
Motori Elettrici



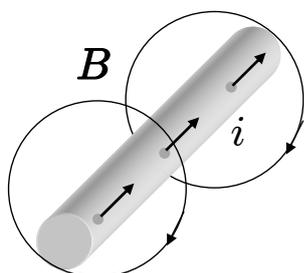
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi fisici

Legge di Lenz: se in un circuito elettrico il flusso concatenato varia nel tempo si genera una tensione

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Legge di Biot-Savart: un conduttore percorso da corrente di intensità i genera un campo magnetico di intensità B



$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$
permeabilità magnetica nel vuoto

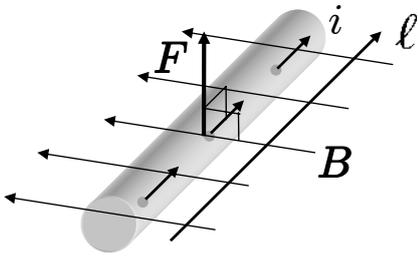
$$\left(\underline{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r^2} \underline{s} \wedge \underline{r} \right)$$

Unità di misura di B nel sistema SI
tesla ($T=NA^{-1}m^{-1}$)

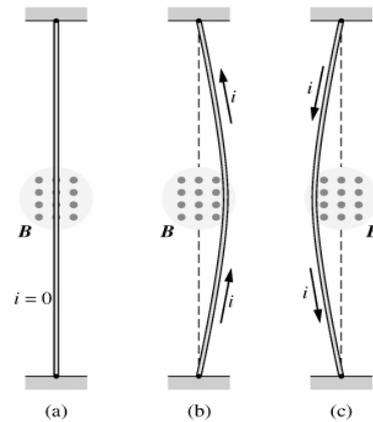
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi fisici

Legge di Faraday: una carica q in moto con velocità v e immersa in un campo magnetico di intensità B è sottoposta ad una forza $\underline{F} = q\underline{v} \wedge \underline{B}$



Un conduttore di lunghezza l percorso da corrente i e immerso in un campo magnetico di intensità B è sottoposto ad una forza $\underline{F} = \underline{li} \wedge \underline{B}$

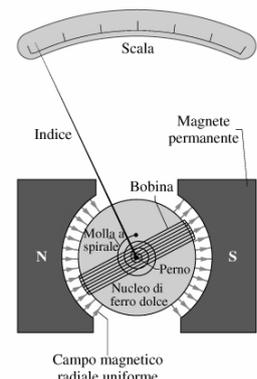
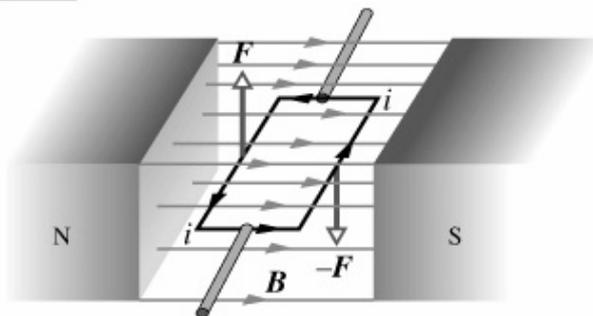
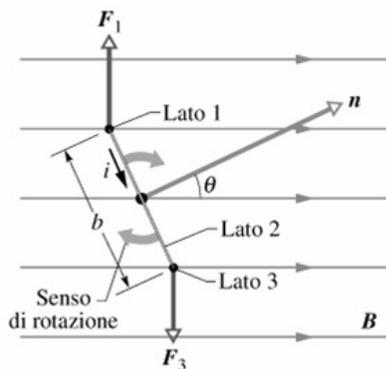


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi fisici

In particolare, una spira conduttrice di area A percorsa da corrente i e immersa in un campo magnetico di intensità B è sottoposto ad una coppia meccanica:

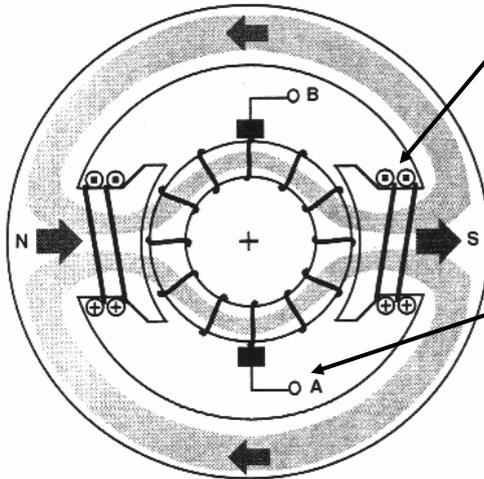
$$T = iAB \sin \theta$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in corrente continua

Il motore elettrico in c.c. (*DC motor*) è costituito da uno **statore** (parte esterna e fissa) e da un **rotore** (posto all'interno e mobile).

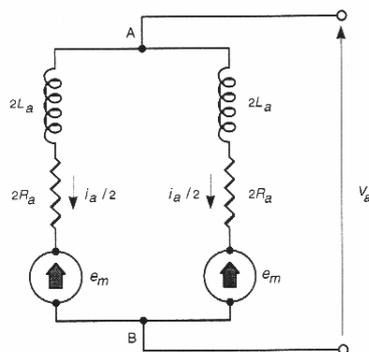


Circuito di eccitazione (o di statore): alimentato in continua, genera il campo magnetico sulle espansioni polari, rivolte verso l'interno del motore. Può essere sostituito da un magnete permanente

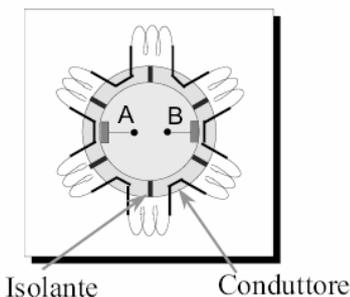
Circuito di armatura (o di rotore): le spire formano un avvolgimento chiuso che a tratti ha tratti scoperti, che entrano in contatto elettrico con le spazzole attraverso le quali si fornisce potenza elettrica al motore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.



Attraverso le spazzole A e B, il circuito di armatura viene percorso da due correnti circa uguali in modulo (che complessivamente danno la corrente di armatura)



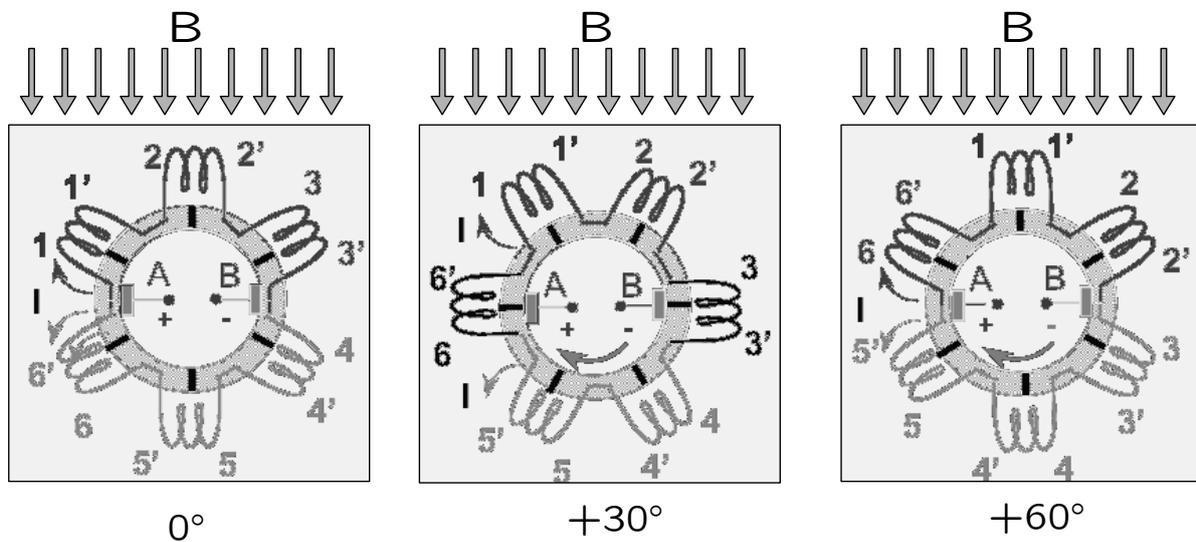
In realtà il rotore è un cilindro di materiale ferromagnetico laminato e sagomato in modo da presentare una serie di cave disposte assialmente. All'interno di queste cave sono collocati avvolgimenti (detti di armatura) che vengono collegati in serie tra loro, esternamente, per mezzo di un dispositivo detto collettore.

