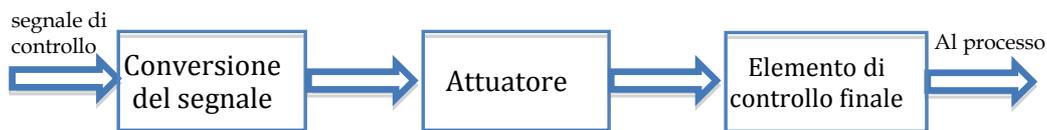


## Attuatori

Nelle applicazioni di controllo, l'acquisizione delle variabili da controllare e l'elaborazione delle leggi di controllo è realizzata attraverso controllori (analogici o digitali) che lavorano a livello di segnale e quindi a basse potenze. La variabile elaborata dal controllore è inviata al processo anch'essa espressa in rappresentazioni a bassi livelli di potenza. Il processo controllato, invece, può implicare condizioni che richiedono altissimi livelli di potenza.

La funzione di quello che può essere chiamato *l'elemento di controllo finale* è quella di convertire segnali a bassa energia in azioni di controllo del livello energetico richiesto dal processo. Ha dunque una funzione di amplificazione e di trasduzione del segnale in uno di natura completamente differente. Al contrario dei sensori, l'elemento di controllo finale è spesso parte integrante del processo. La conversione del segnale generato dal controllore nella azione da esercitare nel processo può essere schematizzata nei seguenti passi:



Il segnale di controllo in uscita dal controllore è tipicamente un segnale elettrico, una corrente o una tensione (nell'ordine dei mA o mV), oppure, in presenza di controllori digitali, una stringa di bit.

Il primo passo è la conversione del segnale e rappresenta le operazioni da fare per potersi interfacciare con l'attuatore. Se il controllore è digitale e l'elemento di controllo finale è una valvola, l'attuatore può essere un motore elettrico che movimenta l'apertura e chiusura della valvola. In questo caso la conversione del segnale è eseguita da un convertitore analogico/digitale e da un amplificatore di potenza.

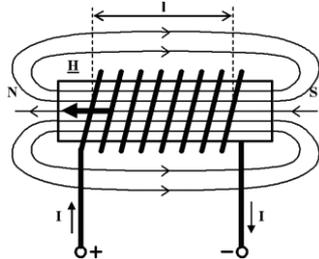
L'attuatore è il dispositivo che converte il segnale di controllo in un'azione sull'elemento di controllo finale (non direttamente sul processo).

Infine, l'elemento di controllo finale ha una influenza diretta sulle variabili dinamiche del processo ed è parte integrante del processo. Può essere una valvola, un nastro trasportatore etc.

La classe degli attuatori che vedremo è quella dei dispositivi elettromeccanici, cioè sistemi in grado di convertire energia meccanica in energia elettrica e viceversa. In un attuatore elettromeccanico, un sistema elettrico è accoppiato a un sistema meccanico attraverso un campo elettromagnetico. Si sfrutta il fatto che immergendo in un campo magnetico un conduttore percorso da corrente, il campo magnetico esercita sul conduttore una forza meccanica, per lo stesso principio, se un conduttore viene spostato all'interno di un campo magnetico su di esso si induce una tensione elettrica. Nel caso in cui la trasformazione è dal dominio meccanico a quello elettrico, si parla di **generatore**, nel caso contrario (dal dominio elettrico a quello meccanico) di **motore**.

## Solenoide

Il solenoide è il più comune degli attuatori elettrici. E' un dispositivo che converte un segnale elettrico in un movimento lineare causato da un campo elettromagnetico. Il solenoide consiste in una bobina e in un nucleo di materiale magnetico che può muoversi in maniera libera o vincolata da una molla elastica.



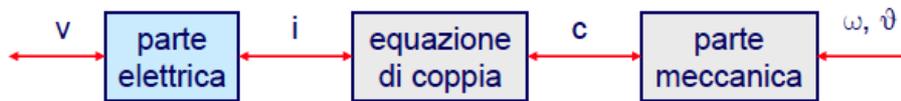
Può avere un tipo analogico o binario (presenza o assenza di segnale).

funzionamento di Quest'ultimo è il

funzionamento più comune. In pratica si genera una forza improvvisa quando è applicato un segnale elettrico. La presenza della molla connessa al nucleo permette in ritorno di questo alla posizione di riposo quando non è alimentato. I comuni relè consistono proprio in uno o più solenoidi che azionano contatti elettrici. Un altro uso comune nell'automazione è quello dei divertitori su nastri trasportatori.

Anche il solenoide rotante è piuttosto comune, soprattutto usato in modo analogico (è l'attuatore dei tester analogici). In questo caso c'è un nucleo di materiale magnetico che ruota intorno al proprio asse polarizzato da una bobina producendo una forza dovuta alla presenza del magnete permanente.

