

## 6 CONTROLLO DI VELOCITÀ DEL MOTORE IN C.C.

### 6.1 Introduzione

La comprensione delle modalità di controllo della velocità del motore in corrente continua è basata sull'analisi delle *caratteristiche di funzionamento statiche*, vale a dire le curve che, a regime, mettono in relazione le grandezze elettriche (tensioni e correnti), la coppia sviluppata e la velocità di rotazione.

Nel seguito si farà riferimento al caso del motore in corrente continua ad eccitazione indipendente, il cui schema elettrico *a regime* è illustrato in Fig. 6.1.

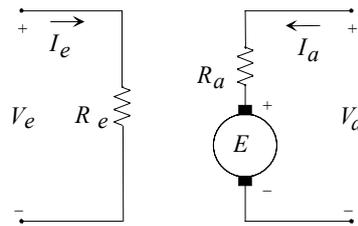


Fig. 6.1 – Motore ad eccitazione indipendente a regime

Le equazioni da considerare nel funzionamento a regime sono:

$$V_e = R_e I_e \quad \Phi_e = L_e I_e \quad \text{tensione/fluxo di eccitazione} \quad (6.1)$$

$$V_a = E + R_a I_a \quad \text{tensione di armatura} \quad (6.2)$$

$$E = k_e \Phi_e \omega_r \quad \text{tensione indotta} \quad (6.3)$$

$$C = k_e \Phi_e I_a \quad \text{coppia} \quad (6.4)$$

$$C = C_r \quad \text{equilibrio dinamico}^1 \quad (6.5)$$

### 6.2 Caratteristica meccanica coppia - velocità

La *caratteristica meccanica* esprime l'andamento  $C - \omega_r$  della coppia sviluppata dal motore in funzione della velocità di rotazione.

Nel caso del motore in c.c. ad eccitazione indipendente, ricavando la corrente di armatura  $I_a$  dalla (6.2) si ottiene:

$$I_a = \frac{V_a - E}{R_a}$$

dalla quale, tenendo conto della (6.3), si ha:

---

<sup>1</sup> Qui  $C_r$  rappresenta la somma di tutte le coppie resistenti.

$$I_a = \frac{V_a - k_e \Phi_e \omega_r}{R_a} \quad (6.6)$$

Sostituendo la (6.6) nella (6.4) si ottiene:

$$C = k_e \Phi_e \left[ \frac{V_a - k_e \Phi_e \omega_r}{R_a} \right] = \frac{k_e \Phi_e V_a}{R_a} - \frac{k_e^2 \Phi_e^2}{R_a} \omega_r \quad (6.7)$$

La (6.7) fornisce la funzione  $C = C(\omega_r)$ , vale a dire proprio la caratteristica meccanica.

Nelle ipotesi di flusso di eccitazione e tensione di armatura costante, tale caratteristica è tipicamente una retta con pendenza negativa, della forma:

$$C(\omega_r) = a - b \omega_r \quad (6.8)$$

con

$$a = C_o = \frac{k_e \Phi_e V_a}{R_a} \quad b = \frac{k_e^2 \Phi_e^2}{R_a} \quad (6.9)$$

come rappresentato in Fig. 6.2.

Il *punto di funzionamento a regime* del motore è individuato dalla intersezione tra la sua caratteristica meccanica e la caratteristica di coppia resistente. In Fig. 6.3 è illustrato il caso di funzionamento a coppia nominale. In particolare, dalla (6.7) è immediato ricavare la *velocità a vuoto*  $\omega_{r0}$ , alla quale si porta il motore quando la coppia resistente è nulla e  $C \cong 0$ :

$$\omega_{r0} = \frac{V_a}{k_e \Phi_e} \quad (6.10)$$

La velocità a vuoto risulta essere direttamente proporzionale alla tensione di armatura ed inversamente proporzionale al flusso.

Nell'espressione (6.8) le costanti  $a$  e  $b$  rappresentano rispettivamente la *coppia di spunto* ( $C_o$ ) e la pendenza della caratteristica; entrambe queste quantità sono, in genere, molto grandi. Pertanto la caratteristica meccanica dei motori in c.c. ad eccitazione indipendente da luogo ad un funzionamento a *velocità pressoché costante al variare del carico* (la variazione di velocità nel funzionamento da vuoto al carico nominale è, tipicamente, dell'ordine del 5%, come illustrato in Fig. 6.3.

E' importante osservare che, affinché la coppia vari linearmente con la velocità, gli altri termini nella (6.7) devono rimanere costanti al variare del carico<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> In particolare si deve ipotizzare che l'aumento di corrente di armatura che si ha al crescere del carico non deve generare effetti di saturazione (che riducono il flusso di eccitazione) né variazione per surriscaldamento della resistenza di armatura.

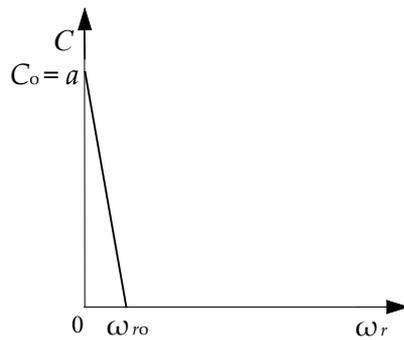


Fig. 6.2 - Caratteristica meccanica

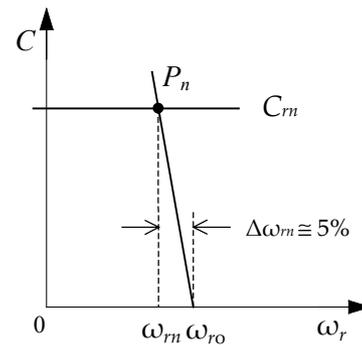


Fig. 6.3 - Punto di lavoro a coppia nominale

### 6.3 Controllo di velocità dei motori in c.c.

Ragionando sulla caratteristica meccanica (6.7) è possibile individuare le seguenti modalità di controllo della velocità di un motore a c.c.:

- controllando la tensione di armatura  $V_a$ ;
- controllando il flusso di eccitazione  $\Phi_e$ ;
- controllando la resistenza d'armatura  $R_a$ .