Il campo magnetico di eccitazione si **concatena** con quello di armatura, producendo una coppia che muove il rotore.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Collegamenti degli avvolgimenti di rotore e azione delle spazzole e del collettore



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Equazioni che descrivono la parte meccanica del motore:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - \beta\omega - T_l$$

ω = Velocità angolare del motore

β = Coefficiente attrito viscoso

J = Inerzia apparato mobile del motore

T_l = Coppia resistente dovuta al carico

T_m = Coppia generata dal motore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Equazioni che descrivono la parte elettrica del motore:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e$$

$$V_e = R_e i_e(\Phi_e) + N_e \frac{d\Phi_e}{dt}$$

V_a, V_e = Tensione alimentazione rotore/statore

i_a, i_e = Corrente rotore/statore

R_a, R_e = Resistenza spire del rotore/statore

Φ_e = Flusso magnetico statore

e = Tensione contro elettromotrice del rotore

L_a = Induttanza spire rotore

N_e = Numero spire statore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Tensione contro elettromotrice del rotore: $e = k\Phi_e\omega$

Coppia generata dal motore: $T_m = k\Phi_e i_a$

NB: la costante k è la stessa, dovendo conservarsi la potenza durante la conversione da elettrica a meccanica

$$e i_a = T_m \omega$$

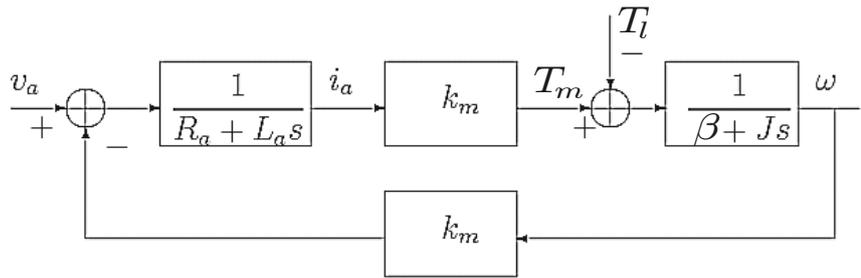
Nel caso in cui Φ_e sia costante (come nel caso di motori a *magneti permanenti*), posto $k_m = k\Phi_e$ si ha:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_m \omega \text{ f.e.m.}$$
$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - \beta \omega - T_l$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Schema a blocchi:



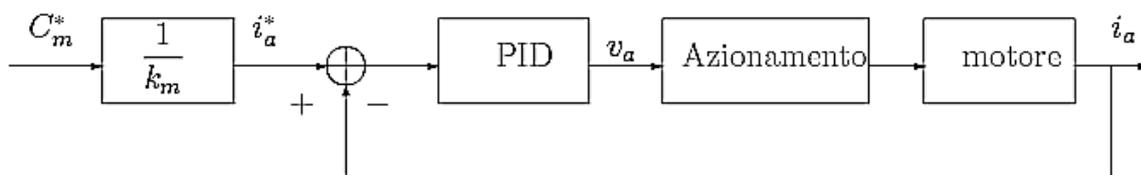
È evidente la presenza di una retroazione negativa interna che tende a stabilizzare la velocità del motore.

Questa capacità di autostabilizzazione del motore a collettore è un elemento che semplifica notevolmente il progetto di un sistema di controllo di velocità. Unitamente alla semplicità offerta dal singolo ingresso di controllo, essa ha contribuito notevolmente all'affermazione del motore a magneti permanenti nelle applicazioni a velocità variabili.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pro e contro dei motori in c.c.

PRO: Facilità di regolazione (controllo in tensione di armatura o in tensione del circuito di eccitazione). Il modello matematico del motore c.c. è molto semplice (lineare tempo-invariante).



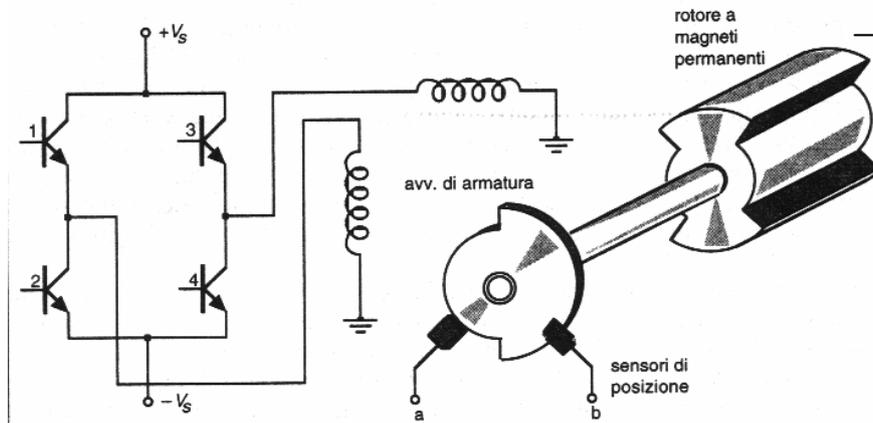
CONTRO:

- Perdite elettriche per cadute di tensione nel contatto spazzola-collettore
- Perdite meccaniche dovute ad attrito durante la commutazione
- Produzione di scintille durante la commutazione (dovuta ad autoinduzione)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Commutazione elettronica:

- La commutazione della corrente negli avvolgimenti viene fatta per via elettronica. Evita quindi l'uso di spazzole e contatti striscianti (=brushless). Anche i motori passo-passo (*step motors*) appartengono a questa categoria.



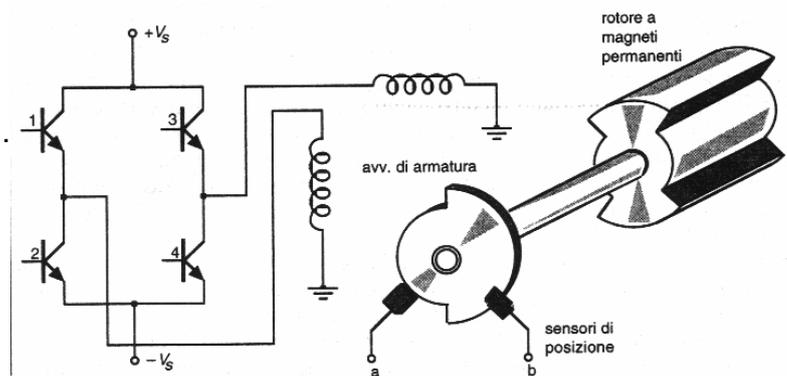
– Rispetto al motore c.c., l'avvolgimento di armatura è posto sullo statore, mentre il rotore è costituito (quasi sempre) da un magnete permanente

- L'assenza di spazzole non pone problemi nell'alimentazione dell'avvolgimento di armatura, quindi si possono raggiungere potenze elevate

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

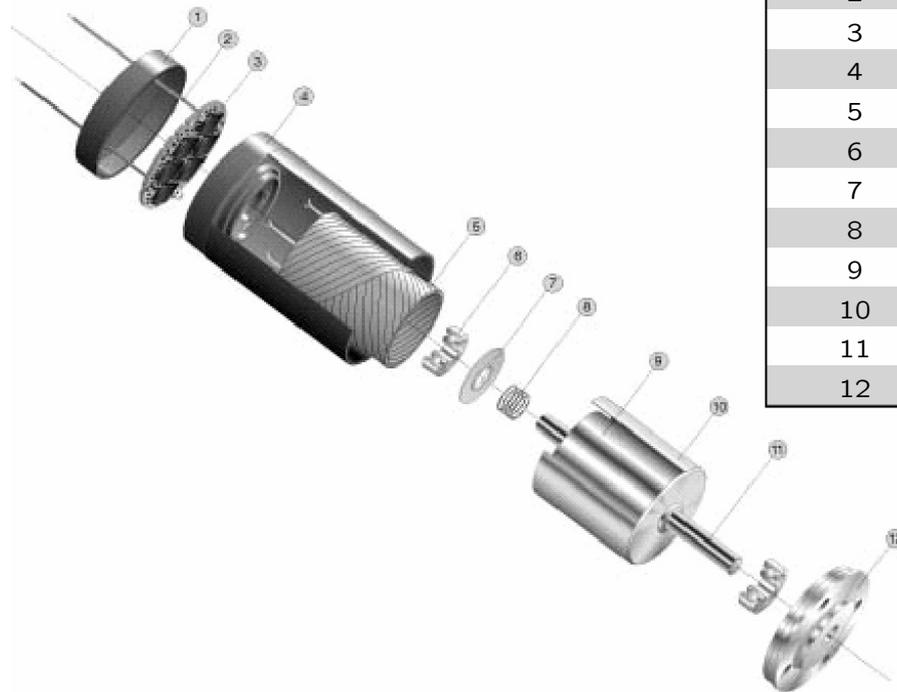
Parti costitutive:

1. Rotore. Genera il flusso magnetico di eccitazione.
2. Statore. Avvolgimento polifase del circuito di armatura
3. Sensori di posizione. Forniscono la posizione dell'albero motore (es: a effetto Hall, elettro-ottici LED+fototransistor)
4. Modulo di alimentazione in c.c. o c.a.
5. Modulo elettronico di controllo. Costituito da:
 - Circuito logico. Combina i segnali che danno la posizione desiderata con i segnali provenienti dai sensori (=posizione effettiva).
 - Sistema di azionamento. Genera i segnali di controllo al ponte a H (=interruttori realizzati mediante transistor di potenza) attraverso cui sono alimentati gli avvolgimenti di armatura



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

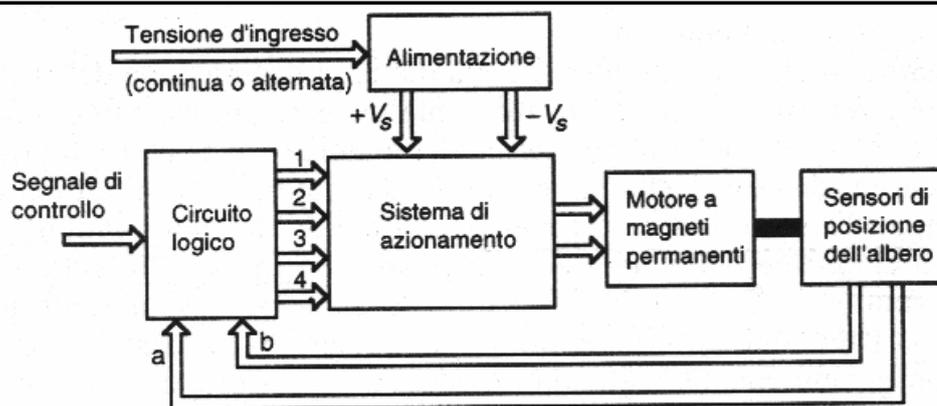
2-Wire Brushless DC Motor



Pos.	Description
1	Rear cover
2	Leadwires
3	Electronics
4	Housing
5	Coil
6	Ball bearing
7	Washer
8	Spring
9	Magnet
10	External rotor
11	Shaft
12	Front cover

