento della forza magnetoelettrica, e un altro di tipo elettrico, dovuto alla caduta di tensione su  $R_i$ .

Entrambi contribuiscono ad abbassare la tensione  $V_u$  fornita al carico. Si noti che è possibile eliminare la caduta di tensione su  $R_i$  se si riduce a zero la resistenza del conduttore ma non è possibile eliminare la riduzione di  $V_u$  causata dalla diminuzione di f.e.m.i. dovuta a una riduzione di velocità.

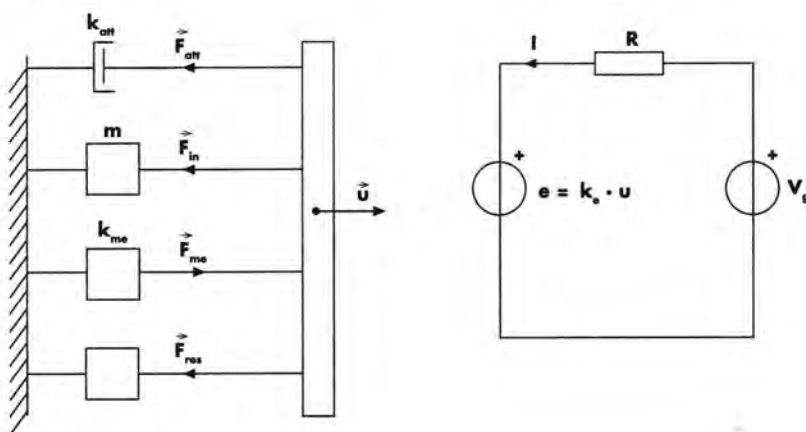
È interessante osservare che il sistema elettrico e il sistema meccanico interagiscono fra di loro, per cui un aumento della corrente produce una diminuzione di velocità che, a sua volta, fa diminuire la f.e.m.i. che porta a una diminuzione della corrente, provocando un effetto stabilizzante.

L'analisi dettagliata del motore elettrico può essere effettuata facendo riferimento alla **figura 6**.

Modello completo del motore elettrico

**Figura 6**

Modello completo di motore



Nel modello elettrico è inserito un generatore di tensione  $V_g$  che serve a fornire la potenza elettrica ( $V_g \cdot I$ ). Questa potenza elettrica viene trasformata in potenza meccanica che fa muovere l'asta per effetto della forza magnetoelettrica  $F_{me} = k_{me} \cdot I$ .

A questa forza, motrice, si oppongono: la forza di attrito ( $F_{att} = k_{att} \cdot u$ ), la forza d'inerzia ( $F_{in} = m \cdot \frac{du}{dt}$ ) e la forza resistente  $F_{res}$  esercitata dall'organo meccanico che deve essere mosso. La parte meccanica del sistema rappresentato in **figura 6** è governato dalla seguente relazione:

$$F_{me} = F_{att} + F_{in} + F_{res} \quad 22$$



La forza motrice è rappresentata dalla forza magnetoelettrica  $F_{me}$ ; essa dipende dalla corrente che circola nel modello elettrico:

$$F_{me} = k_{me} \cdot I = k_{me} \cdot \frac{V_g - e}{R} \quad 23$$

sostituendo  $e = k_e \cdot u$  si ottiene:

$$F_{me} = \frac{k_{me}}{R} \cdot V_g - \frac{k_{me} \cdot k_e}{R} \cdot u \quad 24$$

Dalla relazione precedente si nota che, tenendo costante  $V_g$ , la forza motrice ( $F_{me}$ ) diminuisce con l'aumentare della velocità  $u$ .

Il comportamento del motore, descritto dalla precedente relazione è rappresentato graficamente in **figura 7a**, in cui  $F_{meMax} = \frac{k_{me}}{R} \cdot V_g$  rappresenta il valore massimo della forza magnetoelettrica che si ha quando l'asta è bloccata.

Dalla **figura 7a** si desume che, se il motore è privo di forza resistente (cioè gira a vuoto) e ha una velocità costante (quindi  $F_{in} = 0$ ), la condizione di equilibrio per le forze è:

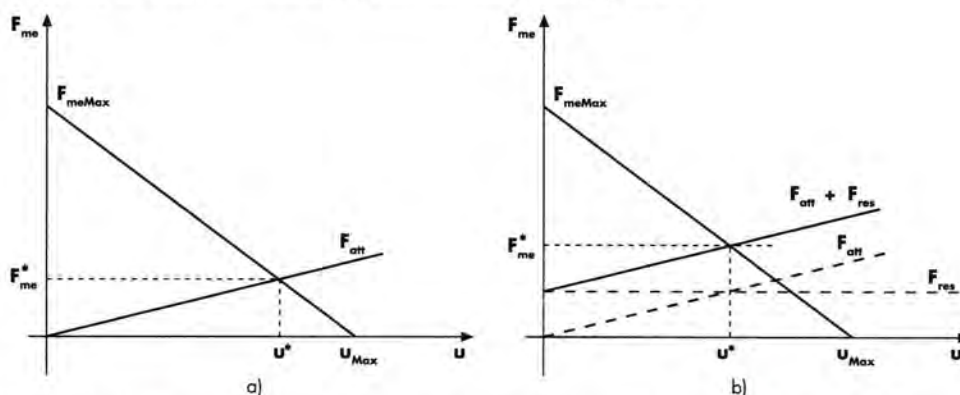
$$F_{me} = F_{att} \quad 25$$

ossia:

$$F_{meMax} - \frac{k_{me} \cdot k_e}{R} \cdot u^* = k_{att} \cdot u^* \quad 26$$

da cui si può ricavare il valore della velocità  $u^*$  all'equilibrio.

**Figura 7**  
Comportamento  
meccanico  
del motore  
elettrico



Con analoghe considerazioni si può studiare il sistema se, oltre alla forza di attrito, è presente una forza resistente che non dipende dalla velocità (**figura 7b**).

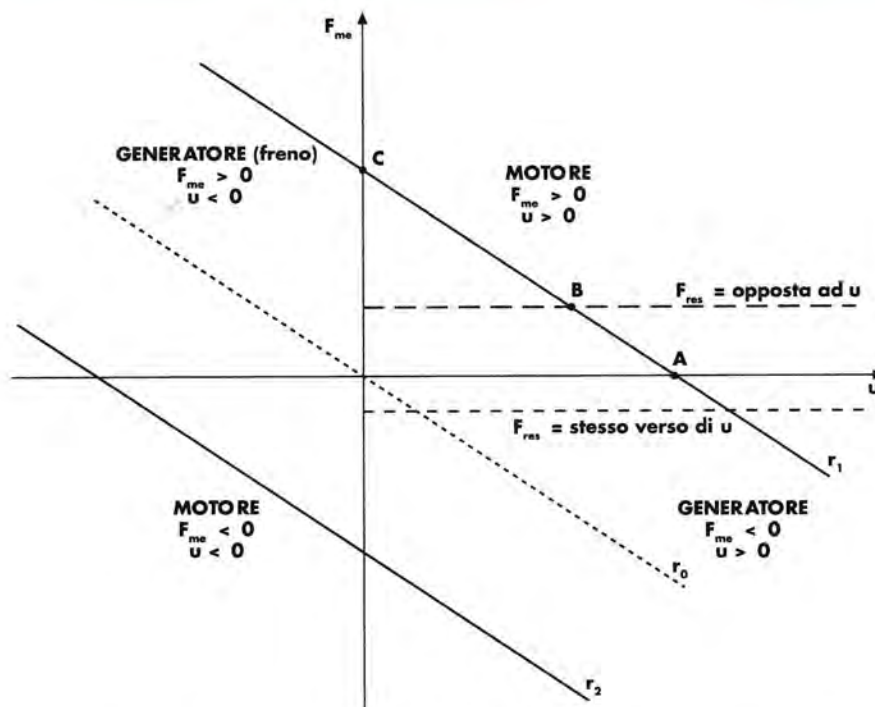
Il modello di **figura 6** si presta bene anche per studiare la macchina elettrica in generale, sia come generatore elettrico, sia come motore elettrico. Infatti, se al posto della forza resistente, che ha verso contrario al moto, poniamo una forza motrice che ha lo stesso verso della velocità  $u$ , e al posto del generatore  $V_g$  poniamo un utilizzatore facendo cambiare il verso della corrente  $e$ , quindi, anche il verso di  $F_{me}$ , si ottiene il modello del generatore elettrico. La **figura 8** mostra come si presenta la caratteristica meccanica di una macchina elettrica in generale e come varia la forza magnetoelettrica  $F_{me}$  al variare della velocità  $u$ .

Nella **figura 8** la forza  $F_{me}$  rappresenta la forza che la macchina esercita sull'asta e  $u$  la velocità con cui questa si muove.

Quando  $F_{me}$  e  $u$  hanno lo stesso verso (entrambe positive o entrambe negative), la macchina funziona da motore, quando hanno verso contrario funziona da generatore. La retta passante per l'origine rappresenta le condizioni di funzionamento quando  $V_g = 0$ , ossia quando i terminali del circuito elettrico sono cortocircuitati. È evidente che in tali condizioni può funzionare solo da generatore elettrico, 2° e 4° quadrante.

Figura 8

Condizioni di funzionamento della macchina elettrica



Esaminiamo ora il caso in cui sia applicato un generatore elettrico con  $V_g > 0$  (retta  $r_1$ ). Se all'asta non è applicata alcuna forza resistente e non esiste attrito, la forza magnetoelettrica deve essere nulla e la velocità assume il valore massimo (punto A), allora la f.e.m.i. assume un valore uguale a  $V_g$  e quindi  $I = 0$ , che comporta  $F_{me} = 0$ .

Se viene applicata una forza resistente  $F_{res}$  l'asta rallenta,  $u$  diminuisce e fa diminuire anche la f.e.m.i. ( $e = k_e \cdot u$ ). Essendo  $e < V_g$ , circola una corrente che aumenta col diminuire di  $e$  cioè di  $u$ . Quando  $F_{me} = F_{res}$ , la velocità si stabilizza (punto B).

Se la forza resistente assume un valore pari a  $F_{meMax}$  l'asta rallenta fino a fermarsi (punto C). Se  $F_{res}$  supera  $F_{meMax}$ , l'asta si muove nel verso contrario (2° quadrante). In questo caso la forza magnetoelettrica, avendo verso contrario al moto dell'asta, esercita su di essa un'azione frenante.