#### 6.3.1 Controllo della tensione di armatura

In questo metodo di controllo della velocità, la tensione di armatura  $V_a$  viene variata, tenendo costanti la resistenza  $R_a$  del circuito d'armatura e la corrente di eccitazione  $I_e$ , quest'ultima, in genere, al suo valore nominale in modo da garantire la massima capacità di coppia. In Fig. 6.4 è mostrata una possibile soluzione realizzativa nella quale l'avvolgimento di eccitazione è alimentato dalla sorgente in continua a tensione costante ( $V$ ), mentre l'armatura è alimentata in parallelo attraverso un'apparecchiatura, tipicamente un *convertitore statico*, in grado di trasformare potenza in c.c. a tensione costante in potenza in c.c. a tensione variabile<sup>3</sup>.

Dalle (6.8), (6.9) e (6.10) si osserva che la tensione di armatura determina il valore della velocità a vuoto del motore, senza influenzare la pendenza della caratteristica meccanica. Quindi una *variazione della tensione* causa una *traslazione secondo l'asse  $\omega_r$*  della caratteristica.

Se da una condizione di regime viene, ad esempio, aumentata la tensione  $V_a$ , si ha un aumento della corrente d'armatura,  $I_a \uparrow = (V_a \uparrow - E) / R_a$  e della coppia elettromagnetica,  $C \uparrow = k_e \Phi_e (I_a \uparrow)$ , che determina un aumento della velocità. Corrispondentemente si ha un aumento della f.e.m. indotta,  $E \uparrow = K_e \Phi_e (\omega_r \uparrow)$ , che causa una diminuzione della corrente d'armatura; ciò comporta una riduzione della coppia motrice  $C$  fino a che, nella nuova condizione di regime, si ha  $C = C_r$  per una velocità superiore a quella di partenza.

L'effetto di un aumento della tensione d'armatura sulla caratteristica  $C-\omega_r$  è mostrato in Fig. 6.5.

<sup>3</sup> Si tratta di un convertitore cc/cc, il "chopper", successivamente descritto al par. 6.4.2.2.

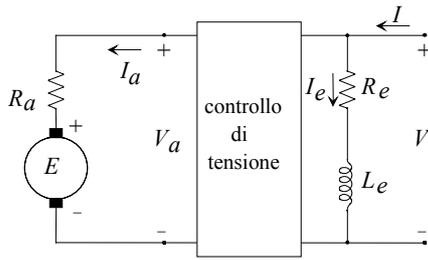


Fig. 6.4 – Controllo della tensione di armatura

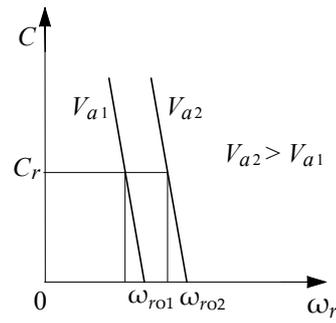


Fig. 6.5 – Effetto della variazione della tensione di armatura sulla caratteristica meccanica

La relazione che lega l'aumento di velocità con quello della tensione di armatura è rappresentato dalla (6.6), qui riscritta come:

$$V_a = R_a I_a + k_e \Phi_e \omega_r \tag{6.11}$$

Considerando la relazione di proporzionalità esistente, a flusso di eccitazione costante, tra la corrente di armatura e la coppia (cioè il carico):

$$C = k_e \Phi_e I_a = C_r \tag{6.12}$$

la (6.11) può anche scriversi:

$$V_a = \bar{k} C_r + k_e \Phi_e \omega_r \tag{6.13}$$

Tale relazione esprime un legame lineare tra la tensione di armatura e la velocità. In particolare, a vuoto ( $C_r = 0 \rightarrow I_a = 0$ ) si tratta di una retta passante per l'origine, mentre a carico si ha una tensione a velocità nulla pari alla caduta  $R_a I_a$  nella resistenza dell'avvolgimento. Tale caduta è tipicamente trascurabile rispetto la tensione di armatura nominale ( $V_{an}$ ), come illustrato in Fig. 6.6<sup>4</sup>.

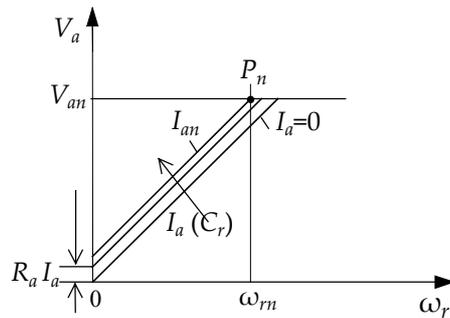


Fig. 6.6 – Andamento tensione di armatura-velocità

<sup>4</sup> Nella figura è illustrato anche il punto di funzionamento "nominale" della macchina, caratterizzato da flusso (corrente) di eccitazione, tensione di armatura e corrente di armatura nominali.