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori brushless



Funzionamento:

1. Il sensore di posizione indica l'avvolgimento di armatura che genera il campo magnetico perpendicolare a quello del rotore
2. Il rotore si mette pertanto in movimento (la situazione è analoga al motore c.c. quando le spazzole si trovano a $\pi/2$ rispetto al campo di statore)
3. In seguito alla rotazione, il modulo elettronico di controllo commuta l'alimentazione sugli avvolgimenti, in modo che i campi magnetici siano sempre perpendicolari

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori brushless - caratteristiche

- Non ci sono spazzole, quindi non ci sono perdite elettriche, meccaniche per attrito, scintille.
- Il circuito di alimentazione è nello statore, quindi la dissipazione termica è più facile (es: raffreddamento). Inoltre è facile inserire sensori termici per tenere la temperatura sotto controllo
- Riduzione del momento di inerzia del rotore (con materiali ad alto flusso per unità di peso, es. terre rare) e quindi dimensioni più piccole
- Coppie di spunto e velocità maggiori che nei motori a collettore (e quindi bande passanti superiori)
- A differenza dei motori a collettore, però, il numero di avvolgimenti è molto minore (da 2 a 6), quindi risulta più difficile avere una coppia costante

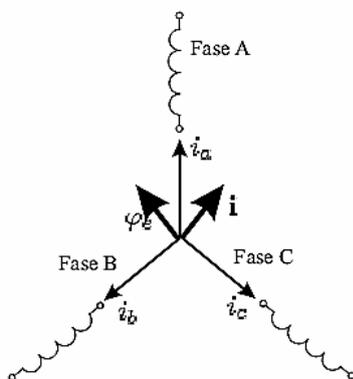


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori brushless

Modello matematico (motore a due poli del magnete permanente e tre avvolgimenti di statore):

Le equazioni elettriche che governano il circuito di statore sono:



$$V = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = Li + \tilde{\Phi}(\theta)$$

$$T_m = i^T \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

Flusso dovuto al rotore (dipende dagli angoli θ fra il vettore flusso $\tilde{\Phi}$ e i relativi riferim. angolari)

Dalla conservazione della potenza:

$$\frac{d\theta}{dt} T_m = i^T \frac{d\tilde{\Phi}}{dt}$$

$$V = [V_a \ V_b \ V_c]^T$$

$$i = [i_a \ i_b \ i_c]^T$$

$$\Phi = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^T$$

$$\theta = [\theta_a \ \theta_b \ \theta_c]^T$$

R = matrice delle resistenze (diagonale)

L = matrice dei coefficienti di auto e mutua induttanza dei tre avvolgimenti di statore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Combinando tra di loro le equazioni, si ottiene una relazione per la parte elettrica del motore simile a quella vista per il motore in corrente a collettore:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e(\theta)\omega$$

$$T_m = k_e^T(\theta)i$$

$$k_e(\theta) = \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

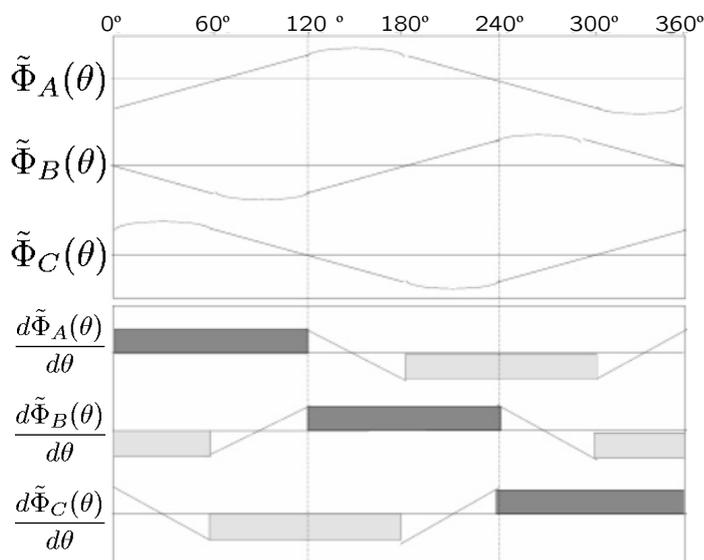
I motori brushless possono essere alimentati con:

- **Campo trapezoidale:** generato utilizzando correnti costanti commutate opportunamente (DC brushless).
- **Campo sinusoidale:** necessita di una modalità di pilotaggio a correnti variabili sinusoidali (AC brushless).

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (DC brushless) a campo trapezoidale

Il flusso magnetico $\tilde{\Phi}$ del rotore che si concatena con gli avvolgimenti di statore è di tipo quasi lineare, nel senso che è lineare per ampi angoli di rotazione del motore, e quindi con derivata $k_e(\theta) = d\tilde{\Phi}/d\theta$ costante su tali tratti.



$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e(\theta)\omega$$

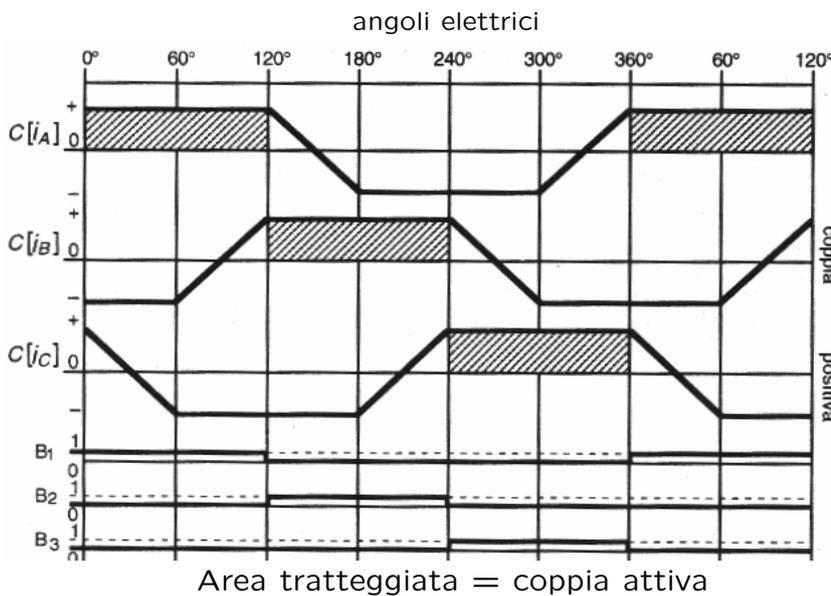
$$T_m = k_e^T(\theta)i$$

$$k_e(\theta) = \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (DC brushless) a campo trapezoidale

Imponendo correnti i costanti e in fase rispetto ai flussi concatenati si ottiene una coppia costante lungo l'intero arco di rotazione del motore.



1=transistor in conduzione

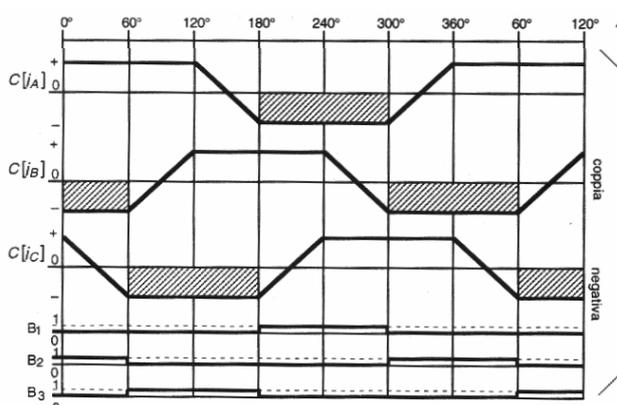
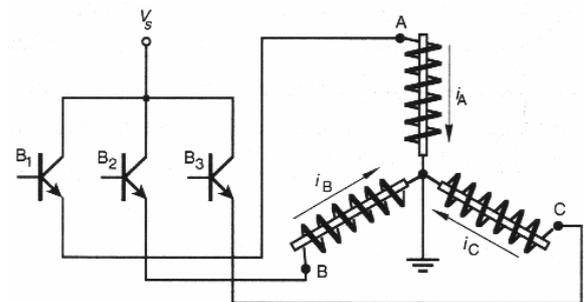
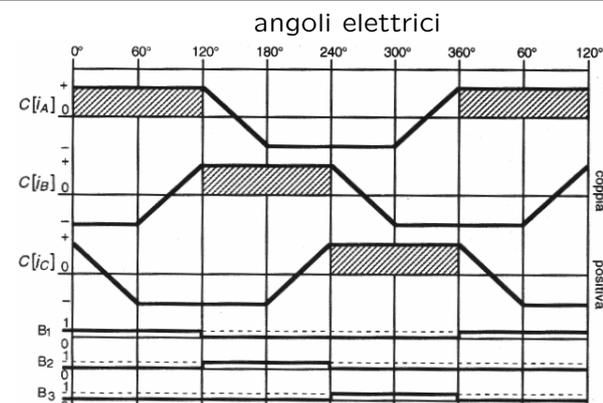
$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e(\theta)\omega$$

$$T_m = k_e^T(\theta)i$$

$$k_e(\theta) = \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (DC brushless) a campo trapezoidale