Se dalle condizioni di funzionamento del punto A ( $u = u_{Max}$ ;  $F_{me} = 0$ ) viene applicata una forza resistente con verso uguale a quello di  $u$ , l'asta accelera ulteriormente facendo aumentare  $u$  e quindi la f.e.m.i. Se si arriva ad avere  $e > V_g$ , la macchina si comporta da generatore e la corrente, cambiando verso, fornisce energia elettrica al generatore  $V_g$ .

### 3 La macchina elettrica rotante

I principi di funzionamento delle macchine elettriche visti nel paragrafo precedente si riferiscono a un modello di macchina non realizzabile praticamente, in quanto ipotizza un movimento rettilineo dell'asta, moto che non può durare nel tempo. Nella realtà la parte mobile della macchina è una spira (o un insieme di spire) che ruota intorno a un asse. Un modello di macchina elettrica più vicina a quella realizzabile praticamente è riportato in figura 9, in cui è rappresentata una linea chiusa (spira) di forma rettangolare avente due lati di lunghezza  $l$  e altezza  $2 \cdot r$ , immersa in un campo magnetico di induzione  $B$ . La spira ruota intorno al suo asse che è parallelo ai lati ed è perpendicolare a  $B$ . Quando la spira si trova nella posizione verticale (figura 9b), essa concatena un flusso:



$$\Phi_{CMax} = B \cdot l \cdot 2 \cdot r \quad 27$$

mentre, se si trova in una posizione inclinata di un angolo  $\alpha$  rispetto all'orizzontale (figura 9c), il flusso concatenato è:

$$\Phi_C = B \cdot l \cdot 2 \cdot r \cdot \sin\alpha = \Phi_{CMax} \cdot \sin\alpha \quad 28$$

Se la spira, partendo dalla posizione orizzontale ( $\alpha = 0$ ), ruota con velocità angolare  $\omega$ , la posizione angolare si calcola con la relazione:

$$\alpha = \omega \cdot t \quad 29$$

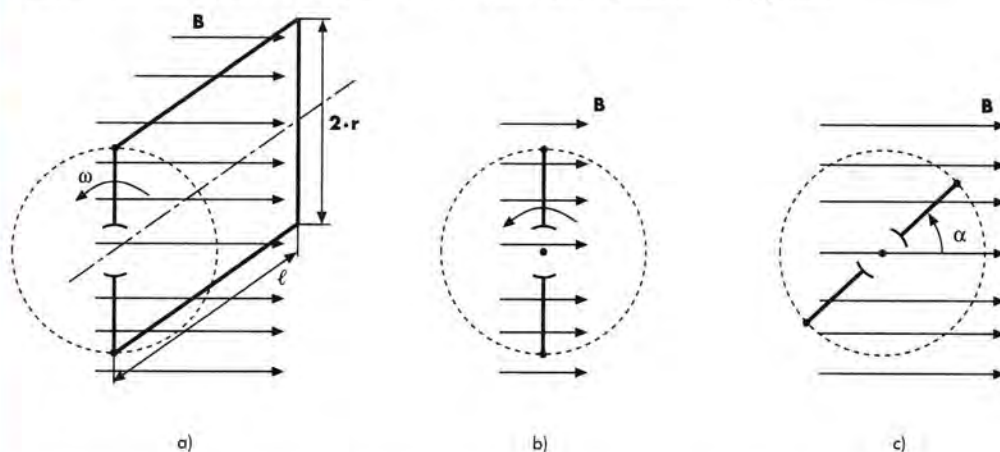
in cui:  $\alpha$  è espresso in [rad] e  $\omega$  in [rad/s].

Allora il flusso concatenato può essere espresso dalla seguente relazione:

$$\Phi_C = \Phi_{CMax} \cdot \sin\omega t \quad 30$$

Durante la rotazione della spira il flusso da essa concatenato varia nel tempo con andamento sinusoidale, per cui assume valori positivi e valori negativi. I valori negativi del flusso derivano dal fatto che esso, per mezzo giro entra da una parte della superficie racchiusa dalla spira e per l'altro mezzo giro entra dalla parte opposta.

**Figura 9**  
Spira rotante



Poiché la spira concatena un flusso variabile, in essa nasce una f.e.m.i.

Le considerazioni di natura elettromeccanica sviluppate nel precedente paragrafo possono essere applicate alla macchina elettrica rotante formata da una spira, o meglio da un avvolgimento che ruota in un campo magnetico. Pertanto è possibile utilizzare il modello meccanico ed elettrico esaminati in precedenza apportando le seguenti variazioni:

- la forza  $\vec{F}$  diventa la coppia  $\vec{C}$ ;
- la velocità  $\vec{u}$  diventa la velocità angolare  $\vec{\omega}$ ;
- la massa  $m$  diventa il momento d'inerzia  $J$ .

Approfondimenti sul funzionamento della macchina rotante sono disponibili in *Auladigitale*.

Nel campo dei sistemi di controllo rivestono particolare interesse la dinamo (generatore in corrente continua) e il motore in corrente continua.

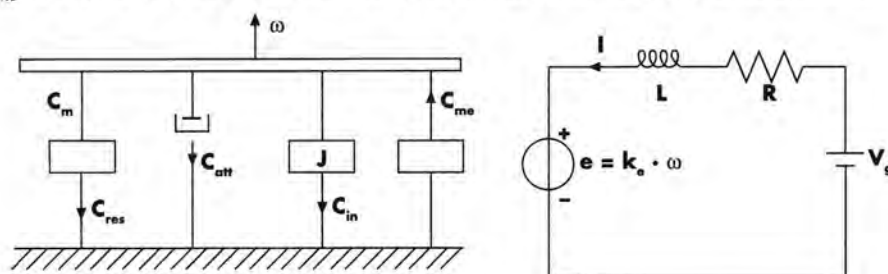
## 4 Il motore in corrente continua



Il **motore in corrente continua** è una macchina elettrica che viene alimentata da un generatore di tensione in corrente continua e produce la conversione di energia elettrica in energia meccanica.

**Figura 10**

Modello di motore in corrente continua



Analizzando il circuito elettrico possiamo scrivere:

$$V_g - R \cdot I - L \cdot \frac{dI}{dt} - k_e \cdot \omega = 0 \quad 31$$

in cui:

- $V_g$  = tensione del generatore di alimentazione;
- $R$  = caduta di tensione di tipo resistivo;
- $L \cdot \frac{dI}{dt}$  = tensione causata da fenomeni induttivi;
- $k_e \cdot \omega = e$  = f.e.m.i. provocata dalla rotazione del rotore.

Equilibrando le coppie presenti nel modello meccanico otteniamo:

$$k_{me} \cdot I - C_{res} - k_{att} \cdot \omega - J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0 \quad 32$$

in cui:

- $k_{me} \cdot I$  = coppia magnetoelettrica causata dalla corrente che circola nell'avvolgimento rotorico;
- $C_{res}$  = coppia resistente esercitata dall'organo meccanico che deve essere messo in rotazione;
- $k_{att} \cdot \omega$  = coppia dovuta all'attrito delle parti in movimento;
- $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$  = coppia dovuta all'inerzia: si oppone alla coppia motrice in fase di accelerazione; è nulla a velocità costante.

Analizzando il sistema a regime, cioè con corrente costante, per cui si annulla il termine  $L \cdot \frac{dI}{dt}$ , e con velocità costante, per cui si annulla il termine  $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ , si ottiene:

$$I = \frac{V_g}{R} - \frac{k_e}{R} \cdot \omega \quad 33$$

La coppia motrice, che è rappresentata dalla coppia magnetoelettrica, assume la seguente espressione:

$$C_{me} = \frac{k_{me} \cdot V_g}{R} - \frac{k_{me} \cdot k_e}{R} \cdot \omega \quad 34$$

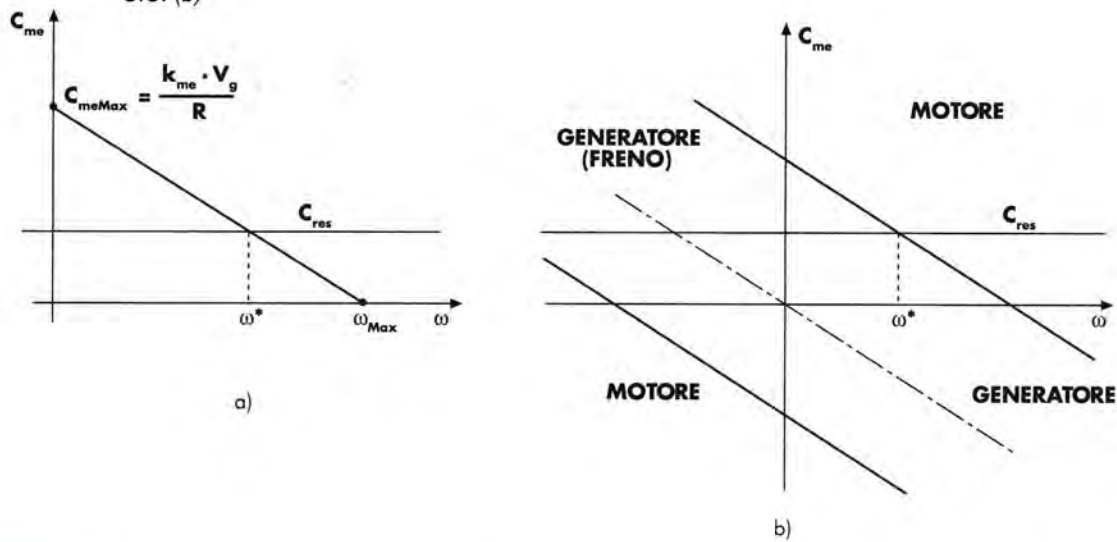
Dalla 34 si nota che in un motore elettrico la coppia motrice generata dalla forza magnetoelettrica è composta da due termini. Il primo rappresenta il valore massimo, cioè quello presente quando il rotore è fermo ( $\omega = 0$ ), il secondo dipende dalla velocità. Si noti come il valore di  $C_{me}$  diminuisca con l'aumentare della velocità. Il comportamento meccanico del motore è rappresentato mediante la caratteristica riportata in figura 11a.



