

# MODELLIZZAZIONE, CONTROLLO E MISURA DI UN MOTORE A CORRENTE CONTINUA

ANDREA USAI

Dipartimento di Informatica e Sistemistica  
"Antonio Ruberti"



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



## Outline

### Modello di un Motore CC

- Il Motore Elettrico
- Il Principio di Funzionamento
- Il Modello del Motore CC

### Il Controllo di un motore in CC

- Lo schema di controllo a Microcontrollore
- L'adattamento di potenza: H-bridge
- Il segnale di controllo

### Misura della Posizione Angolare

- Il Potenzimetro
- L'Encoder

### Applicazioni

- Un Servomeccanismo Commerciale



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



## Il Motore Elettrico

“ Le **macchine elettriche** sono dispositivi atti a convertire energia elettrica in energia meccanica, energia meccanica in energia elettrica o a modificare le forme dell'energia elettrica.

Col termine **motore elettrico** si definisce una macchina elettrica in cui la potenza di ingresso è di tipo elettrico e quella di uscita è di tipo meccanico.

Il **motore in corrente continua** (brevemente motore in CC) è stato il primo motore elettrico realizzato, ed è tuttora utilizzato ampiamente per piccole e grandi potenze, inoltre tale motore può funzionare da **dinamo**.

Uno dei primi motori elettromagnetici rotanti, se non il primo, è stato inventato da **Michael Faraday** nel 1821, e consisteva in un filo conduttore tenuto fermo verticalmente alla sua estremità superiore in modo che l'estremità inferiore fosse immersa in un piatto contenente mercurio. Un magnete permanente circolare era sistemato al centro del piatto. Quando una corrente elettrica veniva fatta scorrere nel filo, questo ruotava attorno al magnete mostrando che la corrente generava un campo magnetico attorno al filo...”

— fonte **Wikipedia**, the free encyclopedia

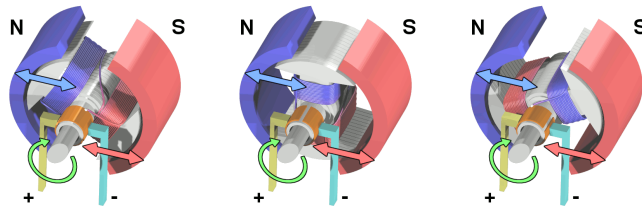


LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



## Il Principio di Funzionamento

Il classico motore in corrente continua ha una parte che gira detta **rotore** o anche armatura (in grigio con gli avvolgimenti colorati nelle figure) e una parte che genera un campo magnetico fisso detta **statore**. Un interruttore rotante detto **commutatore**



Nelle figure, il commutatore (l'anello color rame), fissato all'albero rotante del motore con i due contatti striscianti + e - collegati alla parte ferma, inverte due volte ad ogni giro la direzione della corrente elettrica che percorre i due avvolgimenti, generando un campo magnetico che entra ed esce dalle parti arrotondate dell'armatura.

Nascono forze di attrazione e repulsione con i magneti permanenti fissi (indicati con N ed S nelle figure).



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



## Il Modello del Motore CC

Per la definizione del modello di un motore elettrico a corrente continua (sotto le ipotesi in cui il campo magnetico sia costante), partiamo dal modello elettrico di armatura.

$$V(t) - R_a I(t) - L_a \dot{I}(t) - E_m(t) = 0 \quad (1)$$

dove  $V(t)$  è la **tensione di ingresso**,  $R_a$  e  $L_a$  la **resistenza** e l'**induttanza** di armatura,  $E_m(t)$  la **f.e.m. indotta dalla rotazione dell'armatura** nel campo magnetico,  $I(t)$  la **corrente di maglia**.

Per il modello dinamico del motore, si ha

$$J_m \dot{\omega}(t) = \tau - b\omega(t) - d \quad (2)$$

dove  $J_m$  è l'**inerzia del rotore**,  $\omega(t)$  la sua **velocità di rotazione**,  $\tau$  e  $d$  la **coppia generata dal motore** ed una coppia di disturbo.

I due modelli, nel caso in esame, sono legati dalle relazioni

$$\begin{aligned} \tau &= K_m I(t) \\ E_m(t) &= K_e \dot{\theta}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

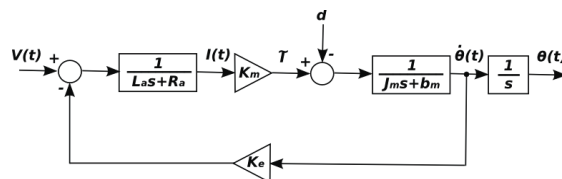


LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Navigation icons: back, forward, search, etc.