- V_s = tensione continua. La coppia prodotta è proporzionale all'ampiezza di V_s
- Per invertire la coppia, basta sfasare gli angoli di metà intervallo (nel motore c.c. invece occorre invertire la tensione V_s)
- Questo schema va bene solo a basse velocità/potenze (trascura le induttanze parassite)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (AC brushless) a campo sinusoidale

Si fa in modo che per ogni avvolgimento di fase, la coppia relativa alla corrente che lo percorre vari sinusoidalmente con l'angolo θ

Consideriamo un avvolgimento bifase:

$$T_1 = i_1 K_T \sin(\theta) \quad K_T = \text{costante di coppia}$$

$$T_2 = i_2 K_T \cos(\theta)$$

Imponendo che anche la corrente vari sinusoidalmente con θ :

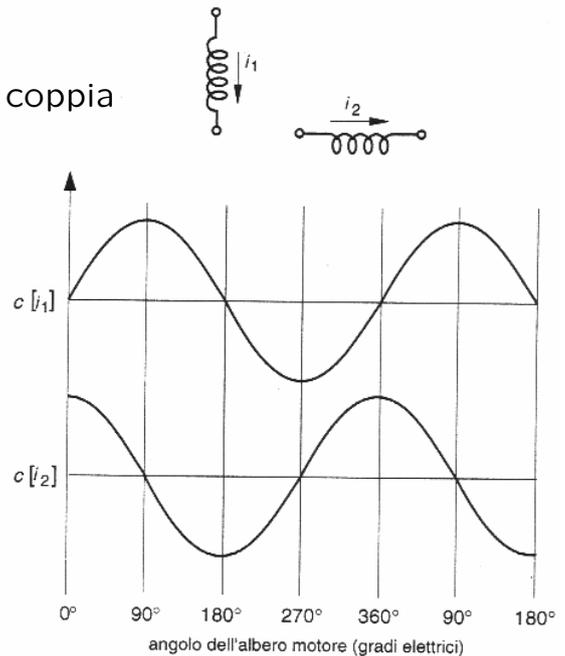
$$i_1 = I \sin(\theta)$$

$$i_2 = I \cos(\theta)$$

la coppia totale $T = T_1 + T_2$ risulta:

$$T = IK_T(\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)) = IK_T$$

ed è quindi costante



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo (*step motors*)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

- Convertono impulsi digitali elettronici in spostamenti meccanici programmati di elevata precisione.
- Hanno un'elevata robustezza meccanica ed elettrica (no contatti elettrici striscianti)
- E' facile far compiere all'albero piccole rotazioni angolari arbitrarie in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.
- La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.



La fotografia mostra una coppia di motori step recuperati da vecchie stampanti (notare i numerosi fili di alimentazione)

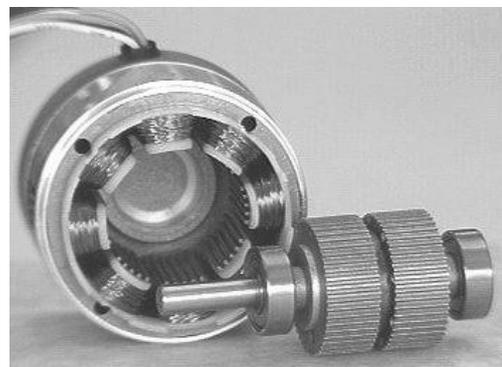
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

Per ottenere una rotazione occorre inviare al motore una serie di impulsi di corrente, secondo un'opportuna sequenza, in modo tale da far spostare, per scatti successivi, la posizione di equilibrio.

I motori passo-passo si dividono in tre grandi gruppi:

- motori a magnete permanente
- motori a riluttanza variabile
- motori ibridi



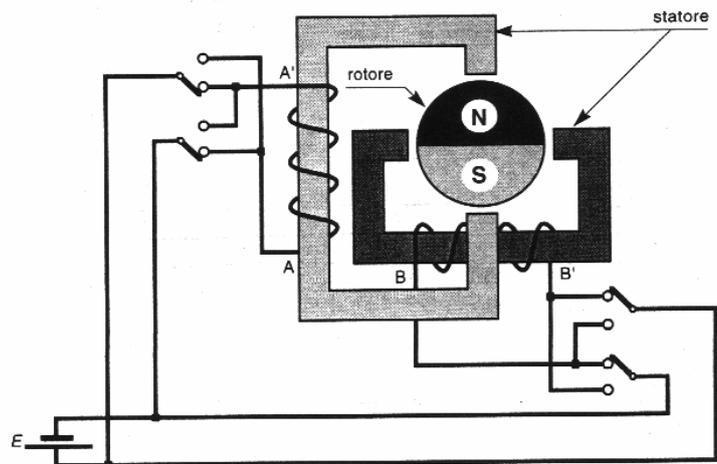
Motore ibrido (rotore, statore).

Il rotore è formato da due ruote dentate (che sono i due poli del magnete) realizzate in materiale ferromagnetico.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo - principi di funzionamento

- Statore. Ha diverse coppie di espansioni polari, attorno alle quali si dispongono gli avvolgimenti del circuito di armatura
- Rotore. Fornisce il flusso magnetico di eccitazione
- Circuito di pilotaggio e sistema di azionamento, che alimentano i circuiti di armatura in successione

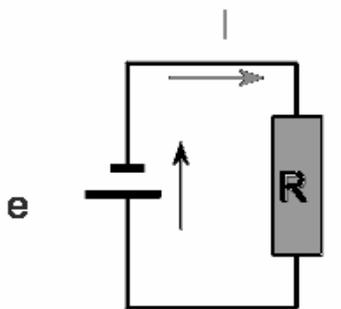


- Il funzionamento è simile a quello del motore brushless, ma non ci sono sensori di posizione.
- Ad ogni commutazione il rotore si porta pressoché istantaneamente in posizione di coppia nulla, ruotando di un certo angolo (passo angolare)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Richiami di Elettrotecnica - Riluttanza

Circuito elettrico

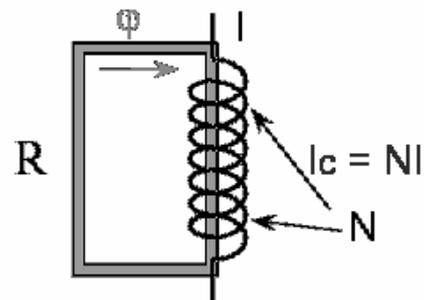


f.e.m. e
corrente I
resistenza R

$$e = R \cdot I$$

legge di Ohm

Circuito magnetico



f.m.m. Ic
flusso ϕ
riluttanza R

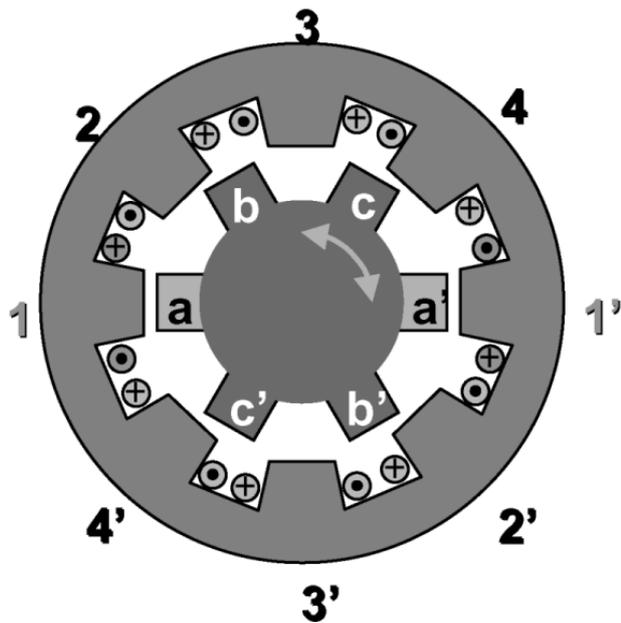
$$NI = R \cdot \phi$$

legge di Hopkinson

La riluttanza dipende dal materiale e dal percorso geometrico

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile

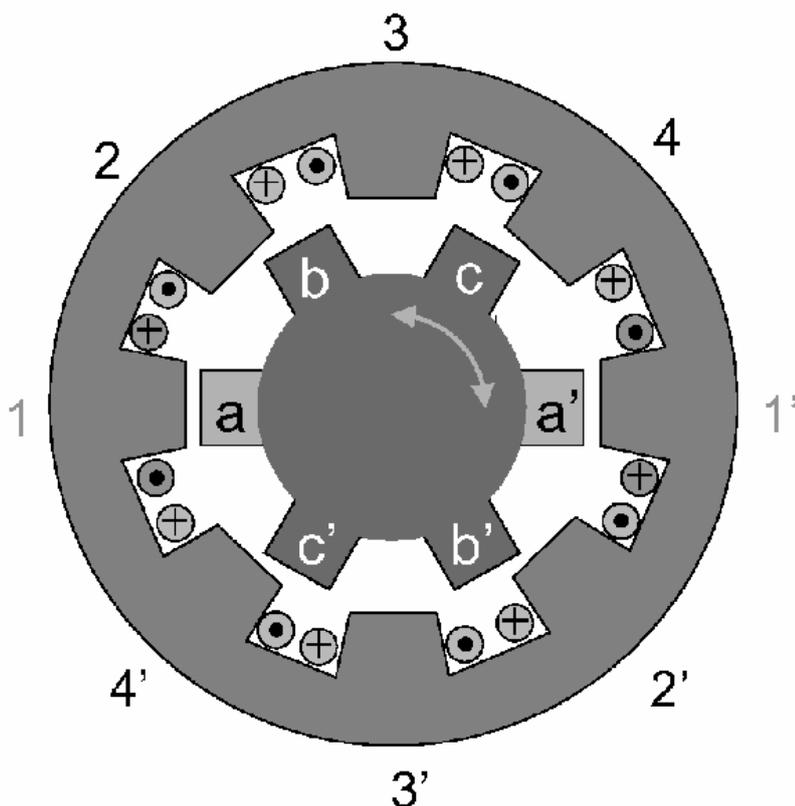


Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

- Il rotore è costituito da materiale magnetico
- Alimentando una fase con una corrente costante il rotore si porta nella posizione per la quale il circuito magnetico assume la minima riluttanza e cioè con una coppia di denti (a-a') allineati con la fase alimentata (1-1').
- Motore fortemente nonlineare, moti incrementali