### 6.3.2 Controllo dell'eccitazione

Il controllo dell'eccitazione è più semplice da realizzare ed è meno costoso, poiché avviene ad un livello di potenza notevolmente inferiore. Tuttavia, a causa dell'elevato valore dell'induttanza dell'avvolgimento di eccitazione, la variazione della corrente di eccitazione, e quindi della coppia, avviene lentamente, causando una lenta risposta nella variazione della velocità.

In questo metodo di controllo della velocità, la resistenza d'armatura  $R_a$  e la tensione ai morsetti di macchina rimangono costanti. La velocità è controllata variando la corrente d'eccitazione  $I_e$ . Una soluzione classica è illustrata in Fig. 6.7: l'avvolgimento di armatura è alimentato dalla sorgente in continua a tensione costante ( $V$ ), l'avvolgimento di eccitazione è alimentato in parallelo attraverso un reostato detto "di campo"  $R_c$ , agendo sul quale è possibile variare la corrente di eccitazione indipendentemente dalla corrente di armatura<sup>5</sup>.

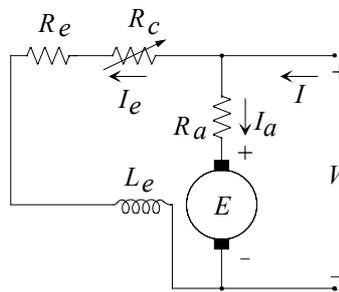


Fig. 6.7 – Controllo della corrente di eccitazione

Trascurando l'effetto della saturazione, il flusso  $\Phi_e$  può ritenersi proporzionale alla corrente di eccitazione  $I_e$  secondo l'equazione (6.1). Considerando pertanto le intersezioni della caratteristica coppia-velocità con gli assi, rispettivamente la coppia allo spunto  $C_o$  (6.9) e la velocità a vuoto  $\omega_{r0}$  (6.10), è facile verificare come la prima aumenta proporzionalmente al crescere di  $\Phi_e$  mentre la seconda diminuisce in modo inversamente proporzionale, come indicato in fig. Fig. 6.8<sup>6</sup>.

Di conseguenza, la pendenza della caratteristica  $C-\omega_r$  cresce con il quadrato del flusso (corrente) di eccitazione, come confermato dalla (6.9). L'effetto risultante della variazione della resistenza dell'avvolgimento di campo, e quindi della corrente di eccitazione, sulla caratteristica coppia-velocità è illustrato in Fig. 6.9.

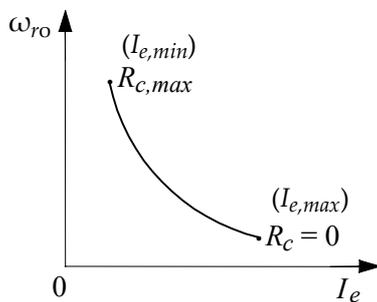


Fig. 6.8 – Andamento della velocità a vuoto in funzione della corrente di eccitazione

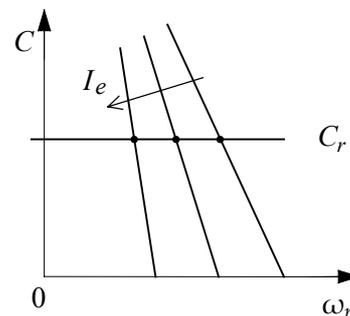


Fig. 6.9 – Effetto della variazione della corrente di eccitazione sulla caratteristica meccanica

<sup>5</sup> Una soluzione più moderna prevede l'uso di un chopper per l'alimentazione dell'avvolgimento di eccitazione.

<sup>6</sup> Si noti che se si apre il circuito di eccitazione (ovvero  $I_e \rightarrow 0$ ), la velocità può diventare eccessiva e quindi pericolosa.

Pertanto, per un fissato valore costante di coppia resistente, una *riduzione* del flusso (corrente) di eccitazione provoca quindi un *aumento di velocità* e corrispondentemente un *aumento della corrente di armatura* per soddisfare l'equazione di coppia.

Il meccanismo transitorio è il seguente: se da una condizione di regime viene ridotto il flusso di eccitazione si ha una riduzione della f.e.m. indotta  $E \downarrow = k_e (\Phi_e \downarrow) \omega_r$ , che causa un aumento della corrente d'armatura  $I_a \uparrow = (V_a - E \downarrow) / R_a$ ; tale aumento è più importante, nell'espressione della coppia, della riduzione del flusso, per cui la coppia aumenta  $C \uparrow = k_e (\Phi_e \downarrow) (I_a \uparrow)$  e determina un aumento della velocità. Di conseguenza si ha un aumento della tensione indotta, una riduzione della corrente di armatura e della coppia motrice  $C$  fino a che, nella nuova condizione di regime, si ha  $C = C_r$  per una velocità superiore a quella di partenza.

Evidentemente, al ridursi del flusso di eccitazione, la macchina perde in capacità di coppia a bassa velocità, mentre è possibile funzionare, con basse coppie, a velocità più alte.

### 6.3.3 Campi di funzionamento con controllo della tensione di armatura e con controllo dell'eccitazione

I due metodi di regolazione di velocità illustrati hanno applicazione in differenti campi di velocità.

Nel controllo dell'eccitazione, quanto più bassa è la corrente d'eccitazione, tanto più alta è la velocità di rotazione e viceversa. Poiché un aumento della corrente di eccitazione causa una riduzione della velocità, esiste un valore minimo limite di velocità, corrispondente alla massima corrente di eccitazione.