La **figura 11b** consente di descrivere il comportamento meccanico della macchina elettrica sia come generatore, sia come motore.

**Figura 11**

Caratteristica meccanica di un motore in C.C. (a); condizioni di funzionamento della macchina in C.C. (b)



**Modello sistemico del motore in c.c.**

Il motore in corrente continua è frequentemente utilizzato nei sistemi di controllo; per tale ragione può risultare particolarmente utile analizzare il suo comportamento sotto forma di schema a blocchi, come si usa fare nello studio dei sistemi.

Abbiamo già visto che il sistema elettromeccanico del motore (**figura 10**) è descritto dalle equazioni **31** e **32**.

Osservando queste due relazioni si nota che per studiare il comportamento di un motore durante i transitori, cioè quando varia la corrente o la velocità angolare è necessario risolvere due equazioni differenziali, operazione piuttosto impegnativa. Una alternativa può essere quella di analizzare il sistema utilizzando la trasformata di Laplace e convertire le equazioni differenziali del dominio del tempo in equazioni algebriche nel dominio della variabile  $s$ .

In tal caso le relazioni si trasformano in:

$$V_g(s) - R \cdot I(s) - s \cdot L \cdot I(s) - k_e \cdot \omega(s) = 0 \quad 35$$

$$k_{me} \cdot I(s) - C_{res}(s) - k_{att} \cdot \omega(s) - s \cdot J \cdot \omega(s) = 0 \quad 36$$

Il motore in corrente continua va inteso come un sistema che ha per ingresso la tensione  $V_g(s)$  e fornisce come uscita la velocità  $\omega$ .

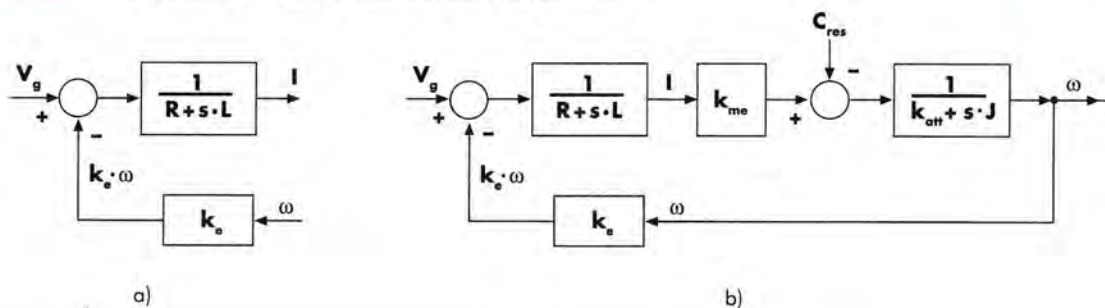
Se ricaviamo  $I(s)$  dalla **35** e lo sostituiamo nella **36**, otteniamo:

$$I(s) = \frac{V_g - k_e \cdot \omega(s)}{R + s \cdot L} \quad 37$$

Questa formula può essere rappresentata mediante lo schema a blocchi di **figura 12a**.

**Figura 12**

Modello sistemico del motore in corrente continua



Esplicitando la velocità  $\omega$  dalla [36](#) si ottiene.

$$\omega(s) = \frac{k_{me}}{k_{att} + s \cdot J} \cdot I - \frac{C_{res}}{k_{att} + s \cdot J} \quad 38$$

Mettendo assieme la [37](#) e la [38](#) e tenendo conto dello schema a blocchi parziale di [figura 12a](#), si può ottenere lo schema a blocchi completo di [figura 12b](#), che rappresenta il funzionamento completo di un motore in corrente continua.

## 5 Eccitazione e pilotaggio dei motori C.C.

Nel motore elettrico esaminato in precedenza si è ipotizzato che il campo magnetico sia generato da un magnete.

Questo tipo di motori appartengono alla categoria dei **motori a magneti permanenti** e costituiscono una categoria di ampia utilizzazione dei sistemi di controllo e automazione specie quando non sono richieste potenze molto elevate.

In alternativa ai motori a magneti permanenti sono disponibili altri motori in cui il campo magnetico viene ottenuto mediante un avvolgimento percorso da corrente; questo avvolgimento prende il nome di **avvolgimento di eccitazione** per indicare che produce il flusso magnetico  $\Phi_c$  necessario al funzionamento del motore. Detto flusso agendo sull'altro avvolgimento detto avvolgimento indotto o **avvolgimento di armatura** genera una coppia magnetoelettrica  $C_{me}$  che lo fa girare.

L'eccitazione di un motore C.C. può avvenire nei seguenti modi:

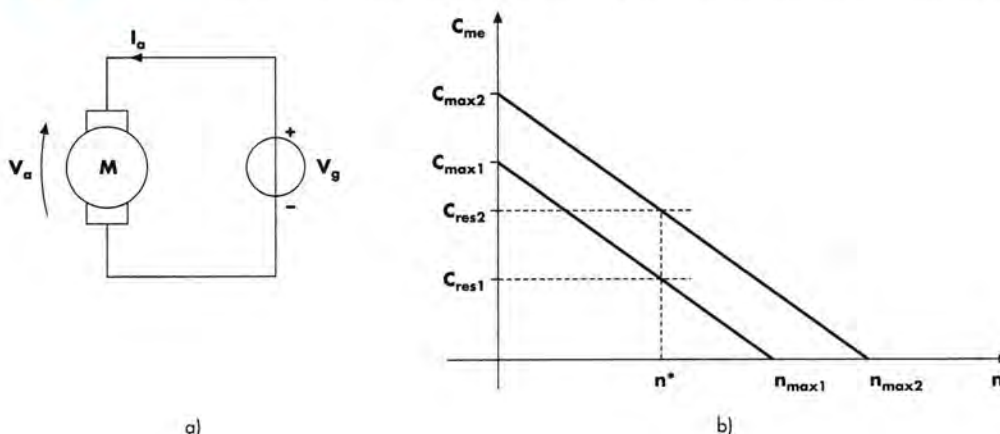
- eccitazione a magneti permanenti;
- eccitazione separata;
- eccitazione in parallelo;
- eccitazione in serie;
- eccitazione composta.

**Eccitazione a magneti permanenti**

I motori a magneti permanenti sono privi dell'avvolgimento di eccitazione e il flusso magnetico è generato dal magnete permanente. Lo schema elettrico è riportato in [figura 13a](#) e la coppia motrice può essere calcolata con la formula [39](#); in cui si evince che la coppia dipende: sia dalla corrente che circola nell'avvolgimento di armatura sia dal flusso concatenato dallo stesso avvolgimento.

**Figura 13**

*Motore a magneti permanenti: schema elettrico (a); caratteristica meccanica (b)*





Il legame fra coppia motrice e corrente di armatura è rappresentato dalla formula **39** in cui  $\Phi_C$  è il flusso magnetico generato dal magnete e concatenato dall'avvolgimento di armatura. Essendo il flusso  $\Phi_C$  costante la coppia aumenta proporzionalmente alla corrente di armatura.

$$C_{me} = k_\Phi \cdot \Phi_C \cdot I_a$$

La corrente di armatura diminuisce con l'aumentare della velocità in quanto con essa aumenta la f.e.m.i. e quindi la caduta di tensione sull'avvolgimento di armatura, come indicato dalla formula **40**.

$$I_a = \frac{V_g}{R_a} - \frac{k_a}{R_a} \cdot n$$

Sostituendo la **40** nella **39** si ottiene la **41** che può essere compattata nella formula **42**:

$$C_{me} = \frac{k_\Phi \cdot \Phi_C \cdot V_g}{R_a} - \frac{k_\Phi \cdot \Phi_C \cdot k_a}{R_a} \cdot n$$

$$C_{me} = C_{Max} - k_n \cdot n$$

La caratteristica meccanica descritta dalla formula **42** è rappresentata graficamente nella **figura 13b** in cui si nota che la coppia motrice diminuisce linearmente con l'aumentare della velocità  $n$  espressa in giri al minuto.

La relazione fra  $n$  [giri/1'] e la velocità angolare  $\omega$  [rad/s] è espressa dalla formula:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

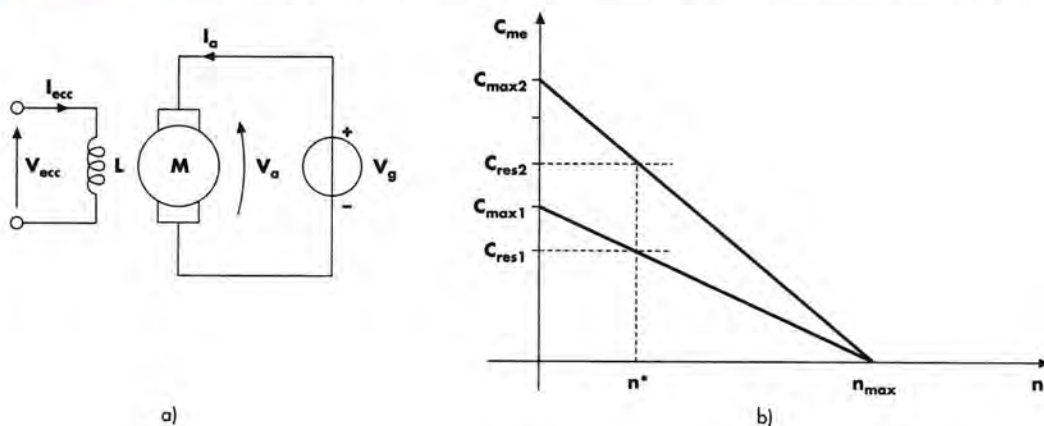
Analizzando la formula **41** si nota che aumentando la tensione di alimentazione  $V_g$  la retta trasla verso l'alto. Questo consente di mantenere costante la velocità se aumenta la coppia resistente  $C_{res}$ . Analogamente la retta trasla verso il basso se  $V_g$  diminuisce; consentendo di mantenere costante la velocità se la coppia resistente diminuisce (**figura 13b**).

Il circuito del motore a eccitazione separata è rappresentato in **figura 14a**.