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



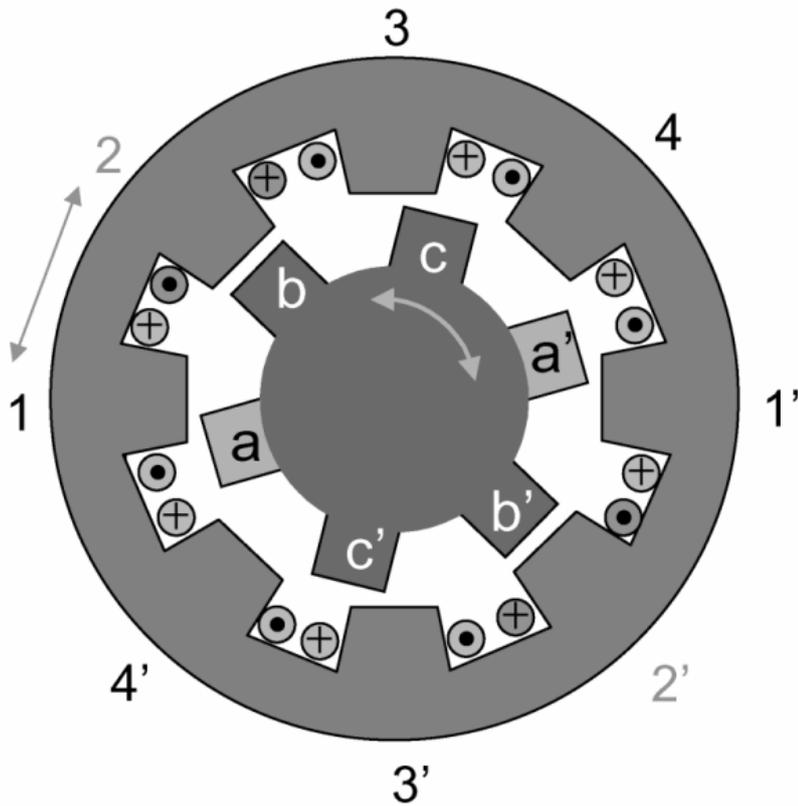
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 1-1'
alimentata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



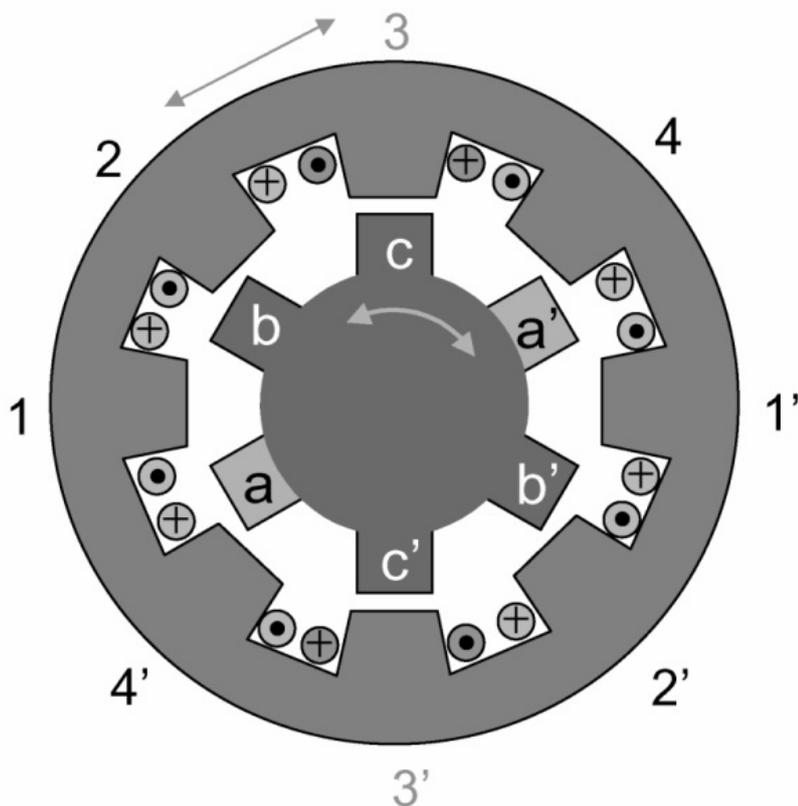
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 2-2'
alimentata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



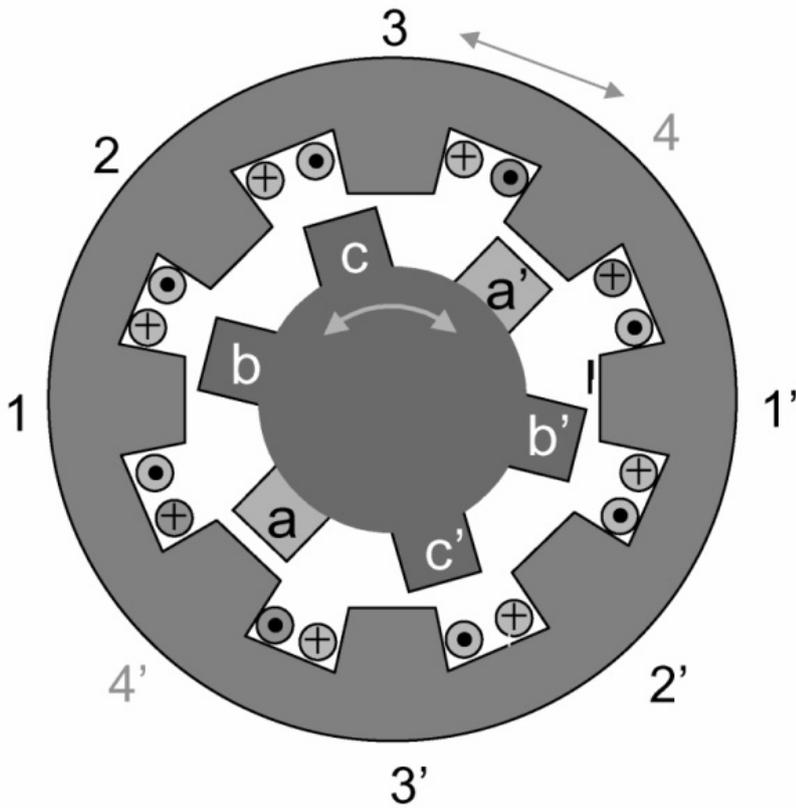
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 3-3'
alimentata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



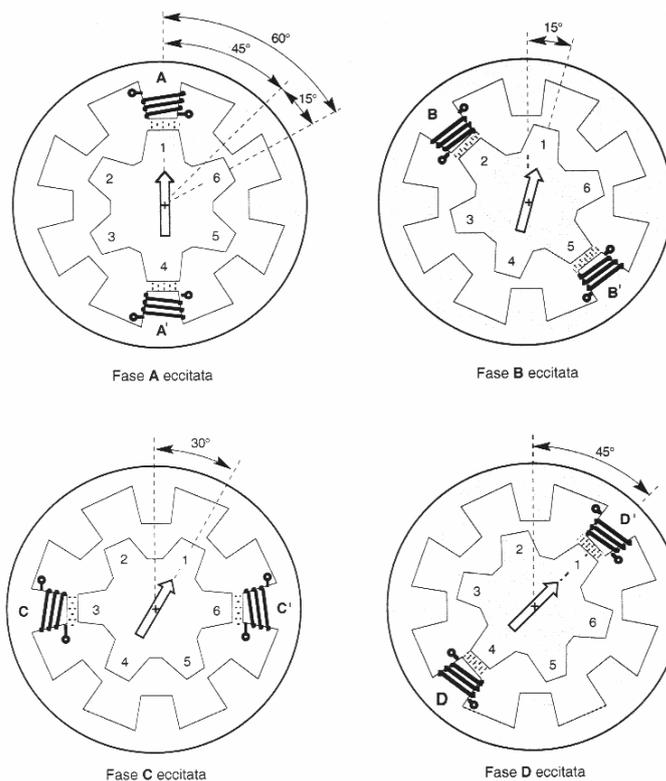
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 4-4'
alimentata