Nel controllo della tensione di armatura, poiché al crescere della tensione corrisponde un aumento della velocità, esiste un valore massimo limite di velocità, corrispondente al valore nominale della tensione.

Se il motore lavora in corrispondenza dei valori nominali di tensione d'armatura, di corrente di armatura e di corrente d'eccitazione, esso ruoterà alla velocità nominale, nota anche come "*velocità base*". Il controllo sulla corrente di eccitazione può essere impiegato per ottenere velocità maggiori della velocità base, ma non per velocità al di sotto di essa, in quanto in quest'ultimo caso la corrente di eccitazione dovrebbe superare il suo valore massimo consentito. Il controllo sulla tensione, al contrario, può essere impiegato per velocità minori di quella base, ma non per quelle maggiori, per le quali sarebbe necessaria una tensione maggiore della nominale.

Queste tecniche di controllo della velocità sono quindi complementari, in particolare:

- il controllo della tensione d'armatura viene attuato per velocità *al di sotto della velocità base*;
- il controllo dell'eccitazione per velocità *al di sopra della velocità base*.

Combinando in uno stesso motore le due tecniche di controllo, è possibile ottenere un ampio campo di regolazione della velocità.

È importante determinare gli andamenti in funzione della velocità dei valori massimi di coppia e di potenza, imposti dal massimo valore della corrente di armatura.

Nel controllo della tensione d'armatura, il flusso nel motore è costante e la coppia massima vale:

$$C_{max} = k_e \Phi_e I_{a,max} \quad (6.14)$$

La coppia massima è quindi costante indipendentemente dalla velocità del motore. Dato che la potenza all'asse del motore è data da  $P = C \omega_r$ , la potenza massima del motore, per valori di velocità minori di quella base, è pari a:

$$P_{max} = C_{max} \omega_r \quad (6.21)$$

cioè è direttamente proporzionale alla velocità.

In conclusione, con il controllo sull'armatura il motore lavora a coppia massima costante e a potenza massima variabile linearmente con la velocità, Fig. 6.10.

Nel controllo dell'eccitazione, l'aumento di velocità è ottenuto riducendo il flusso, mentre la tensione di armatura è costante pari al valore nominale. Assumendo la corrente di armatura massima, dalla (6.11) si ricava:

$$\Phi_e = \frac{V_{an} - R_a I_{a,max}}{k_e \omega_r} \propto \frac{1}{\omega_r} \quad (6.15)$$

che indica la legge di riduzione del flusso di eccitazione al di sopra della velocità nominale.

Sostituendo il flusso dalla (6.15) nell'espressione della coppia, sempre assumendo corrente di armatura massima, si trova:

$$C_{max} \propto \frac{1}{\omega_r}$$

In tal modo si ottiene, per velocità maggiori di quella base, un funzionamento a massima potenza meccanica costante; si ha infatti:

$$P_{max} = C_{max} \omega_r = K \quad (6.16)$$

In definitiva nel controllo dell'eccitazione la potenza massima fornita dal motore è costante, mentre la coppia massima è inversamente proporzionale alla velocità, Fig. 6.10.

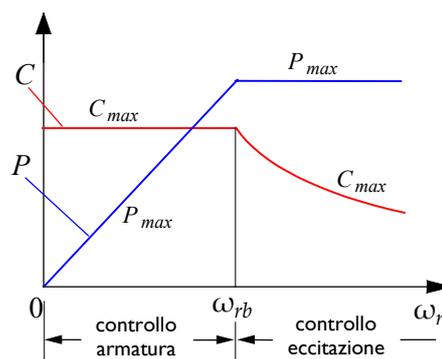


Fig. 6.10 – Andamento della potenza meccanica massima e della coppia massima in funzione della velocità

### 6.3.4 Variazione della resistenza d'armatura

In questo metodo, la tensione ai morsetti del motore  $V$  e la corrente di eccitazione  $I_e$  (e quindi il flusso) sono tenuti costanti ai loro valori nominali. La velocità è controllata variando la resistenza posta in serie al circuito d'armatura, Fig. 6.11.

Dall'eq. (6.6), tenendo conto della resistenza  $R_i$ , si ottiene:

$$C = \frac{k_e \Phi_e V}{(R_a + R_i)} - \frac{k_e \Phi_e^2}{(R_a + R_i)} \omega_r \quad (6.17)$$

Se  $\Phi_e$  e  $V$  sono costanti la (6.23) si scrive:

$$C = \frac{K_1'}{(R_a + R_i)} - \frac{K_2'}{(R_a + R_i)} \omega_r \quad (6.18)$$

L'effetto della resistenza aggiuntiva  $R_i$  è quello di variare bruscamente la pendenza della caratteristica  $C-\omega_r$ , ed il valore della coppia di spunto, lasciando inalterato il valore della velocità a vuoto, (Fig. 6.12).

Il controllo della resistenza d'armatura è semplice da realizzare, ma risulta essere poco efficiente a causa delle perdite per effetto Joule che esso comporta; per tale motivo è raramente impiegato.