## Il Modello del Motore CC

Passando nel dominio di Laplace, la funzione di trasferimento che si ottiene è nella forma



Un esempio di datasheet di un motore in CC

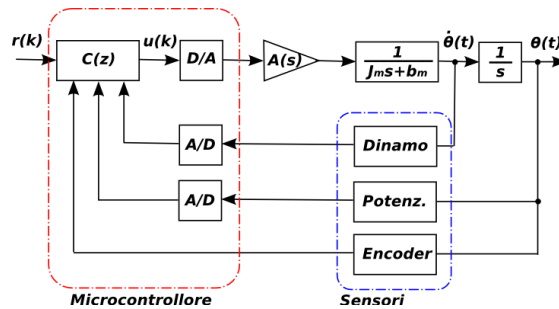
Series GNM80		See beginning of the PMDC Motor Section for Ordering Information	
	GNM	GNM80	GNM80
1 Nominal voltage	$U_N$	24	24
2 Armature resistance	$R$	0.07	0.03
3 Nominal output power	$P_2$	280	500
4 Efficiency	$\eta_{max}$	84	89
5 No-load speed	$n_0$	3,147	3,417
6 No-load current	$I_0$	2.5	2.7
7 Stall torque	$M_N$	25.5	25.5
8 Friction torque	$M_f$	133	143
9 Speed constant	$k_n$	7.57	7.0
10 Back-EMF constant	$k_e$	10.20	9.49
11 Torque constant	$k_t$	103	150
12 Maximum peak current	$I_m$	0.27	0.10
13 Rotor inductance	$L$	3,000	3,000
14 Nominal speed	$n_N$	127.44	236.56
15 Nominal torque	$M_N$	21.3	34.0
16 Mechanical time constant	$\tau_m$	13.0	21.9
17 Rotor inertia	$J$	1.9	0.71
18 Thermal resistance	$R_{\theta 1} / R_{\theta 2}$	40	40
19 Thermal time constant	$\tau_{\theta}$	10.1	14.5
20 Motor weight			
21 Operating temperature range:			
- maximum ambient temperature	40 (104)		
- motor operating temperature range	-20 to 100 (-4 to 212)		



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Navigation icons: back, forward, search, etc.

## Lo schema di controllo a Microcontrollore



Per il modello del motore si è utilizzato il solo contributo meccanico. **Si sono trascurate le non linearità.**

- ▶ Il microcontrollore è il solo sistema tempo discreto in questo modello. il blocco di conversione  $D/A$  è puramente accademico.
- ▶ L'adattamento di potenza per pilotare il motore è realizzato tramite **transistor o H-bridge**.
- ▶ I sensori entrano in opportune porte del microcontrollore.



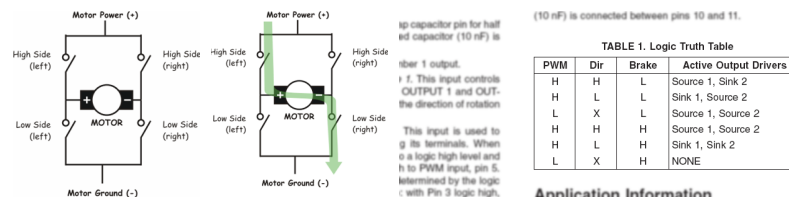
LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## L'adattamento di potenza: H-bridge

Nel modello precedente quello che era indicato con il blocco  $A(s)$  rappresenta l'**attuatore** del sistema da controllare. Sono due i compiti che l'attuatore deve assolvere per pilotare un motore in CC:

- ▶ Le porte di un microcontrollore hanno una corrente di uscita dell'ordine di decine di mA. Il motore richiede correnti dell'ordine dell'Ampere (**Adattamento di Potenza**).
- ▶ Il motore deve poter girare nei due sensi (**Inversione di Alimentazione**)

A questo scopo si utilizza un dispositivo costituito da 4 transistor in una configurazione a ponte H (H bridge).



(10 nF) is connected between pins 10 and 11.

TABLE 1. Logic Truth Table

PWM	Dir	Brake	Active Output Drivers
H	H	L	Source 1, Sink 2
H	L	L	Sink 1, Source 2
L	X	L	Source 1, Source 2
H	H	H	Source 1, Sink 2
H	L	H	Sink 1, Sink 2
L	X	H	NONE

Application Information

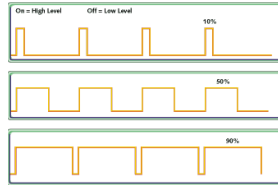


LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## Il segnale di controllo

Come precedentemente accennato, (in genere) **un microcontrollore non dispone di uscite analogiche**. Per poter mandare in uscita dal microcontrollore un segnale a diversi livelli di quantizzazione **non** si utilizza un (costoso) convertitore  $A/D$  ma si sfrutta il fatto che **il sistema da controllare è un sistema passa-basso**.