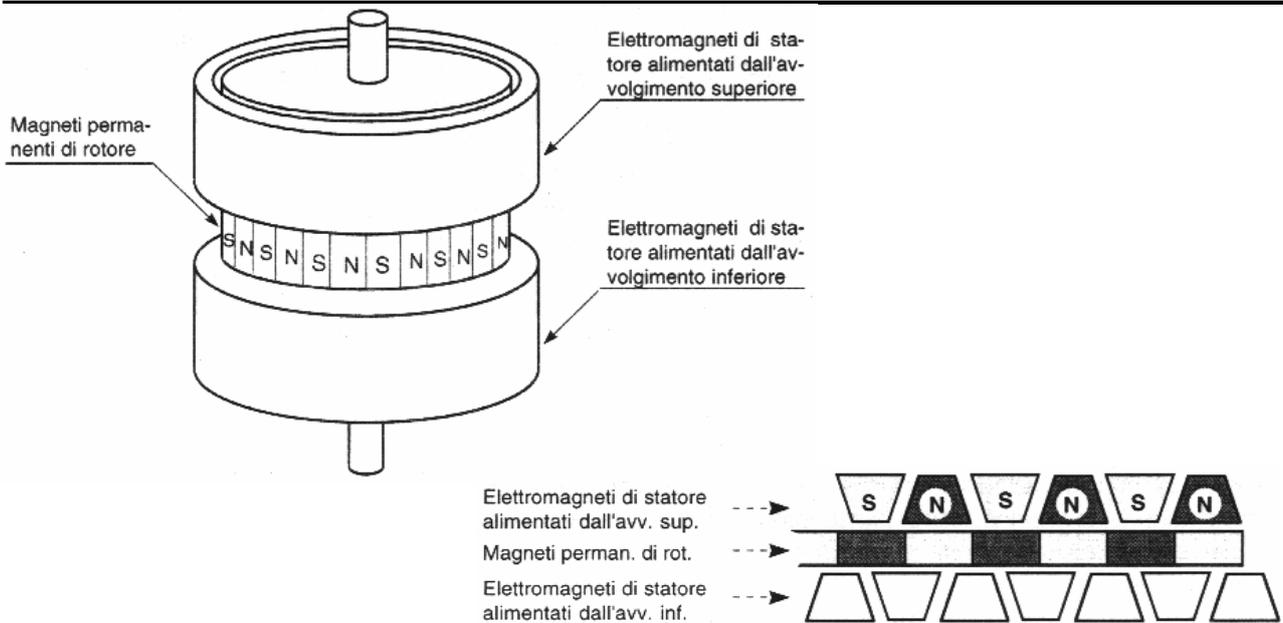
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

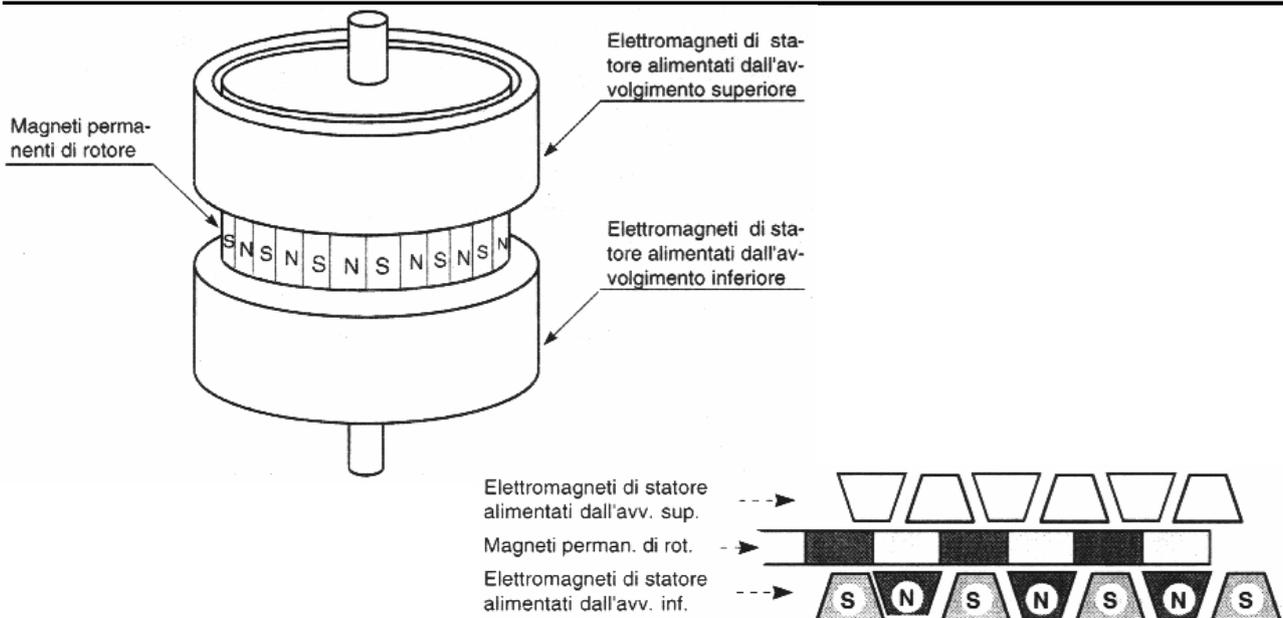
Motori passo-passo a magneti permanenti



Alimentando alternativamente gli avvolgimenti superiore e inferiore di statore si ottiene una traslazione del rotore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

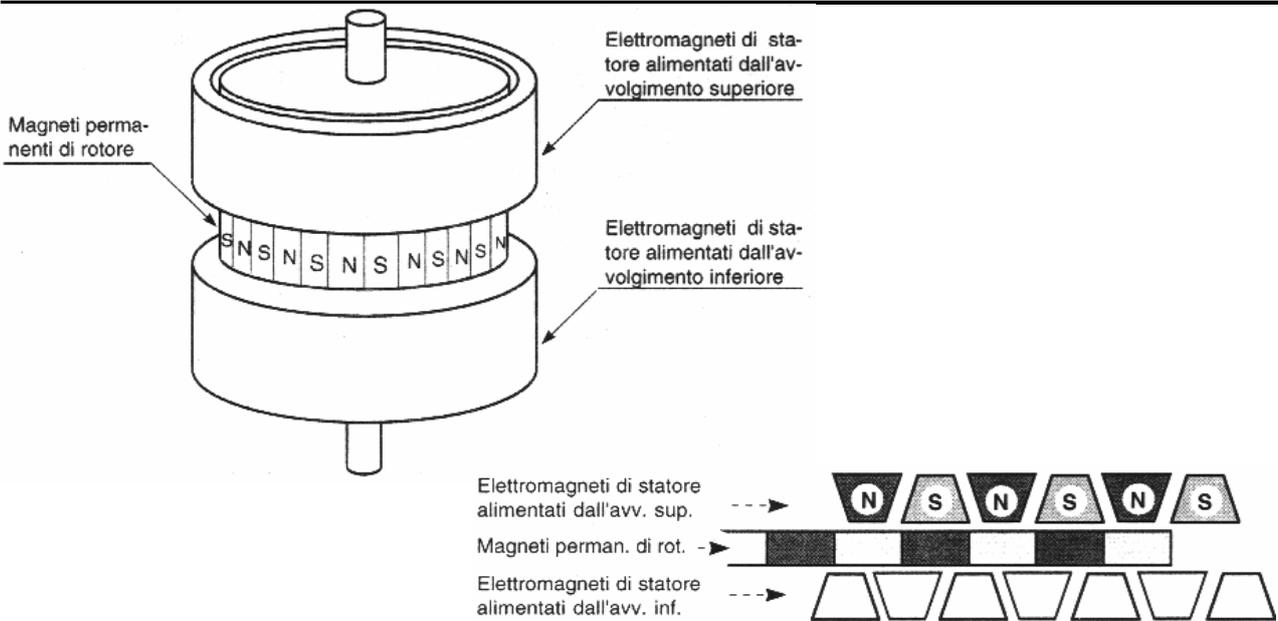
Motori passo-passo a magneti permanenti



Alimentando alternativamente gli avvolgimenti superiore e inferiore di statore si ottiene una traslazione del rotore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a magneti permanenti

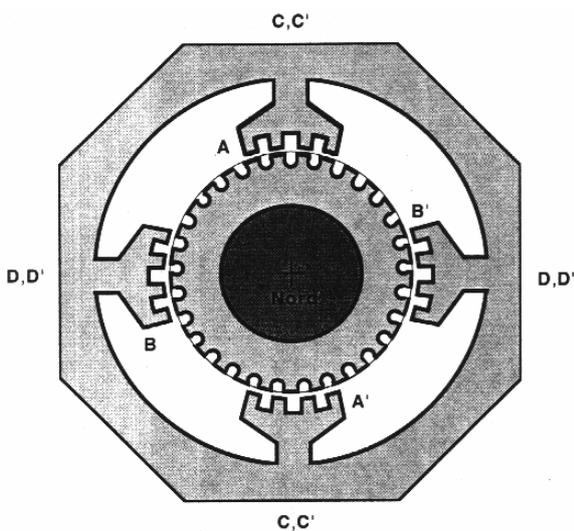


Alimentando alternativamente gli avvolgimenti superiore e inferiore di statore si ottiene una traslazione del rotore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