## Motori a corrente continua



In un motore elettrico si possono distinguere tre parti connesse tra di loro:

1. **parte elettrica:** è costituita da un circuito elettrico dinamico che immagazzina una potenza elettrica pari a  $V(t) i(t)$  dove  $V(t)$  è la tensione istantanea ai morsetti e  $i(t)$  è la corrente istantanea che circola nel circuito.
2. **parte meccanica:** è un sistema dinamico, solitamente rotativo, che immagazzina una potenza meccanica pari a  $C(t)\omega(t)$  dove  $C(t)$  è la coppia cui è sottoposto il sistema e  $\omega$  è la velocità di rotazione;
3. **equazione di coppia:** è l'equazione statica che lega, grazie al fenomeno di accoppiamento elettromagnetico, la corrente circolante nella parte elettrica con la coppia.

Oltre che tra coppia e corrente esiste una relazione anche tra tensione e velocità di rotazione: se l'ingresso al sistema è una velocità di rotazione alla parte meccanica, l'uscita è una tensione ai capi della parte elettrica, viceversa, se l'ingresso è una tensione ai capi della parte elettrica l'uscita è una velocità di rotazione della parte meccanica.

### Leggi fisiche

Il principio fisico alla base della generazione di coppia all'interno dei motori elettrici è la legge di Lorentz, che definisce la forza  $F$  agente su una carica elettrica  $q$  in moto con velocità  $v$  in un campo magnetico di intensità  $B$  come

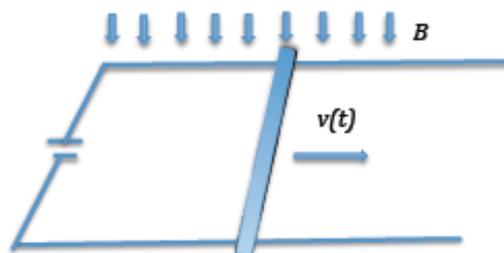
$$F = qv \times B.$$

Per lo stesso principio se un conduttore di lunghezza  $l$ , percorso da corrente  $I$  è immerso in un campo magnetico uniforme di intensità  $B$ , su di esso agisce una forza meccanica che tende a farlo muovere in direzione ortogonale sia al campo magnetico che al conduttore

$$F = lI \times B.$$

In particolare se il campo e il conduttore sono ortogonali la forza si può scrivere  $F = BlI$ .

La trasformazione che avviene in un motore elettrico può essere schematizzata col seguente circuito, dove un conduttore rettilineo è libero di scorrere in un campo magnetico uniforme appoggiato su altri due conduttori che lo alimentano. La sorgente di tensione esterna fa circolare corrente e quindi il conduttore è soggetto ad una forza che lo sposta ad una velocità  $v$  determinata dall'equilibrio tra la forza motrice e quella resistente di natura meccanica.



A causa di questo moto il conduttore è soggetto anche a una forza detta forza controelettromotrice dovuta alla legge di Lenz: se in un circuito elettrico il flusso concatenato varia nel tempo si genera una tensione

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

dove  $\Phi$  è il flusso magnetico. Tale forza contro elettromotrice tende a far circolare nel conduttore una corrente opposta a quella dovuta alla tensione esterna ( $RI$ ). Se si vuole mantenere inalterata la corrente che circola nel conduttore e quindi la forza motrice bisogna rispettare l'equazione di equilibrio