**Eccitazione separata**

**Figura 14**

**Motore a eccitazione separata: schema elettrico (a); caratteristica meccanica (b)**



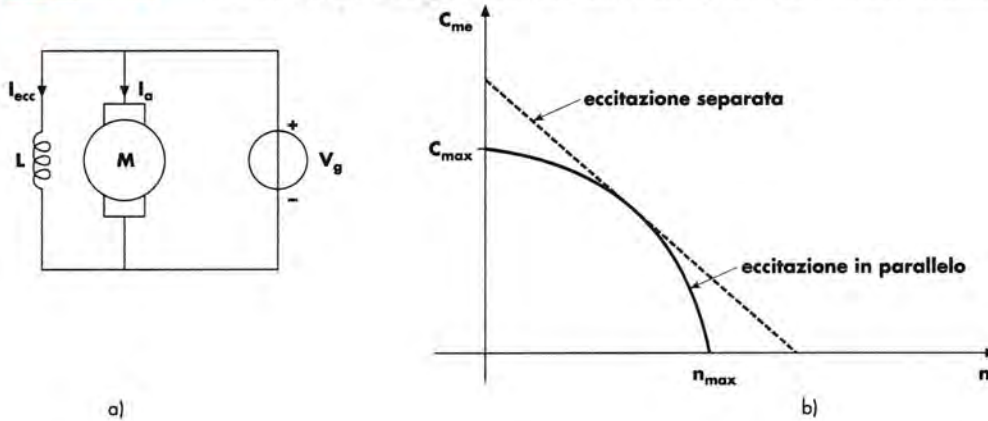
Il suo comportamento è uguale a quello del motore a magnete permanente se viene tenuta costante la tensione  $V_{ecc}$  con cui è alimentato l'avvolgimento di eccitazione. Se, invece, varia il valore di  $V_{ecc}$  si ottiene una variazione del flusso  $\Phi_C$ . Analizzando la formula **41** si nota che un aumento di  $\Phi_C$  produce una rotazione della caratteristica meccanica che fa aumentare il valore della coppia massima  $C_{Max}$  e mantiene costante la velocità massima  $n_{Max}$  come si vede in **figura 14b**. In questo caso è possibile regolare la velocità al variare della coppia resistente agendo sulla tensione dell'avvolgimento induttore.

**Eccitazione in parallelo**

L'eccitazione in parallelo si ha quando l'avvolgimento di eccitazione viene collegato in parallelo all'avvolgimento di armatura come indicato in **figura 15a**. La caratteristica meccanica riportata in **figura 15b** risulta leggermente incurvata rispetto al caso di eccitazione separata con conseguente riduzione dei valori massimi della coppia e della velocità.

**Figura 15**

*Motore a eccitazione in parallelo: schema elettrico (a); caratteristica meccanica (b)*



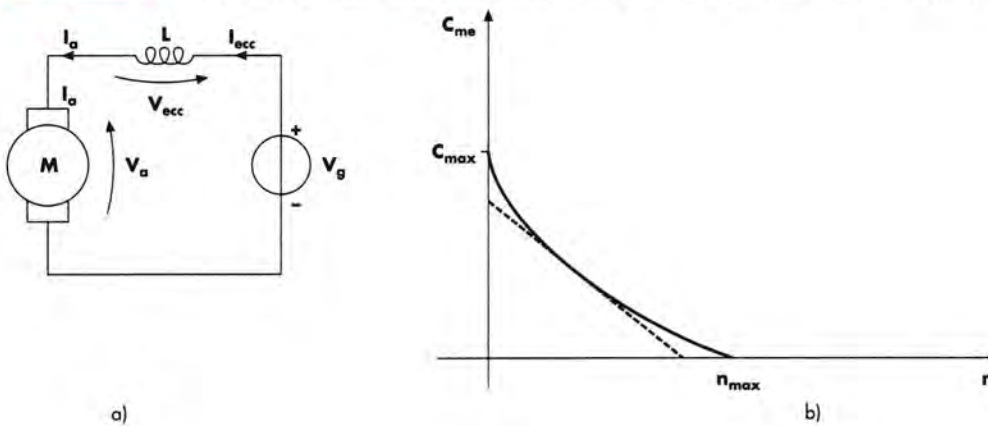
Si può notare che ad alte velocità è possibile avere piccole variazioni di velocità con grandi variazioni della coppia resistente.

**Eccitazione in serie**

L'eccitazione in serie si ha quando i due avvolgimenti sono collegati in serie come indicato in **figura 16a**, per cui sono percorsi dalla stessa corrente.

**Figura 16**

*Motore con eccitazione in serie: schema elettrico (a); caratteristica meccanica (b)*



Esprimendo il flusso concatenato in funzione della corrente di eccitazione come indicato nella formula **44** e sostituendo nella **39** si ottiene la formula **45**:

$$\Phi_C = L \cdot I_{ecc} \quad 44$$

$$C_{me} = k_\Phi \cdot L \cdot I_{ecc} \cdot I_a \quad 45$$

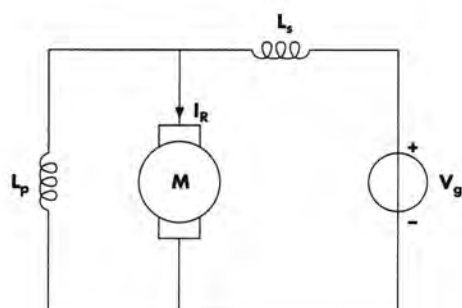
Essendo  $I_{ecc} = I_a$ , dalla **45** si deduce che la coppia motrice è proporzionale al quadrato della corrente. Questa corrente assume il valore massimo quando il rotore è fermo e diminuisce con l'aumentare della velocità in quanto  $I_a = \frac{V_g - V_{ecc}}{R_a + R_{ecc}} - \frac{k_a}{R_a + R_{ecc}} \cdot n$

Pertanto la caratteristica ha un andamento incurvato come indicato in **figura 16b**. Si può notare che a basse velocità la velocità varia poco anche con grandi variazioni della coppia resistente.



**Eccitazione composta****Figura 17**

Motore con eccitazione composta

**Pilotaggio e regolazione dei motori C.C.**

Per far girare un motore C.C. è necessario che esso venga collegato a un generatore in corrente continua che può essere una batteria o un alimentatore. Nel gestire il funzionamento di un motore si presentano, principalmente, due esigenze:

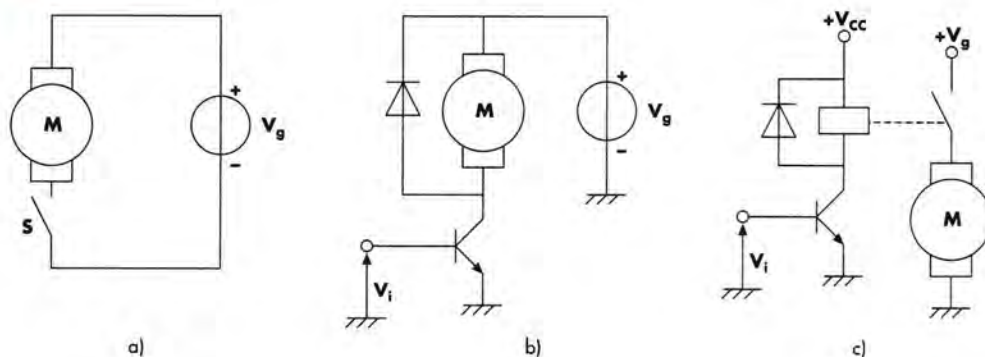
- marcia e arresto;
- inversione di marcia.

**Marcia e arresto**

La marcia e l'arresto si possono ottenere con un opportuno interruttore e la **figura 6** mostra alcune soluzioni tipiche.

**Figura 18**

Marcia e arresto di un motore C.C.: con interruttore manuale (a); con transistor (b); con relè (c)



Nella **figura 18a** viene utilizzato un interruttore manuale. Nella **figura 18b** l'interruttore è costituito da un transistor T che può essere un BJT o un transistor FET. Questa soluzione ha il vantaggio di consentire il funzionamento del motore utilizzando un segnale  $V_i$  di bassa potenza e ottenuto da un circuito di elaborazione elettronica. Nella **figura 18c** è utilizzato un relè comandato da un transistor; soluzione interessante quando il valore della corrente assorbita dal motore è piuttosto elevata.

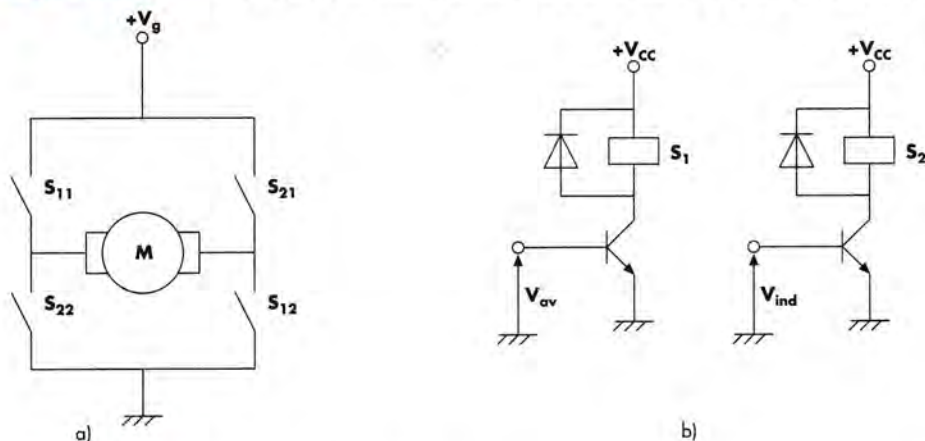
**Inversione di marcia**

L'inversione di marcia serve quando è richiesto che il motore possa girare sia in un verso sia in quello contrario. Il risultato si ottiene invertendo il collegamento dei terminali del motore rispetto a quelli del generatore. Una tipica soluzione è rappresentata dallo schema di **figura 19a** in cui due coppie di contatti, normalmente aperti, sono collegati a ponte insieme al generatore e al motore. Se viene chiusa la coppia  $S_{11}$  e  $S_{12}$  la corrente attraversa il motore da sinistra a destra facendolo girare in un verso. Se invece viene chiusa la coppia  $S_{21}$  e  $S_{22}$  la corrente circola nel motore da destra verso sinistra e il motore gira nel verso

contrario. Le due coppie di contatti non possono essere chiuse contemporaneamente altrimenti si crea un corto circuito sul generatore. Le coppie di contatti sono comandate mediante i circuiti di **figura 19b**, in cui  $V_{av}$  aziona la rotazione “avanti” e  $V_{in}$  quella, “indietro”.