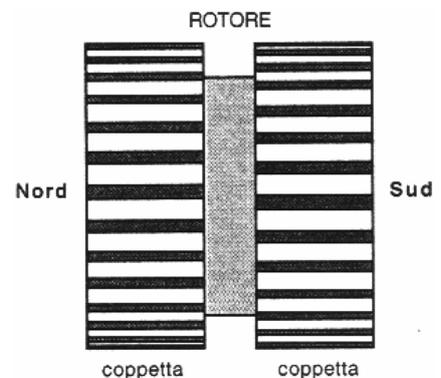
Motori passo-passo ibridi

Il rotore è a magnete permanente, ma la sua forma ricorda quella dei motori a riluttanza variabile



$$p = \frac{360^\circ n}{4} \quad \text{passo}$$

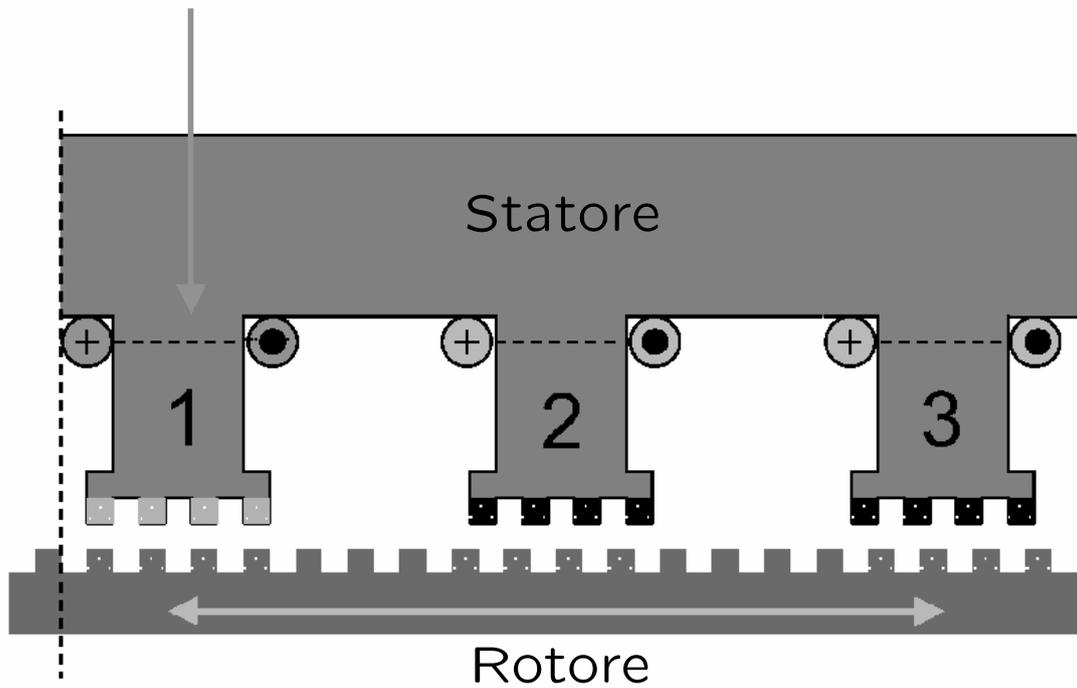
$n =$ numero denti



Sono i più diffusi (80%), seguiti da quelli a magnete permanente (20%). Quelli a riluttanza variabile sono quasi scomparsi (ma il loro principio di funzionamento è simile a quello dei motori ibridi)

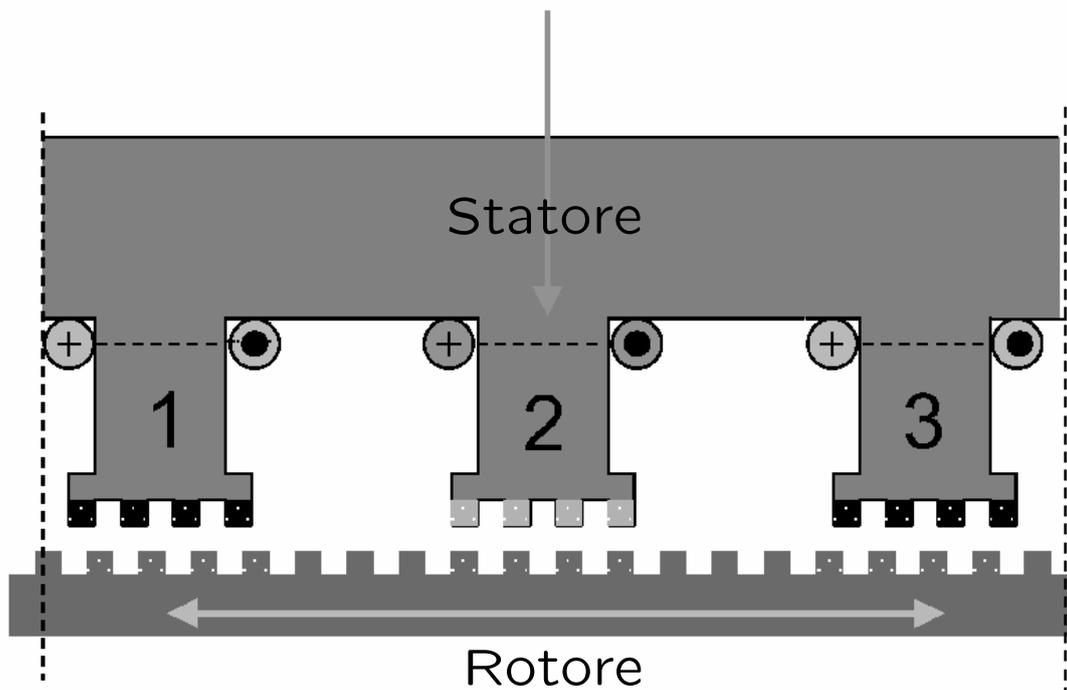
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo ibridi



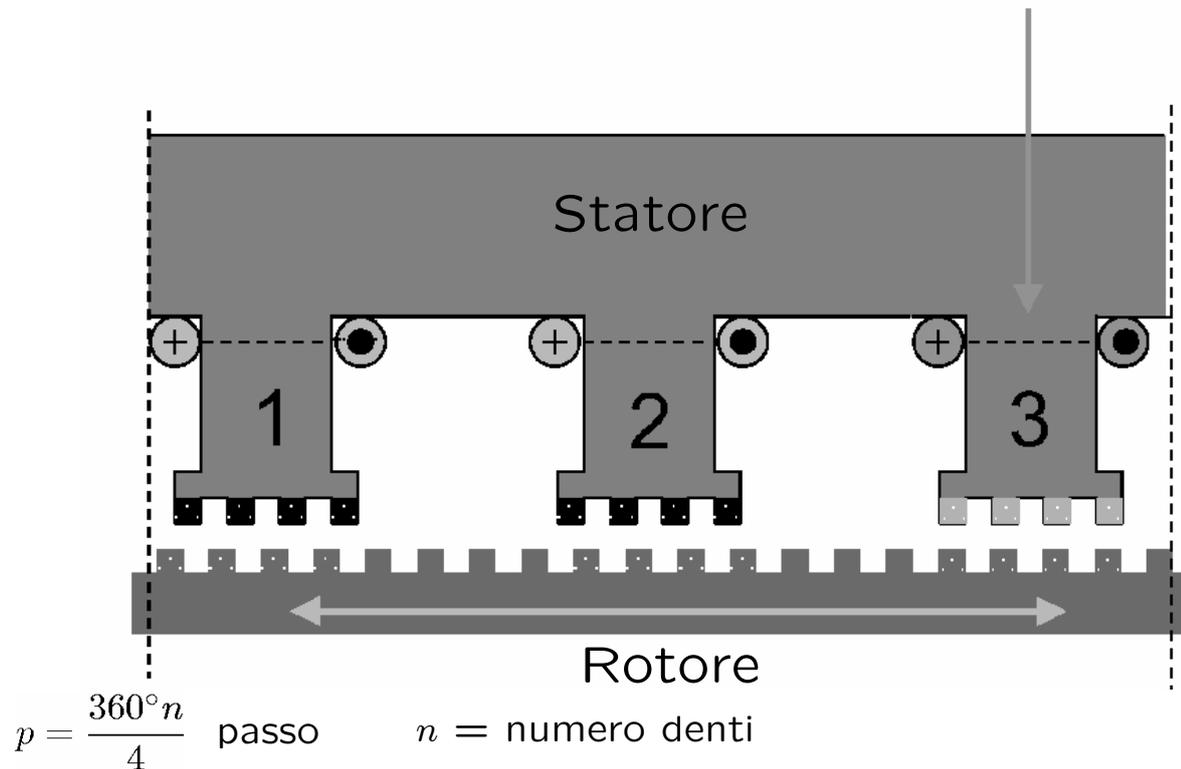
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo ibridi



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

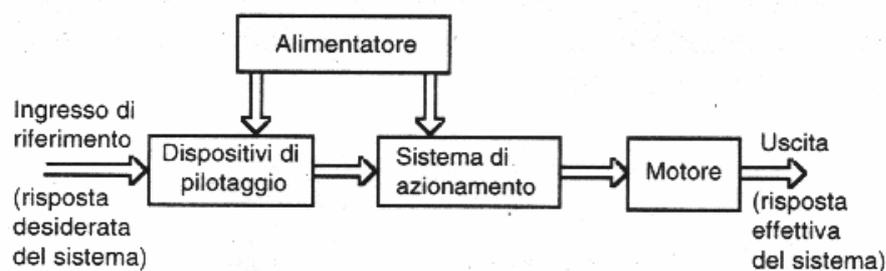
Motori passo-passo ibridi



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

- Non hanno bisogno di **feedback**, e quindi di sensori di posizione e velocità



- I motori passo-passo (a magneti permanenti e ibridi), a differenza degli altri motori, sono in grado di mantenere il carico sviluppando da fermi una coppia di tenuta anche in assenza di alimentazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

- I motori passo-passo vengono utilizzati per applicazioni che richiedono:
 - controlli di posizione di basso costo dove sono richieste piccole potenze
 - moti incrementali
 - applicazioni che richiedano rotazioni di valore angolare prestabilito con alta velocità di esecuzione, arresti bruschi con posizionamenti precisi e coppie di mantenimento della posizione di arresto relativamente alte.