$$V = E + RI.$$

Se si scrive il bilancio di potenze

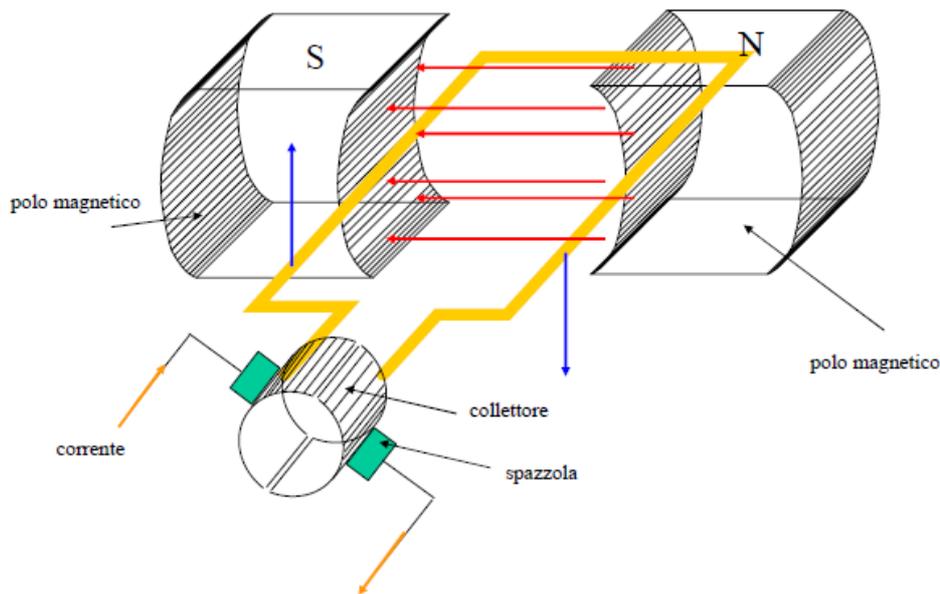
$$VI = EI + RI^2,$$

quindi la potenza elettrica erogata ( $VI$ ) viene in parte dispersa per effetto Joule ( $RI^2$ ) e in parte ( $EI$ ) assorbita dall'indotto per essere trasformata in potenza meccanica

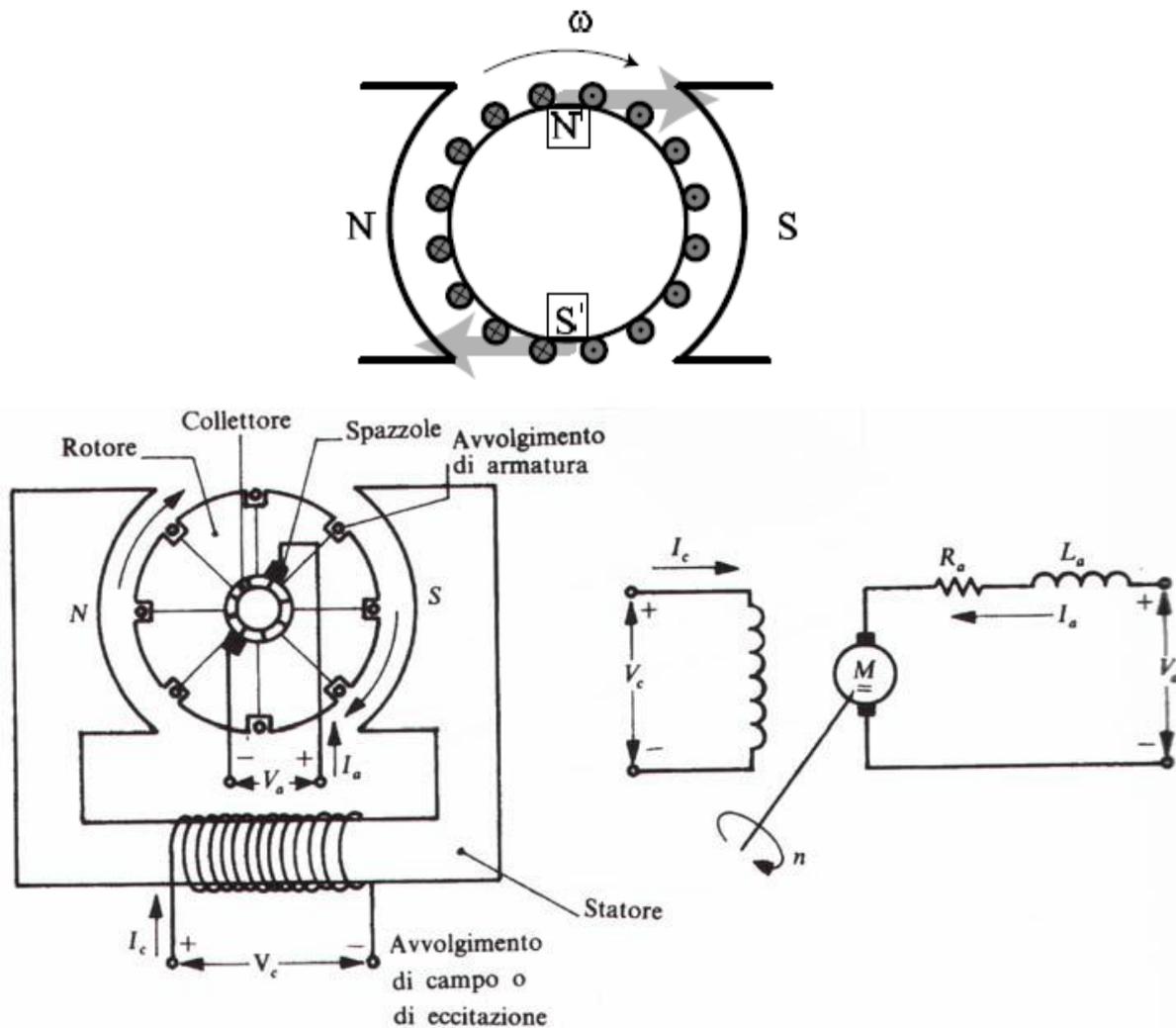
$$P_m = EI = Bliv = Fv.$$

Un discorso analogo si può fare per una spira conduttrice di area  $A$  che ruota in un campo magnetico  $B$ . Essa sarà sottoposta ad una coppia.