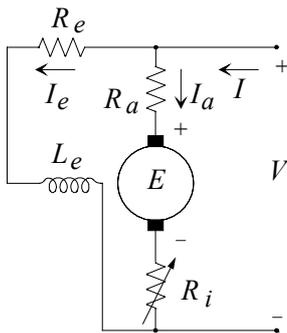


Fig. 6.11 – Variazione della resistenza d'armatura

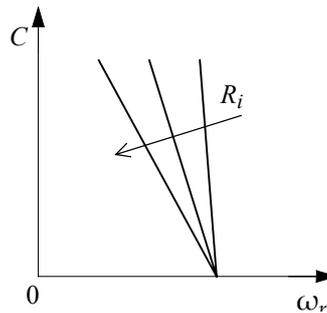


Fig. 6.12 – Effetto della variazione della resistenza di armatura sulla caratteristica meccanica

## 6.4 Azionamenti per controllo di velocità dei motori in c.c.

Ci sono numerose applicazioni in cui si richiede il controllo della velocità, come nei laminatoi, gru, macchine utensili, ascensori, sollevatori e nei veicoli elettrici. I motori a c.c. sono tuttora impiegati in molte delle suddette applicazioni. La tecnologia del controllo della velocità dei motori a c.c. nell'ultimo quarto di secolo si è considerevolmente evoluta.

Prima dell'avvento dell'elettronica di potenza il sistema usato per controllare la velocità era il classico metodo *Ward-Leonard*.

### 6.4.1 Metodo Ward-Leonard

Il sistema Ward-Leonard per il controllo della velocità dei motori a c.c. fu introdotto nel lontano 1890. Tale sistema, illustrato in Fig. 6.13, richiede ben due macchine ausiliarie: un motore asincrono e una dinamo.

Il motore asincrono, alimentato da una rete trifase a tensione e frequenza costante, ruota a velocità costante. Variando la corrente di eccitazione  $I_{eg}$  del generatore a c.c., si varia la tensione di uscita  $V$  che va ad alimentare il motore a c.c. Il sistema consente di regolare la velocità al di sotto e al di sopra della velocità base, come indica la Fig. 6.14.

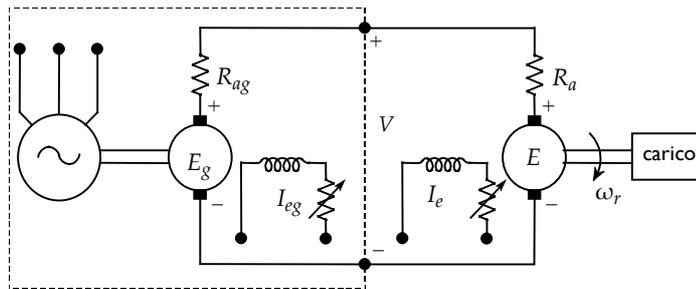


Fig. 6.13 – Metodo Ward-Leonard per il controllo della velocità

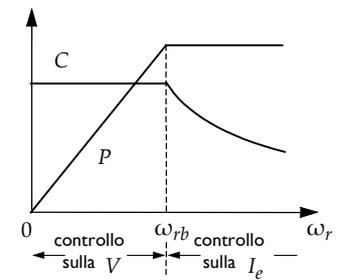


Fig. 6.14 – Regolazione della velocità con il metodo Ward-Leonard

### 6.4.2 Controllo tramite convertitori statici

L'avvento e, successivamente, la diffusione dell'elettronica di potenza hanno consentito la sostituzione del sistema Ward-Leonard per il controllo della velocità del motore a c.c.; la Fig. 6.15 mostra lo schema a blocchi di un sistema che fa uso di convertitori statici<sup>7</sup>. I convertitori più impiegati sono i *raddrizzatori controllati* ed i *chopper*.

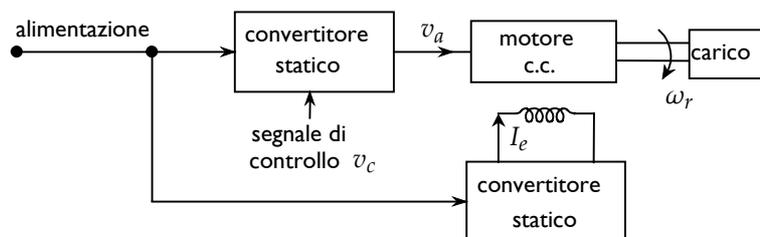


Fig. 6.15 – Schema a blocchi del controllo della velocità tramite convertitori statici

#### 6.4.2.1 Raddrizzatori controllati

Se l'alimentazione è a corrente alternata, il raddrizzatore controllato può essere utilizzato per convertire una tensione alternata di ampiezza e frequenza costante in una tensione continua variabile<sup>8</sup>. Se il raddrizzatore è realizzato da componenti tutti controllati, come ad esempio i *tiristori*, si dice che è "*total-controllato*". Se alcuni dispositivi sono controllati e altri sono *diodi*, il raddrizzatore si dice "*semi-controllato*".

<sup>7</sup> Si tratta di uno schema di controllo in "catena aperta", nel quale non è effettuata la misura della grandezza da controllare.

<sup>8</sup> Convertitore c.a. – c.c. controllato.

L'angolo di accensione dei tiristori (indicato con "α") determina il *valore medio*  $\bar{V}_a$  della tensione d'uscita  $v_a(t)$ , Fig. 6.16. La tensione di controllo  $v_c$  determina l'angolo α e quindi la tensione  $\bar{V}_a$ . Con l'ipotesi che la  $i_a$  sia sempre diversa da zero (*conduzione continua*), le relazioni tra il valore medio della tensione d'uscita  $\bar{V}_a$  e l'angolo di accensione α sono le seguenti.