**Figura 19**

Inversione di marcia di un motore C.C.: schema a ponte dei contatti (a); comando dei relè (b)



#### Regolazione della velocità

La regolazione della velocità di un motore in corrente continua può essere ottenuta variando la tensione di alimentazione. La variazione di tale tensione è ottenuta, nella maggior parte dei casi, con la tecnica del PWM (Pulse Width Modulation); in cui la tensione applicata al motore non ha un valore fisso ma è un'onda quadra con duty cycle variabile. Variando il duty cycle varia il valore medio della tensione di alimentazione. Per evitare il funzionamento a singhiozzo è necessario che la frequenza dell'onda quadra sia abbastanza alta e che l'inerzia del motore riesca a mantenere costante la velocità.

La **figura 20** mostra un tipico circuito per la regolazione PWM di un motore. Il transistor commuta continuamente da ON a OFF e viceversa per effetto del segnale  $V_{PWM}$ . In questo modo la tensione sul motore passa dal valore massimo  $V_g$  (quando il transistor conduce) a un valore nullo 0 V (quando il transistor non conduce). Per questo tipo di operazione non può essere utilizzato un relè perché troppo lento e poco affidabile nelle commutazioni veloci. L'effetto del PWM sui terminali del motore equivale a una tensione costante il cui valore è pari al valore medio dell'onda quadra applicata al motore e può essere ricavata mediante la formula seguente:

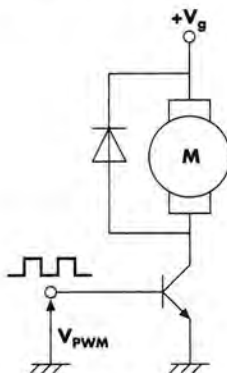
$$V_m = V_g \cdot DC$$

46

Il duty cycle  $DC$  può variare da 0 a 1; in particolare: se  $DC = 0$  il transistor è sempre OFF; se  $DC = 1$  il transistor è sempre ON, se  $DC = 0,5$  il transistor si apre e si chiude con tempi uguali e la tensione sul motore ha un valore medio pari a  $V_g/2$ .

**Figura 20**

Regolazione PWM di un motore C.C.

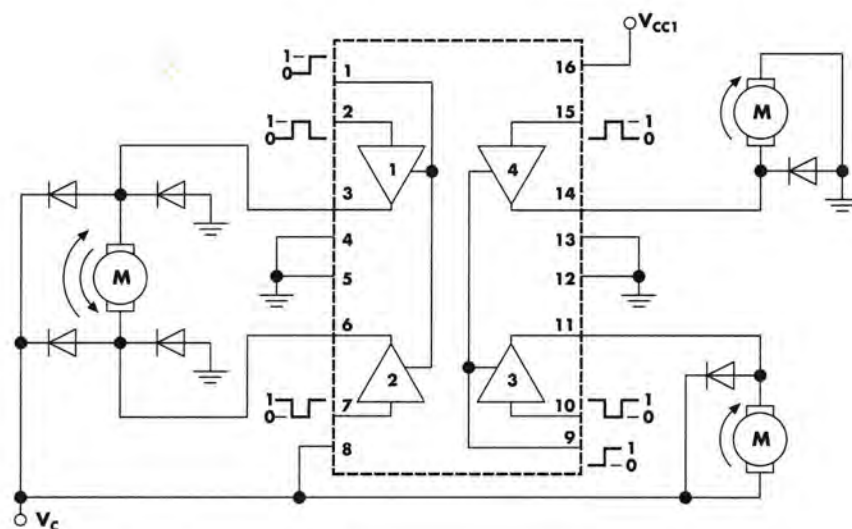


Il segnale  $V_{PWM}$  che comanda il transistor può essere ottenuto in diversi modi: uscita da un oscillatore con duty cycle variabile, segnale fornito da un elaboratore ecc. Per le



operazioni di pilotaggio dei motori C.C. sono disponibili sul mercato integrati specifici di cui l'L293 rappresenta un esempio. In **figura 21** è riportato uno schema, estratto dal data sheet, che mostra le principali applicazioni di tale integrato.

**Figura 21**  
Uso  
dell'integrato  
L293



## 6 Motori passo-passo



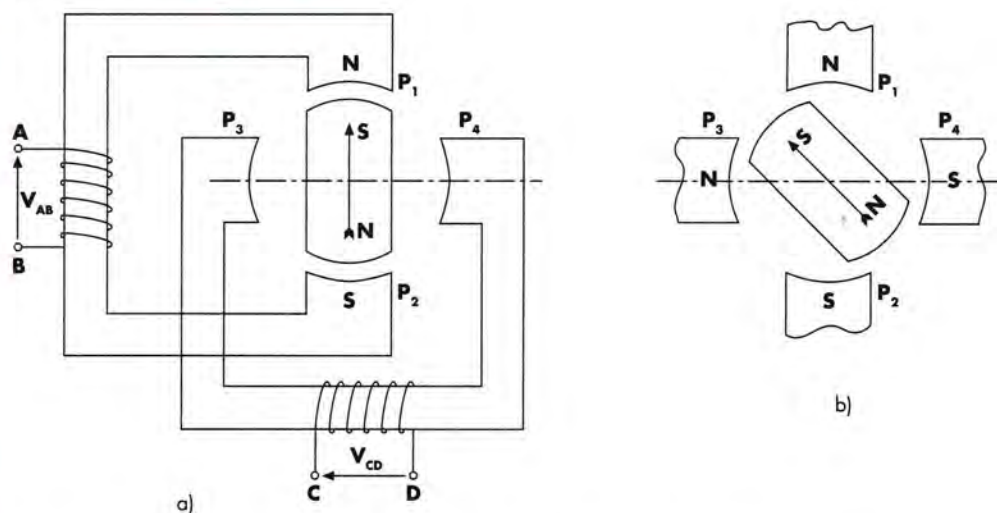
I **motori passo-passo** sono caratterizzati dal fatto che la loro rotazione non è continua ma a scatti; ogni scatto prende il nome di *passo* (*step*).

In base al principio di funzionamento, i motori passo-passo possono essere:

- a magnete permanente;
- a riluttanza variabile.

Il principio di funzionamento dei **motori passo-passo a magnete permanente** è schematizzato nella **figura 22a**.

**Figura 22**  
Motore  
passo-passo:  
principio di  
funzionamento  
(a); posizione  
del rotore  
dopo un  
passo (b)



**Struttura del  
motore passo-  
passo**

In essa si notano due elettromagneti a forma di C, ognuno dei quali ha un avvolgimento che serve a generare il campo magnetico e due espansioni polari (*poli magnetici*). L'avvolgimento che fa capo ai terminali A e B appartiene al magnete con le espansioni

### Alimentazione degli avvolgimenti statorici

### Posizioni del rotore

polari  $P_1$  e  $P_2$ ; mentre l'avvolgimento che fa capo a C e D appartiene al magnete con espansioni polari  $P_3$  e  $P_4$ . I due magneti sono fissi e costituiscono lo statore del motore. Il rotore è un magnete permanente posizionato fra le quattro espansioni polari che eserciteranno la loro forza di attrazione o repulsione sui poli magnetici del rotore. Contrariamente ai poli del rotore, che è un magnete permanente, i poli magnetici dello statore possono cambiare la loro polarità, da nord a sud, o viceversa, cambiando il verso delle tensioni  $V_{AB}$  e  $V_{CD}$ . Se, per esempio,  $V_{AB}$  è positiva  $V_{CD}$  è nulla,  $P_1$  è un nord e  $P_2$  è un sud; mentre  $P_3$  e  $P_4$  non hanno polarità perché manca l'alimentazione al magnete. Per individuare il verso del campo magnetico prodotto dalla corrente che circola nell'avvolgimento, si può usare la regola della mano destra: il pollice indica il verso del campo magnetico se le altre quattro dita sono orientate a indicare il verso di circolazione della corrente. In tale situazione il rotore si posiziona col suo sud in alto e con il nord in basso e, quindi, col suo asse magnetico disposto verticalmente. Ricordiamo che poli con nome diverso si attraggono e poli con lo stesso nome si respingono.

Se applichiamo una tensione positiva a entrambi gli avvolgimenti avremo:  $P_1 = \text{nord}$ ;  $P_2 = \text{sud}$ ;  $P_3 = \text{nord}$  e  $P_4 = \text{sud}$ . In tale condizione il sud del rotore viene attratto da  $P_1$  e  $P_3$  mentre il polo nord è attratto da  $P_2$  e  $P_4$ ; pertanto l'asse magnetico del rotore si pone in posizione inclinata come indicato in **figura 22b**.

Se si ritornasse alle condizioni di alimentazione della situazione precedente il rotore tornerebbe indietro posizionandosi verticalmente.

Dalle precedenti considerazioni si desume che è possibile far assumere diverse posizioni al rotore cambiando le condizioni di alimentazione dei due avvolgimenti. Inoltre, scegliendo in modo opportuno la sequenza di questi cambiamenti, è possibile far assumere al rotore la sequenza di posizioni che gli consentono di fare il giro completo anche se la rotazione è a scatti con passo di  $45^\circ$ . Nella **tabella 2** è riportata la sequenza delle combinazioni per le due alimentazioni al fine di ottenere un giro completo.

Se le alimentazioni assumono le combinazioni che si susseguono dall'alto verso il basso, la rotazione è antioraria; se si susseguono dal basso verso l'alto, la rotazione è oraria.