Un segnale **PWM** è un'onda quadra (due livelli logici) di cui viene controllato il **duty-cycle**: variando la durata dell'1 si cambia, di fatto, il valor medio del segnale.



*Se l'onda quadra ha una frequenza sufficientemente elevata, l'armonica fondamentale viene filtrata dal sistema controllato e l'uscita del sistema è equivalente a quella che si avrebbe avuto se si fosse pilotato il sistema con una tensione costante pari a quella del valor medio del segnale **PWM**.*

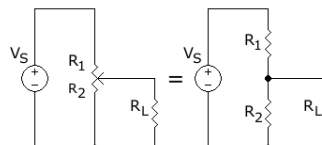
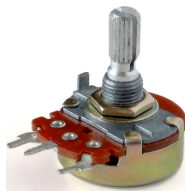


## Il Potenziometro

Il **potenziometro** è un dispositivo elettrico equivalente ad un partitore di tensione resistivo variabile (cioè a due resistori collegati in serie, aventi la somma dei due valori di resistenza costante, ma di cui può variare il valore relativo).

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s \quad (4)$$

La posizione dell'asse del motore viene misurata leggendo il valore della tensione di uscita al dispositivo. *Necessita di una conversione analogico/digitale.*



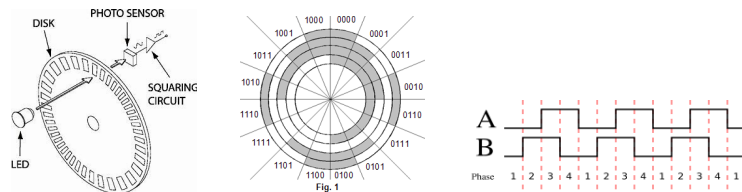
## L'Encoder per Misurare la Posizione Angolare

Gli **encoder** si possono dividere in due grandi categorie:

- ▶ assoluti;
- ▶ relativi (noti anche come incrementali).

Negli **encoder assoluti** i segnali elettrici d'uscita codificano l'esatta posizione istantanea del rotore rispetto al corpo.

Negli **encoder relativi** i segnali elettrici d'uscita sono proporzionali allo spostamento del rotore rispetto al corpo. La posizione assoluta del rotore può essere ricavata *mantenendo un costante conteggio dei segnali elettrici d'uscita*, previa un'operazione iniziale di ricerca riferimento.



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

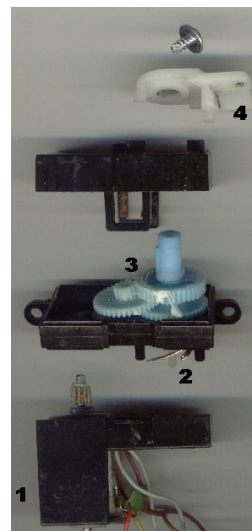


## Un Servomeccanismo Commerciale

Un **servomeccanismo** è un dispositivo usato per provvedere il controllo meccanico a distanza. Per esempio, un servomeccanismo può essere usato in un luogo remoto per seguire proporzionalmente la posizione angolare di una manopola di controllo.

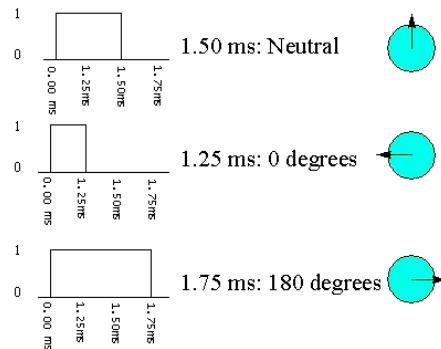
Nelle applicazioni RC sono molto utilizzati i cosiddetti **Servo**. Sono servomeccanismi (a basso costo) costituiti da:

- ▶ Un motore CC (1);
- ▶ Un potenziometro per la misura della posizione dell'asse del motore (2);
- ▶ Una riduzione (3);



## Controllo dei servo

Un **Servo** viene controllato con una particolare tipo di PWM. Il microcontrollore genera un'onda rettangolare con un periodo  $20\text{ms}$ . Il valore di riferimento per la posizione dell'asse del motore viene codificato in base al duty-cycle del segnale generato (onda **PCM**). Si osservi la figura



La codifica del riferimento può variare da modello a modello.



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



...



LA SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