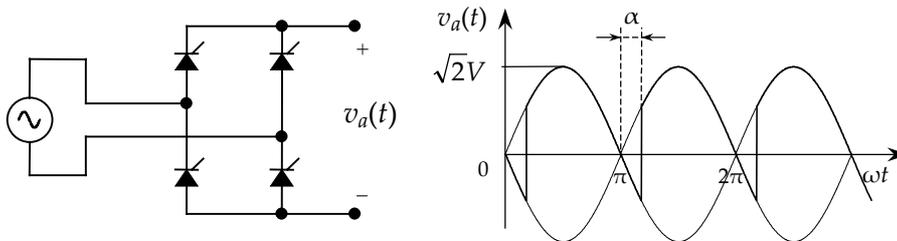
$$\text{ponte monofase total-controllato} \quad \bar{V}_a = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha = \frac{2\hat{V}_f}{\pi} \cos \alpha \quad (6.19)$$

$$\text{ponte monofase semi-controllato} \quad \bar{V}_a = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{\hat{V}_f}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (6.20)$$

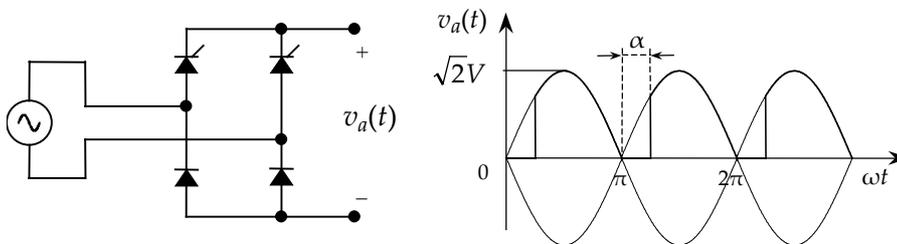
$$\text{ponte trifase total-controllato} \quad \bar{V}_a = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \cos \alpha = \frac{3\hat{V}_l}{\pi} \cos \alpha \quad (6.21)$$

$$\text{ponte trifase semi-controllato} \quad \bar{V}_a = \frac{3\sqrt{6}V}{2\pi} [1 + \cos \alpha] = \frac{3\hat{V}_l}{2\pi} [1 + \cos \alpha] \quad (6.22)$$

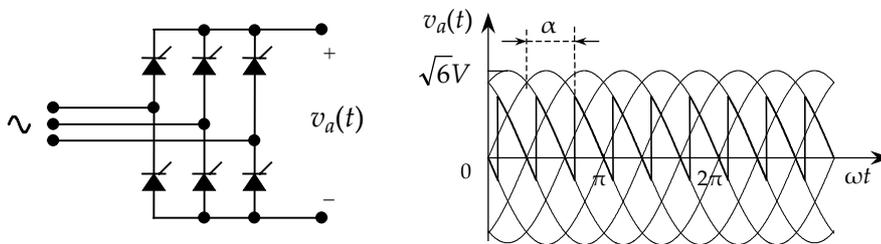
dove  $V$  rappresenta il *valore efficace* della tensione di fase dell'alimentazione in corrente alternata,  $\hat{V}_f$  e  $\hat{V}_l$  le ampiezze rispettivamente della alternata monofase e della tensione concatenata trifase.



a) ponte monofase total-controllato



b) ponte monofase semi-controllato



c) ponte trifase total-controllato

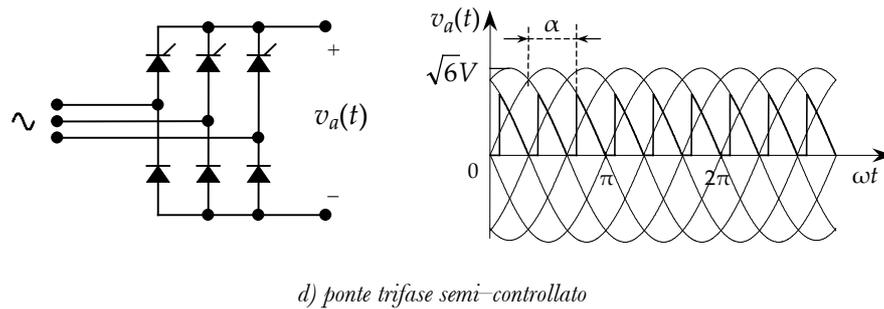
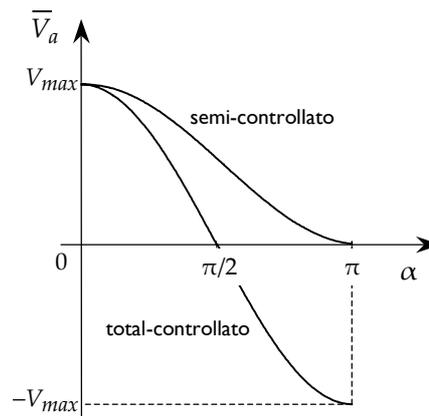


Fig. 6.16 – Circuiti raddrizzatori semi e total-controllati e relative forme d'onda delle tensioni di uscita

Fig. 6.17 – Valore medio della tensione di uscita dei ponti in funzione di  $\alpha$ 

La variazione di  $\bar{V}_a$ , in funzione dell'angolo di accensione  $\alpha$ , è mostrata in Fig. 6.17 sia per i raddrizzatori total-controllati che semi-controllati<sup>9</sup>. C'è da osservare che, sebbene i valori istantanei della tensione d'armatura  $v_a(t)$  e della corrente  $i_a(t)$  non siano costanti ma variabili nel tempo, in termini di valori medi valgono ancora le equazioni in continua:

$$\bar{V}_a = E + R_a \bar{I}_a \qquad E = k_e \Phi_e \bar{\omega}_r \qquad C = k_e \Phi_e \bar{I}_a \qquad (6.23)$$

Dalla prima delle (6.23), se si trascura la caduta di tensione  $R_a \bar{I}_a$ , la tensione di alimentazione è uguale alla f.e.m. indotta ( $\bar{V}_a \cong E$ ); pertanto, le curve di Fig. 6.17, essendo  $E$  proporzionale ad  $\omega_r$ , mostrano, in un'altra scala, anche la variazione di velocità con l'angolo  $\alpha$ .