**Tabella 2**

Posizioni del rotore al variare delle condizioni di alimentazione

n°	$V_{AB}$	$V_{CD}$	Posizione rotore	Verso antiorario	Verso orario
1	+	○	↑	↓	↑
2	+	+	↖		
3	○	+	←		
4	-	+	↙		
5	-	○	↓		
6	-	-	↘		
7	○	-	→		
8	+	-	↗		
1	+	○	↑		
2	+	+	↖		
3	○	+	←		
4	-	+	↙		



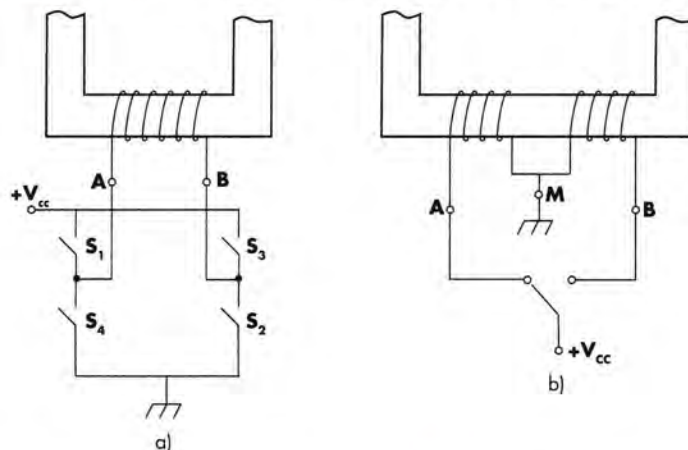
Da quanto visto in precedenza si può notare che il funzionamento del motore passo-passo richiede una continua inversione delle polarità dei magneti che costituiscono lo statore, ossia una continua inversione delle correnti nei due avvolgimenti statorici. I modi per invertire le correnti statoriche sono due e distinguono i motori passo-passo a magnete permanente in:

- motori bipolari;
- motori unipolari.

#### Motori bipolari

Nei motori con pilotaggio bipolare ogni avvolgimento statorico ha due terminali come indicato nella figura 23a; e l'inversione della tensione  $V_{AB}$  è ottenuta mediante un circuito a ponte con quattro interruttori elettronici:  $S_1, S_2, S_3, S_4$ . Quando  $S_1$  e  $S_2$  sono chiusi con  $S_3$  e  $S_4$  aperti  $V_{AB}$  è positiva, mentre se sono chiusi  $S_3$  e  $S_4$  con  $S_1$  e  $S_2$  aperti  $V_{AB}$  è negativa.

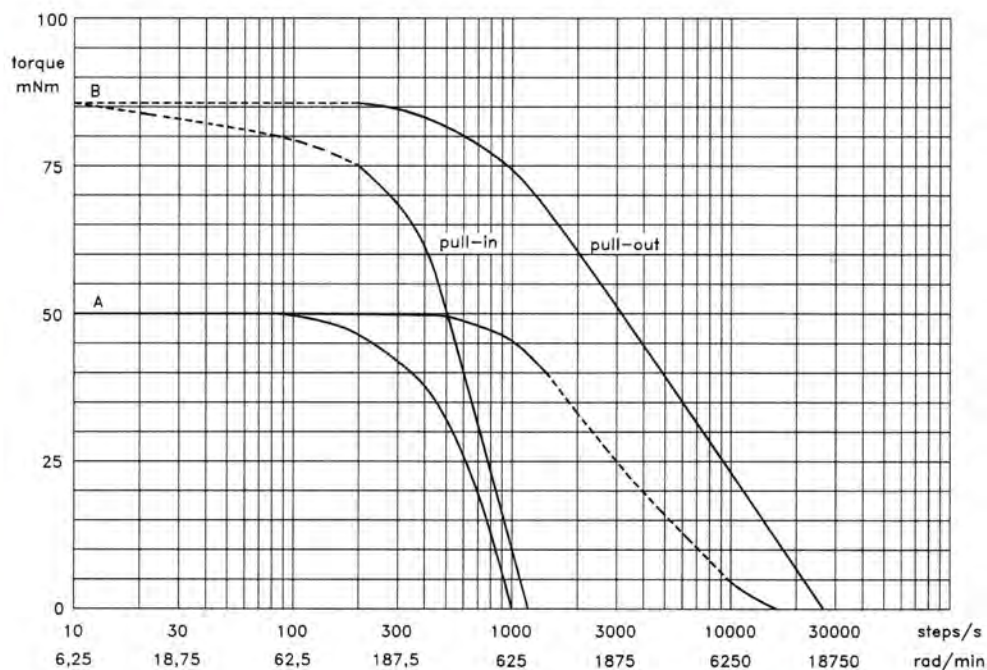
**Figura 23**  
Pilotaggio dei motori passo-passo: bipolare (a); unipolare (b)



#### Motori unipolari

Nei motori con pilotaggio unipolare ogni avvolgimento statorico ha tre terminali: due estremi A e B e uno centrale M come indicato in figura 23b. L'avvolgimento è suddiviso in due parti, una fra il terminale A e il centrale M, l'altra fra i terminali B e M. I due pezzi di avvolgimento sono alimentati uno alla volta mediante l'uso di un commutatore elettronico a due posizioni. Il terminale centrale M è collegato a massa mentre gli altri due possono essere collegati a  $V_{CC}$  uno alla volta mediante il commutatore. Quando è collegato il terminale A il campo magnetico ha un verso; quando è collegato il B, il campo magnetico ha verso contrario.

**Figura 24**  
Relazione tra coppia e velocità per motori passo-passo



Confrontando i due tipi di motore possiamo constatare che i motori bipolari richiedono un circuito di pilotaggio più complesso rispetto ai motori unipolari, mentre questi ultimi hanno lo svantaggio di utilizzare mezzo avvolgimento alla volta per cui, a parità di corrente statorica, la coppia motrice sviluppata è minore.

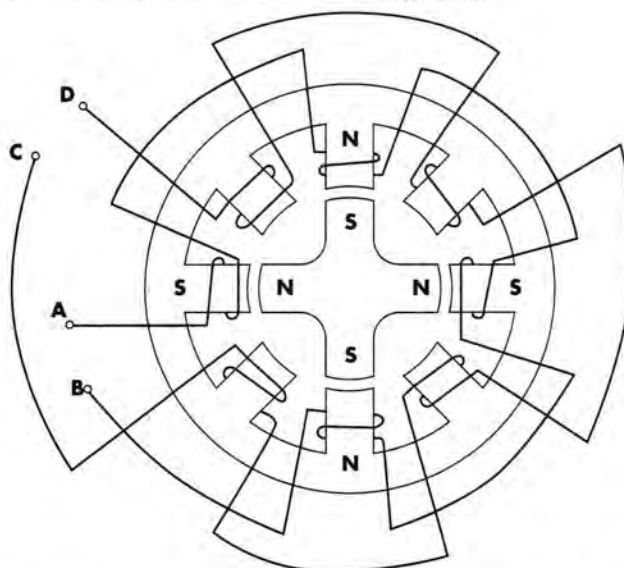
In entrambi i casi la coppia motrice aumenta con l'aumentare della corrente, in quanto questa fa aumentare l'induzione magnetica sulle espansioni polari dello statore. Occorre tuttavia tener presente che, oltre un certo valore della corrente, il materiale ferromagnetico satura e l'induzione non aumenta più anche se si aumenta la corrente. Un'altra grandezza che influenza il valore della coppia è la frequenza delle commutazioni in quanto con l'aumentare di tale frequenza il tempo fra una commutazione e la successiva diminuisce fino a non consentire alla corrente di raggiungere il valore nominale. Poiché la velocità di rotazione dei motori passo-passo aumenta con la frequenza del clock che scandisce le commutazioni, si può facilmente dedurre che, oltre una certa velocità, la coppia tende a diminuire. Valori tipici della corrente nominale nei motori passo-passo vanno da 3 A a 5 A.

In **figura 24** è riportato il grafico delle *caratteristiche coppia-velocità* (torque-step/s) dei vari tipi di motore. Le curve A si riferiscono ai motori unipolari, le curve B ai motori bipolari.

Il modello di motore passo-passo esaminato nella **figura 22** ha un angolo di passo di  $45^\circ$ , eccessivo per qualunque applicazione. Una riduzione dell'angolo di passo può essere ottenuta facilmente con opportuni accorgimenti costruttivi. La **figura 25** mostra la struttura di un motore con passo di  $1/16$  di giro invece di  $1/8$  di giro come in **figura 22**. Confrontando la **figura 25** con la **figura 22** si nota che lo statore ha 8 poli invece di 4 e il rotore ne ha 4 invece di 2. Gli avvolgimenti statorici sono ancora 2 e fanno capo ai terminali A-B e C-D. Ogni avvolgimento produce alternativamente un nord e un sud sulle proprie espansioni polari. La situazione riportata in **figura 25** ipotizza che  $V_{AB}$  sia positiva e  $V_{CD} = 0$ , per questo sono attivi solo i poli alimentati da  $V_{AB}$ . Se vengono alimentati entrambi gli avvolgimenti con  $V_{AB} > 0$  e  $V_{CD} > 0$ , il rotore gira di  $1/16$  di giro perché i suoi sud vengono attratti dai nord dello statore, che sono generati sia dall'avvolgimento A-B sia dall'avvolgimento C-D. Con semplici considerazioni si può ricavare una tabella simile alla **tabella 2** per indicare le 16 posizioni del rotore al variare delle combinazioni dei valori assunti da  $V_{AB}$  e  $V_{CD}$ .

Riduzione  
dell'angolo di  
passo

**Figura 25**  
Motore con  
passo di  $1/16$   
di giro



Perdita di passo

Se il rotore non riesce a effettuare lo spostamento di un passo con la stessa velocità con cui cambia la combinazione delle alimentazioni il motore *perde il passo*, con conseguente malfunzionamento. Le cause della perdita di passo sono: frequenza elevata, coppia insufficiente, inerzia del rotore elevata.



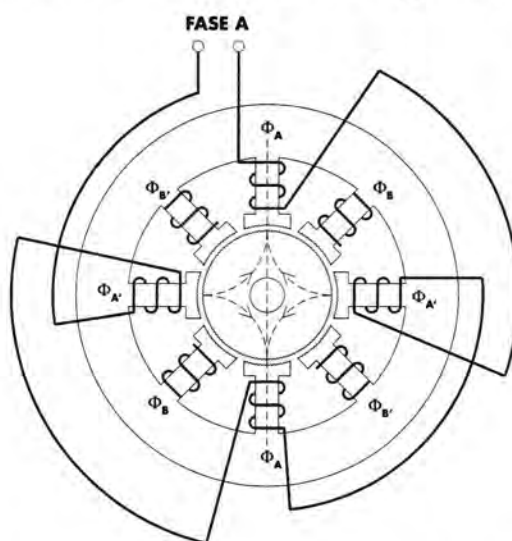
**Motori passo-passo a riluttanza variabile**

I motori passo-passo a riluttanza variabile hanno lo statore costruttivamente uguale a quello dei motori a magnete permanente con varie espansioni polari avvolte come si può vedere in **figura 26**.