- Essendo a ingresso direttamente numerico, non richiede convertitori analogico/digitali nei sistemi di controllo digitale



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Lineari

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Approccio Direct Drive

- Problema:
 - spesso è più costoso il sistema di trasformazione del moto che l'attuazione stessa
 - le perdite per attrito diventano notevoli
 - non conviene avere un solo generatore di movimento e tanti sistemi di trasmissione/trasformazione
- Filosofia Direct-Drive:

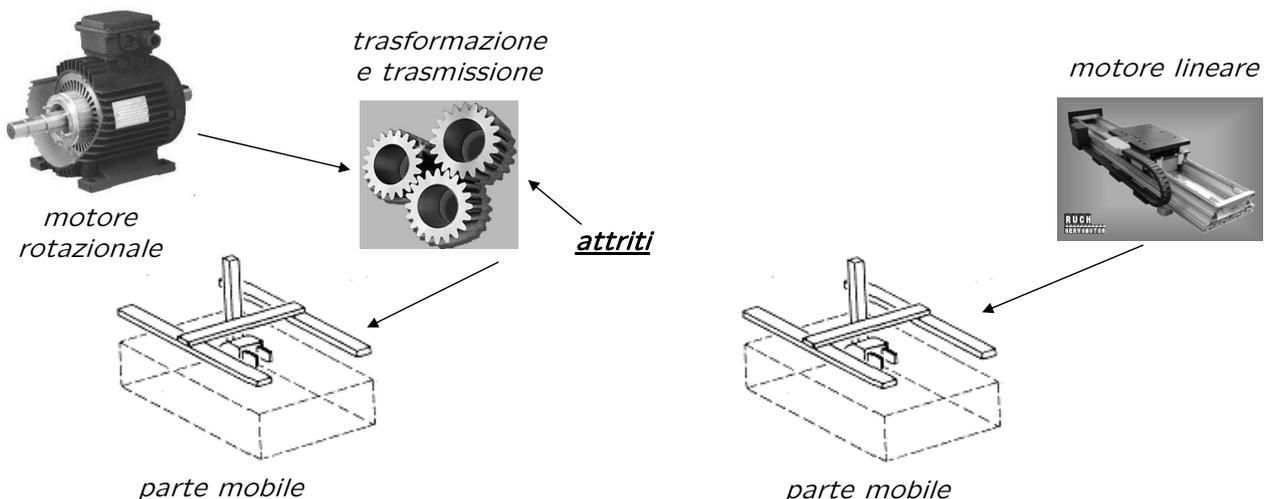
*“generare il movimento dove serve,
nella forma in cui serve”*

Si basa sull'uso di molti attuatori con movimenti diversi

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Lineari

- Motori lineari:
 - il moto generato è traslazionale
 - invece del rotore si ha un movente che si muove in linea retta
 - nessuna trasformazione cinematica per ottenere moti rettilinei

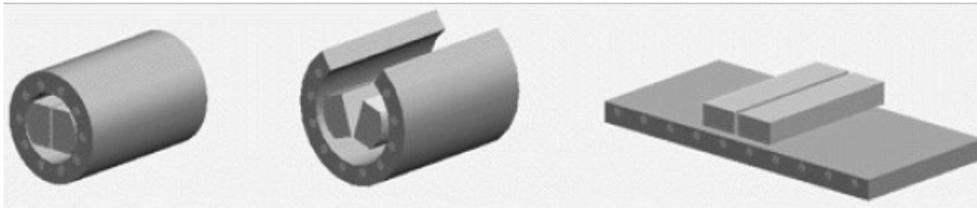


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi di Funzionamento

Gli stessi effetti elettromagnetici che fanno muovere i motori rotazionali sono alla base del movimento dei motori lineari

L'unica differenza è che rotore e statore di fatto sono "srotolati"



Anche in questo caso si differenziano motori a riluttanza variabile (passo-passo) e motori a riluttanza costante (asincroni, sincroni)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tecnologia

- **Passo-Passo:**

Pro: precisione, coppia a fermo, uso anche in catena aperta.

Con: coppie fortemente non lineari, velocità e spinte limitate.



- **Asincroni:**

Pro: elevate spinte e velocità, economici (no magneti permanenti)

Con: no coppia a fermo, complessità nel controllo e alimentazione



- **Sincroni (brushless):**

Pro: semplici, sufficiente spinta e velocità

Con: usano magneti permanenti

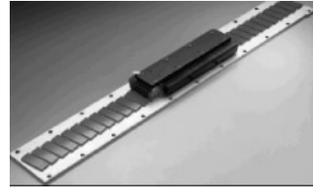
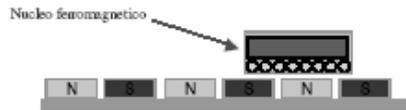


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Monolateri

- **Struttura:**

pista costituita da magneti permanenti su cui si muove un cursore con gli avvolgimenti e i cavi di alimentazione



- **Vantaggi:**

elevati valori di picco di spinta (15 kN), buona dissipazione del calore

- **Svantaggi:**

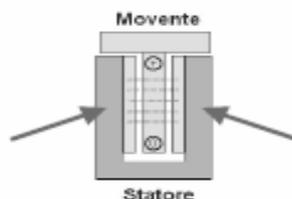
forza di attrazione e alta inerzia del movente, campo asimmetrico

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Bilateri

- **Struttura**

Movente circondato da statore da entrambi i lati



- **Vantaggi**

Campo simmetrico, nessuna forza di attrazione, massa ridotta

- **Svantaggi**

Cattiva dissipazione, spinta <math><2\text{kN}</math>

Usato nelle macchine Pick and Place e nei robot cartesiani

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- **Struttura**

Il movente è un magnete permanente, che scorre in uno statore cilindrico alimentato ... *oppure* ...

Il magnete permanente è fisso ed il movente è alimentato



- **Vantaggi**

Ottimo sfruttamento campo magnetico, buon comportamento termico, bassi costi

- **Svantaggi**

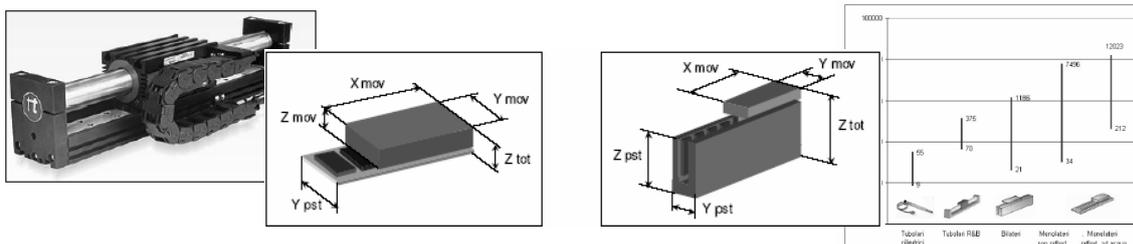
Corsa limitata, la spinta cala in fase di estensione

Usato in spingitori/pistoni elettrici

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Specifiche Principali

Corsa	i tubolari limitati a 2-3 m, gli altri estendibili
Velocità	fino a 10 m/sec
Accelerazione	fino a 20 g ($g=9.8 \text{ m/sec}^2$ accelerazione di gravità)
Massa	divisa in massa del movente e dello statore
Forza Cont.	forza che il motore può erogare in modo continuo
Forza di Picco	forza che il motore può erogare per brevi istanti
Temp. Max	massimo valore di temperatura di esercizio
Raffreddamento	ad aria, aria forzata o acqua



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dimensionamento

- Stesso approccio dei motori rotazionali (es. *Dimensionamento Motori*) con forze e traslazioni invece di coppie e rotazioni
- **N.B.** nel dimensionamento bisogna usare la forza continua:

$$F_{RMS} \leq F_{cont}$$

$$F_{RMS} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T F^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove F_{cont} è la forza continua del motore, F_{RMS} è il valore efficace della forza e $F(t)$ è la risultante delle forze esterne ad ogni istante di tempo

- Inoltre deve essere verificata la seguente condizione sulla forza massima richiesta rispetto alla forza di picco del motore

$$F_{max} \leq F_{peak}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dimensionamento(2)

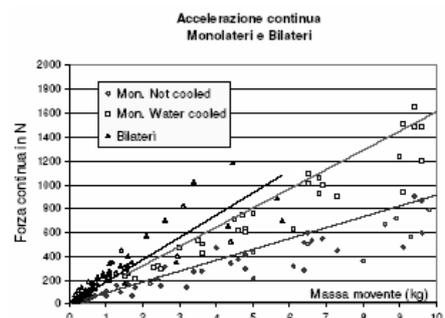
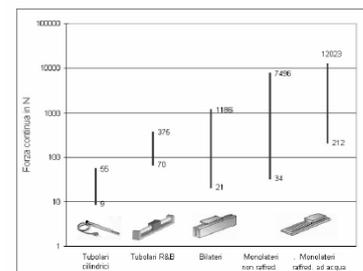
Il valore di spinta dipende dal tipo di motore.
Spesso il dato importante è l'accelerazione:

$$a_{th} = \frac{F_{cont}}{m_{mov}}$$

a_{th} : accelerazione teorica continua

Motore monolatero: ha la massima spinta ma la massa del movente è maggiore degli altri. Il motore che fornisce la max accelerazione è il bilatero.

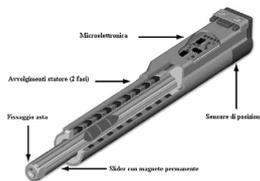
N.B.: vale nel caso in cui la massa del movente sia prevalente nel sistema.



Valori max di a_{th} : 19 g bilateri, 16.5 g monolateri raffreddati ad acqua, 9.3 g monolateri non raffreddati

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- I motori lineari permettono di generare moti traslazionali senza bisogno di trasformazioni cinematiche: nè attriti nè componenti aggiuntive.
- Ancora poco diffusi → i prezzi sono elevati.
- In laboratorio di automatica è presente un motore lineare cilindrico *LINMOT* a disposizione per tesi e tirocini.
- Un'applicazione dei motori lineari:
→ automatizzare un calcio balilla



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Elettrici

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08