#### 6.4.2.2 Chopper

Un chopper è un convertitore statico in grado di trasformare potenza in c.c. a tensione costante in potenza in c.c. a tensione variabile. Il chopper può essere considerato un interruttore che commuta ad elevata frequenza, come schematicamente indicato in Fig. 6.18.

<sup>9</sup> Il valore massimo è facilmente ricavabile dalle (6.19)÷(6.22).

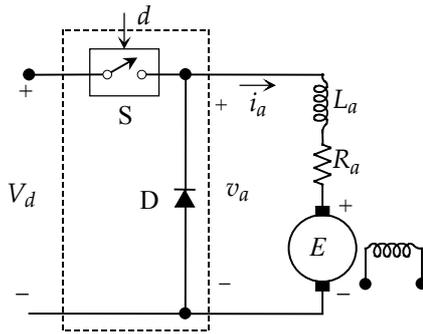


Fig. 6.18 - Schema di principio del controllo della tensione tramite chopper

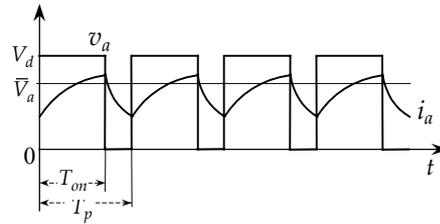


Fig. 6.19 - Forme d'onda della tensione e della corrente di armatura

L'interruttore monodirezionale  $S$  è realizzato tipicamente con dispositivi comandabili in chiusura ed in apertura (attraverso il comando  $d$ ), quali i GTO<sup>10</sup> o i transistor di potenza<sup>11</sup>. Quando il dispositivo conduce, cioè è ON,  $v_a = V_d$  e la corrente nel motore aumenta; quando è OFF, cioè  $S$  è aperto, la corrente  $i_a$  si richiude attraverso il diodo di ricircolo  $D$  e, essendo  $v_a = 0$ , decade. Le forme d'onda della tensione e della corrente d'armatura sono mostrate in Fig. 6.19.

La tensione media, alla quale è proporzionale la velocità del motore, è data da:

$$\bar{V}_a = \frac{t_{on}}{T} V_d = \delta V_d \quad (6.24)$$

in cui:

$T_{on}$  è il periodo di conduzione del chopper;

$T_p$  è il periodo di "pulsazione" (o "chopping");

$\delta = T_{on} / T$  è il rapporto di utilizzazione ("duty cycle") del chopper.

La (6.24) indica che la tensione media ai morsetti d'armatura del motore varia in modo direttamente proporzionale al rapporto di utilizzazione  $\delta$ .

### 6.4.3 Controllo ad anello chiuso

In applicazioni in cui si richiede una velocità costante, il funzionamento del motore a c.c. ad anello aperto può non essere soddisfacente, in quanto la velocità risente delle eventuali variazioni di carico. In un sistema di controllo ad anello chiuso la velocità può essere mantenuta costante regolando la tensione d'armatura al variare del carico.

Lo schema di principio di un tale sistema di controllo è rappresentato in Fig. 6.20. Esso è caratterizzato dalla misura del segnale di velocità ( $V_n$ ) attraverso un opportuno trasduttore, dal confronto con il valore desiderato ( $V_n^*$ ) e dalla correzione dell'errore mediante un opportuno regolatore.

Ipotizzando, ad esempio, un aumento della coppia di carico, momentaneamente la velocità del motore diminuisce; ciò comporta un aumento dell'errore di velocità  $\epsilon_{\omega}$ , cui corrisponde un aumento della tensione di controllo  $v_c$  che, agendo sull'angolo di accensione del convertitore, aumenta (in termini di *valor medio*) la tensione di uscita  $\bar{V}_a$ .

<sup>10</sup> Gate Turn-Off Thyristor.

<sup>11</sup> Può essere un BJT ("Bipolar Junction Transistor") un MOSFET ("Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor") o un IGBT ("Insulated Gate Bipolar Transistor").

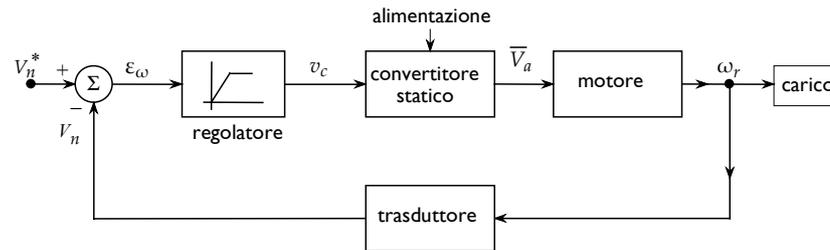


Fig. 6.20 – Schema a blocchi di un controllo di velocità ad anello chiuso.

Tale aumento di tensione determina un aumento della coppia sviluppata dal motore, il quale si riporta alla velocità corrispondente a quella del riferimento  $V_n^*$ . Il sistema si comporta in modo tale da annullare l'errore di velocità  $\epsilon_\omega$ .