Il rotore è, invece, costituito da materiale ferromagnetico a forma cilindrica con superficie dentellata, i cui denti sono in una particolare relazione geometrica con le espansioni polari dello statore. Quando un avvolgimento statorico è percorso da corrente, le corrispondenti espansioni polari esercitano sul rotore una coppia che lo fa girare nella posizione di minima riluttanza. Alternando l'alimentazione degli avvolgimenti il rotore si muove di piccoli passi cercando sempre la posizione a riluttanza minima. L'uso dei motori a riluttanza variabile è molto meno frequente rispetto a quello dei motori a magnete permanente; ed è limitato ai casi in cui sono richieste una piccola coppia e rapide rotazioni continue.

**Figura 26**

Motore passo-passo a riluttanza variabile.



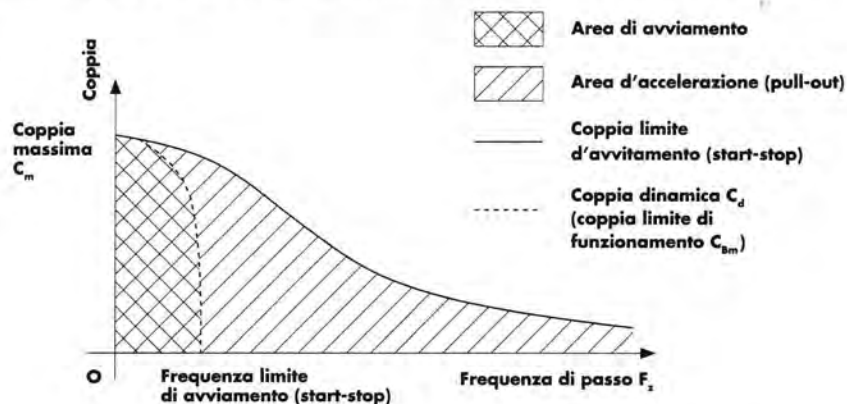
**Parametri caratteristici dei motori passo-passo**

I principali parametri che caratterizzano le prestazioni di un motore passo-passo sono i seguenti:

- **angolo di passo:** angolo di rotazione corrispondente a un passo; viene espresso in gradi;
- **numero di passi per giro:** indica quanti passi deve effettuare il rotore per compiere un giro;
- **velocità di rotazione:** è espressa in giri al minuto [giri/min];
- **velocità angolare:** velocità espressa in radianti al secondo [rad/s];
- **accelerazione angolare:** rappresenta la variazione di velocità angolare per ogni secondo;
- **frequenza di comando:** è la frequenza degli impulsi che scandiscono i vari passi;
- **marcia sincrona:** è la rotazione del motore senza perdita di passi;
- **coppia a vuoto:** coppia statica massima quando il motore non è alimentato, rappresenta la massima coppia applicabile meccanicamente senza farlo ruotare [Nm];

**Figura 27**

Caratteristica dei motori passo-passo



- *coppia di mantenimento*: come la precedente, quando lo statore è alimentato a frequenza nulla;
- *area di avviamento*: chiamata anche di pull-in, rappresenta l'area racchiusa fra la coppia massima  $C_m$  e la frequenza limite di avviamento (figura 27);
- *coppia limite di avviamento*: definita come coppia start-stop (figura 27);
- *frequenza limite di avviamento*: detta anche frequenza start-stop (figura 27);
- *area di accelerazione*: detta anche pull-out (figura 27);
- *coppia di accelerazione*: coppia necessaria a vincere l'inerzia del rotore;
- *tempo di accelerazione*: è necessario perché la velocità passi da un valore a un altro;
- *coppia dinamica*: detta anche *coppia limite di funzionamento* (figura 27);
- *potenza utile*: è data dal prodotto della velocità angolare  $\omega$  per la coppia dinamica  $C_m$ ;
- *rendimento*: rapporto fra la potenza meccanica utile  $P_u$  e la potenza elettrica assorbita  $P_a$ .

Moduli per motori passo-passo

Per far funzionare un motore passo-passo è necessario un circuito in grado di fornire la giusta sequenza delle condizioni di alimentazione per i due avvolgimenti. Progettare e realizzare un tale circuito risulta piuttosto impegnativo, per cui è conveniente ricorrere a circuiti integrati dedicati. In commercio ve ne sono diversi e a titolo di esempio ricordiamo:

- la coppia L297 (controller) e L298 (driver) della SGS;
- MC3479 (driver) della Motorola.

Le figure 28 e 29 mostrano gli schemi applicativi dei suindicati integrati.

Figura 28 Circuito di controllo del motore passo-passo bifase bipolare

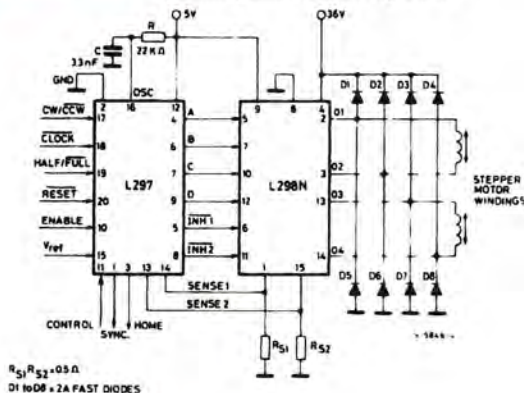
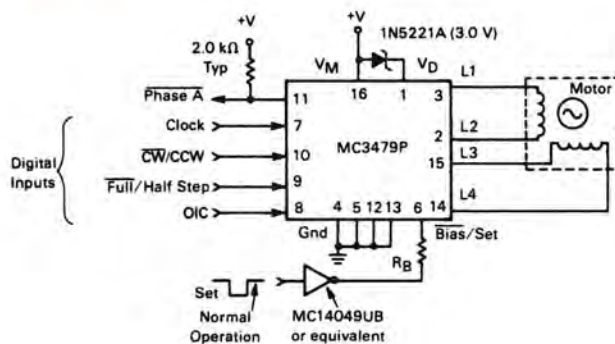


Figura 29 Circuito integrato dedicato MC3479



## 7 Motori speciali

Oltre ai motori fin qui visti, sul mercato esistono altri tipi di motori che vengono sempre più frequentemente utilizzati in particolari applicazioni.

In questo paragrafo si accenna al *motore brushless* e al *motore lineare a induzione*, in quanto particolarmente utilizzati negli azionamenti elettrici.

Motore brushless

Il **motore brushless** (senza spazzole) è un motore a corrente continua costituito da un rotore a magneti permanenti e uno statore su cui viene realizzato l'avvolgimento. È stato sviluppato per sopperire agli inconvenienti legati al sistema a collettore utilizzando un invertitore elettronico invece di quello meccanico dei tradizionali motori a corrente continua.

Dal punto di vista costruttivo l'induttore, a magneti permanenti, si trova sul rotore. I tipi di magneti utilizzati sono a terre rare o ceramici in ferrite.



L'uso dei magneti a terre rare, di costo più elevato, permette di ottenere motori con prestazioni migliori (alta velocità di risposta, alto rendimento, massima compattezza) rispetto a quelli che utilizzano magneti ceramici in ferrite.

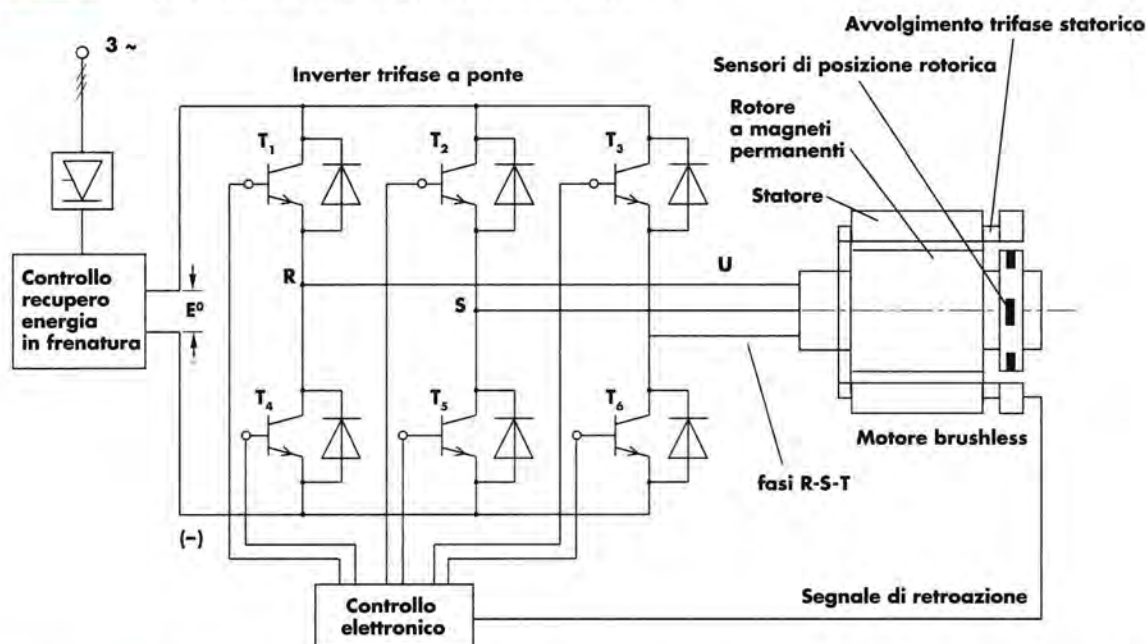
L'indotto, situato sullo statore, è costituito da un avvolgimento polifase aperto simile a quello realizzato nei motori a campo rotante.

Il numero di fasi, per limitare il costo sia del motore sia dell'elettronica di alimentazione, raramente è superiore a due oppure a tre.

Inoltre, nei motori brushless è necessario inserire un insieme di trasduttori di posizione, in numero pari a quello delle fasi, per rilevare la posizione assoluta dell'albero e decidere, di conseguenza, l'alimentazione degli avvolgimenti di statore.

In [figura 30](#) viene riportato, a titolo di esempio, un motore brushless trifase con il relativo schema di azionamento. Tra le *principali applicazioni* del motore brushless si ricordano quelle relative ad azionamenti che necessitano di elevata dinamica e precisione, quali equipaggiamenti su macchine a controllo numerico e robot, oltre a tutte quelle applicazioni in cui si vogliono affidabilità, riduzione di manutenzione, silenziosità, peso e ingombro ridotti, alta velocità ecc.

**Figura 30** Schema di azionamento per motore brushless trifase



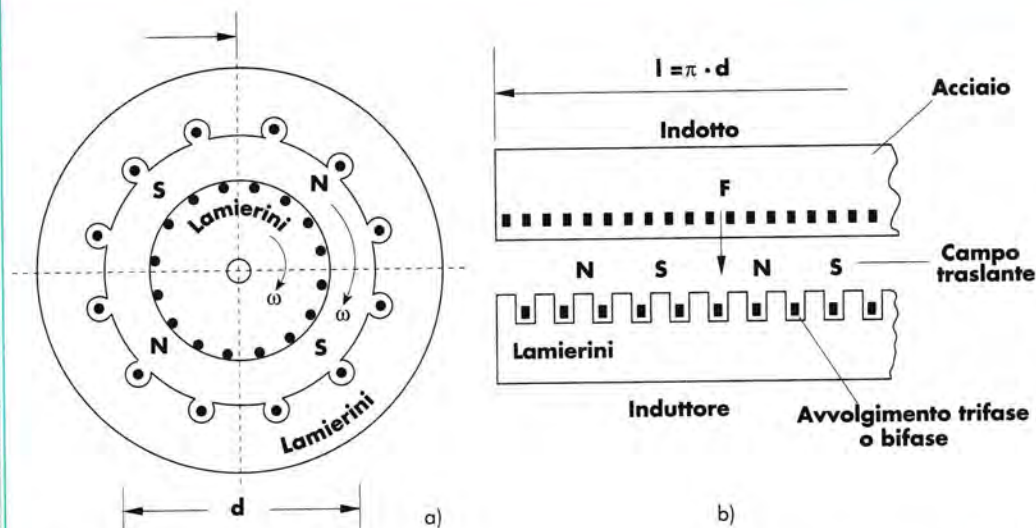
#### Motore lineare a induzione

Il **motore lineare a induzione** (LIM) consente di ottenere direttamente, senza l'intermediazione di congegni meccanici, un moto di traslazione anziché un moto rotatorio e viene utilizzato in tutti quei servomeccanismi che necessitano di movimenti rettilinei come porte scorrevoli, ponti mobili, trasportatori orizzontali e verticali, rampe per la partenza di aerei sulle portaerei e, soprattutto, nella trazione elettrica nel campo delle alte velocità.

Il *principio di funzionamento* del LIM è simile a quello del motore asincrono rotante. Costruttivamente si può pensare di tagliare un normale motore asincrono ([figura 31a](#)) secondo un piano passante per l'asse di rotazione; sviluppando nel piano rotore e statore, così sezionati, risulta una disposizione costruttiva, rappresentata in [figura 31b](#), nella quale il campo magnetico induttore viene a configurarsi non più come rotante, ma come un campo di traslazione che scorre rettilineamente lungo il traferro.

Il *sistema induttore* della macchina è costituito da una struttura magnetica piana di lunghezza  $l = 2 \cdot p \cdot \tau$ , sulla quale è distribuito un avvolgimento trifase alimentato da una terna simmetrica di tensioni.

**Figura 31**  
Motore LIM



Con riferimento alla teoria del motore asincrono trifase si dimostra che la velocità di traslazione del campo induttore dipende dal passo polare  $\tau$  e dalla frequenza  $f$ :

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad 47$$

Tale relazione indica che, coordinando in modo opportuno la frequenza di alimentazione e il passo polare, è possibile raggiungere velocità di traslazione dell'ordine dei 500 km/h (treni ad alta velocità).

## 8 Altoparlanti

### Altoparlanti

Gli **altoparlanti** sono dispositivi che convertono l'energia elettrica in energia acustica; pertanto il loro uso è esattamente inverso a quello dei microfoni.

L'elemento principale di un altoparlante è una membrana che viene fatta vibrare per mezzo di un segnale elettrico producendo un'onda sonora.

Segue un approfondimento in *Auladigitale*.

I principali parametri caratteristici sono:

- sensibilità o livello sonoro;
- direttività;
- risposta in frequenza;
- potenza;
- efficienza;
- distorsione armonica.

Approfondimenti sugli altoparlanti sono disponibili in *Auladigitale*.



## ▶ TEST DI RIEPILOGO

- 1 Descrivi la legge di Lenz
- 2 Come nasce la forza magnetoelettrica?
- 3 Quanto vale la forza magnetoelettrica che agisce su un conduttore lungo 25 cm, immerso in un campo magnetico con valore dell'induzione  $B = 300 \text{ mT}$ , perpendicolare al conduttore che è percorso da una corrente di 3 A?
- 4 Come varia nel tempo la f.e.m.i. in una spira che ruota in un campo elettromagnetico perpendicolare all'asse di rotazione della spira?
- 5 Nei motori a corrente continua con alimentazione costante, perché la coppia motrice diminuisce con l'aumentare della velocità angolare?
- 6 Come funziona un motore passo-passo a magnete permanente?
- 7 Quale differenza c'è fra i motori passo-passo unipolari e quelli bipolari?
- 8 Quali sono i vantaggi dei motori passo-passo rispetto ai motori in corrente continua nell'ambito dei sistemi di controllo?
- 9 Quale strategia si può usare per variare la velocità di un motore passo-passo?

# Esercizi

## ▶ ESERCIZI SVOLTI

- 1 Un motore in corrente continua a magnete permanente, con resistenza dell'avvolgimento  $R_i = 4 \text{ W}$ , ha fornito in fase di collaudo, con alimentazione a  $24 \text{ V}$ , i seguenti risultati:

- rotore bloccato:  $C_{meMax} = 2 \text{ Nm}$ ;  $I = 4 \text{ A}$ ;
- rotore libero ( $C_{res} = 0$ ):  $n = 1200 \text{ giri/min}$ ;  $I = 0,2 \text{ A}$ .

Ricavare i parametri caratteristici:  $k_{me}$ ,  $k_{att}$ ,  $k_{en}$ .

### Soluzione

Quando il rotore è bloccato  $n = 0$ , la f.e.m.i. vale  $e = 0$  e l'attrito è nullo:  $C_{att} = 0$ . Conoscendo la corrente assorbita e la coppia motrice, è possibile calcolare la costante  $k_{me}$ :

$$k_{me} = \frac{C_{me}}{I} = \frac{2}{4}$$

quindi:  $k_{me} = 0,5 \text{ Nm/A}$ .

Quando il rotore è libero, la coppia motrice serve a vincere l'attrito:  $C_{me} = C_{att}$

$C_{me} = k_{me} \cdot I = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1 \text{ Nm}$ , quindi:  $C_{att} = 0,1 \text{ Nm}$ .

$C_{att} = k_{att} \cdot n$ , da cui:  $k_{att} = \frac{C_{att}}{n} = \frac{0,1}{1200}$ , quindi:  $k_{att} = 8,3 \text{ Nm/(giri/min)}$ .

La f.e.m.i. vale  $e = V_g - R_i \cdot I = 24 - 4 \cdot 0,2 = 23,2 \text{ V}$  ma, essendo  $e = k_{en} \cdot n$ , possiamo ricavare:

$k_{en} = \frac{e}{n} = \frac{23,2}{1200}$ , quindi:  $k_{en} = 0,0193 \text{ V/(giri/min)}$ .

- 2 Un motore in corrente continua a magnete permanente è alimentato a  $24 \text{ V}$ , ha una resistenza di avvolgimento  $R_i = 5 \text{ }\Omega$  e ha fornito, con rotore bloccato, una coppia motrice  $C_{meMax} = 10 \text{ Nm}$ . Quando gira a  $n = 500 \text{ giri/min}$  fornisce una coppia  $C_{me} = 0,5 \text{ Nm}$ . Supponendo trascurabile l'attrito, ricavare la velocità di rotazione e la corrente assorbita quando il suo rotore è sottoposto a una coppia resistente  $C_{res} = 4 \text{ Nm}$ .

### Soluzione

La caratteristica meccanica del motore (vedi figura 11a) può essere descritta dalla seguente relazione:

$$C_{me} = C_{meMax} + \alpha \cdot n$$

in cui  $\alpha$  è il coefficiente angolare della retta  $\alpha = \frac{\Delta C}{\Delta n}$ . Ricordiamo che  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ . Introducendo

i dati a nostra disposizione, possiamo scrivere  $\alpha = \frac{0,5 - 10}{500 - 0} = -0,019 \frac{\text{Nm}}{\text{giri/min}}$ .

La caratteristica meccanica è quindi  $C_{me} = 10 - 0,019 \cdot n$

Se il rotore è sottoposto a una coppia resistente  $C_{res} = 4 \text{ Nm}$ , la coppia motrice deve uguagliare la coppia resistente considerando che l'attrito è trascurabile.

Quindi:  $4 = 10 - 0,019 \cdot n$ , da cui:  $n = \frac{10 - 4}{0,019} = 315 \text{ giri/min}$ .

Quando il rotore è bloccato, la velocità di rotazione è nulla, quindi non c'è f.e.m.i. per cui la corrente è  $\frac{V_g}{R_i} = \frac{24}{5} = 4,8 \text{ A}$ , che produce una coppia  $C_{me} = 10 \text{ Nm}$ . Tenendo conto che

$C_{me} = k_{me} \cdot I$ , possiamo ricavare:  $k_{me} = \frac{C_{me}}{I} = \frac{10}{4,8}$ , ossia  $k_{me} = 2,083 \text{ Nm/A}$ .

Quando la coppia motrice vale  $C_{me} = 4 \text{ Nm}$ , possiamo ricavare:

$$I = \frac{C_{me}}{k_{me}} = \frac{4}{2,083} = 1,92 \text{ A}$$