Il controllo a ciclo chiuso ha altri vantaggi come una maggiore precisione, una risposta dinamica migliore e maggiore stabilità.

### Test di apprendimento

- 1) Ricavare e disegnare la caratteristica meccanica coppia-velocità del motore in corrente continua ad eccitazione indipendente.
- 2) Definire la coppia allo sputo, la velocità a vuoto ed il generico punto di funzionamento a carico.
- 3) Ricavare, partendo dalla caratteristica meccanica, la modalità di controllo della velocità attraverso la tensione di armatura.
- 4) Disegnare lo schema di principio del controllo di armatura.
- 5) Ricavare la caratteristica tensione di armatura-velocità ad eccitazione costante. Indicare l'effetto del carico.
- 6) Ricavare, partendo dalla caratteristica meccanica, la modalità di controllo della velocità attraverso l'eccitazione.
- 7) Disegnare lo schema di controllo dell'eccitazione attraverso reostato di campo.
- 8) Definire le zone di funzionamento a coppia e potenza costante del motore in c.c. ad eccitazione indipendente.
- 9) Ricavare, partendo dalla caratteristica meccanica, la modalità di controllo della velocità attraverso la resistenza di armatura.
- 10) Disegnare lo schema di principio del controllo di velocità attraverso resistenza di armatura.
- 11) Illustrare lo schema Ward-Leonard per il controllo di velocità di un motore in c.c.
- 12) Disegnare e discutere lo schema di principio del controllo di velocità attraverso convertitori statici.
- 13) Definire il raddrizzatore controllato.
- 14) Definire l'angolo di accensione di un raddrizzatore controllato.
- 15) Disegnare gli schemi dei raddrizzatori monofasi controllati e le forme d'onda della tensione d'uscita.
- 16) Disegnare gli schemi dei raddrizzatori trifasi controllati e le forme d'onda della tensione d'uscita.
- 17) Disegnare l'andamento del valore medio della tensione di uscita dai raddrizzatori controllati monofasi e trifasi in funzione dell'angolo di accensione.

- 18) Definire il chopper e disegnarne lo schema di principio.
- 19) Definire il periodo di pulsazione ed il "duty cycle".
- 20) Disegnare le forme d'onda della tensione e della corrente d'uscita dal chopper.
- 21) Disegnare e discutere la modalità di controllo della velocità ad anello chiuso.

### **Indice delle figure**

Fig. 6.1 – Motore ad eccitazione indipendente a regime .....	81
Fig. 6.2 – Caratteristica meccanica .....	83
Fig. 6.3 – Punto di lavoro a coppia nominale .....	83
Fig. 6.4 – Controllo della tensione di armatura .....	84
Fig. 6.5 – Effetto della variazione della tensione di armatura sulla caratteristica meccanica .....	84
Fig. 6.6 – Andamento tensione di armatura-velocità .....	84
Fig. 6.7 – Controllo della corrente di eccitazione.....	85
Fig. 6.8 – Andamento della velocità a vuoto in funzione della corrente di eccitazione .....	85
Fig. 6.9 – Effetto della variazione della corrente di eccitazione sulla caratteristica meccanica .....	85
Fig. 6.10 – Andamento della potenza meccanica massima e della coppia massima in funzione della velocità .....	87
Fig. 6.11 – Variazione della resistenza d'armatura .....	88
Fig. 6.12 – Effetto della variazione della resistenza di armatura sulla caratteristica meccanica .....	88
Fig. 6.13 – Metodo Ward-Leonard per il controllo della velocità.....	89
Fig. 6.14 – Regolazione della velocità con il metodo Ward-Leonard .....	89
Fig. 6.15 – Schema a blocchi del controllo della velocità tramite convertitori statici.....	89
Fig. 6.16 – Circuiti raddrizzatori semi e total-controllati e relative forme d'onda delle tensioni di uscita.....	91
Fig. 6.17 – Valore medio della tensione di uscita dei ponti in funzione di $\alpha$ .....	91
Fig. 6.18 – Schema di principio del controllo della tensione tramite chopper .....	92
Fig. 6.19 – Forme d'onda della tensione e della corrente di armatura .....	92
Fig. 6.20 – Schema a blocchi di un controllo di velocità ad anello chiuso. ....	93

**INDICE**

<b>6</b>	<b>Controllo di velocità del motore in c.c. ....</b>	<b>81</b>
<b>6.1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>81</b>
<b>6.2</b>	<b>Caratteristica meccanica coppia - velocità .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3</b>	<b>Controllo di velocità dei motori in c.c. ....</b>	<b>83</b>
6.3.1	Controllo della tensione di armatura.....	83
6.3.2	Controllo dell'eccitazione.....	85
6.3.3	Campi di funzionamento con controllo della tensione di armatura e con controllo dell'eccitazione.....	86
6.3.4	Variazione della resistenza d'armatura .....	88
<b>6.4</b>	<b>Azionamenti per controllo di velocità dei motori in c.c. ....</b>	<b>88</b>
6.4.1	Metodo Ward-Leonard.....	89
6.4.2	Controllo tramite convertitori statici .....	89
6.4.2.1	Raddrizzatori controllati.....	89
6.4.2.2	Chopper.....	91
6.4.3	Controllo ad anello chiuso .....	92
	<b>Test di apprendimento .....</b>	<b>93</b>
	<b>Indice delle figure.....</b>	<b>94</b>
	<b>INDICE .....</b>	<b>95</b>