Nella sua forma più semplice il motore a c.c. presenta un magnete permanente che genera un campo magnetico uniforme tra i suoi due poli. Tra i poli c'è una spira conduttrice libera di ruotare intorno al proprio asse e connessa ad una sorgente di alimentazione esterna attraverso un commutatore a contatti striscianti (spazzole).



La corrente che scorre nella spira genera a sua volta un campo elettromagnetico che fa nascere su di essa una coppia motrice che tende a farla ruotare fino ad una posizione di equilibrio nella quale il piano della spira è perpendicolare al campo generato dal magnete permanente. In questa configurazione la coppia motrice sulla spira dipenderà dalla corrente che vi scorre, ma il suo valore istantaneo varierebbe al variare della posizione della spira. Per ovviare a questo problema (pulsazione di coppia) si ricorre ad una configurazione costituita da un unico avvolgimento che forma più spire intorno ad un cilindro di materiale ferromagnetico. Il cilindro è mobile e costituisce il rotore. Le spire avvolte sul rotore sono collegate a formare un circuito chiuso detto di armatura, mentre i magneti permanenti che generano il campo magnetico sono posti sulla parte fissa (statore). Il traferro, cioè lo spazio compreso tra statore e rotore, è sede di un campo magnetico che si può considerare rivolto in senso radiale. I conduttori attivi sono diretti parallelamente all'asse del rotore. Le spire del circuito di armatura fanno capo ad un commutatore (o collettore) che è a contatto con le spazzole (una o più coppie) in grafite o metallo prezioso. Le spazzole sono mantenute in contatto con il commutatore durante la rotazione consentendo il collegamento con un circuito elettrico esterno e fornendo potenza al circuito di armatura. Il commutatore è costituito da segmenti in rame, isolati con plastica o mica alle cui sporgenze sono collegati i terminali delle spire.



Nel funzionamento usuale il motore a c.c. è comandato per mezzo di un generatore di tensione che alimenta il circuito di armatura che genera il campo magnetico che fa variare la velocità di rotazione del rotore. Il flusso di eccitazione, oltre che da i magneti permanenti, può anche essere generato da un ulteriore circuito elettromagnetico, detto circuito di eccitazione e costituito da bobine alimentate tramite una tensione  $V_e$ . In questo caso per pilotare il motore è possibile agire sia sulla tensione di armatura (variano  $I_a$ ) che sulla

tensione di eccitazione (variando  $V_e$ ). Il circuito equivalente è mostrato in figura.

Scrivendo l'equazione di equilibrio elettrico per il circuito di armatura, si ottiene

$$V_a = R I_a + \frac{d\Phi_{ca}}{dt}$$

il flusso concatenato è funzione della corrente  $I_a$  che circola nel circuito di armatura (auto induzione), della corrente  $I_e$  che circola nell'eventuale circuito di eccitazione (mutua induzione) e della posizione relativa tra di essi,  $\theta$ .

La derivata del flusso vale

$$\frac{d\Phi_{ca}}{dt} = \frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial I_a} \left( \frac{dI_a}{dt} \right) + \frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial I_e} \left( \frac{dI_e}{dt} \right) + \frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial \theta} \left( \frac{d\theta}{dt} \right) = L_a \left( \frac{dI_a}{dt} \right) + M_{ae} \left( \frac{dI_e}{dt} \right) + \frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial \theta} \omega$$

dove  $L$  e  $M$  sono i coefficienti di auto e mutua induzione e  $\omega$  è la velocità di rotazione del rotore. I motori magneti permanenti sono costruiti in modo tale da mantenere costante l'ortogonalità dei due circuiti magnetici (anche in presenza di rotazione del rotore), pertanto il coefficiente di mutua induzione  $M$  è nullo e il termine  $\partial \Phi_{ca} / \partial \theta$  è costante per costruzione. L'utilizzo di un circuito di eccitazione separato richiede l'alimentazione (maggiori consumi), peggiora il rendimento, comporta caratteristiche non lineari (il

termine  $\frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial \theta}$  non è più costante) ma per contro consente di aumentare la velocità di rotazione. da qui in poi faremo riferimento al motore a magneti permanenti senza eccitazione esterna.



Quindi la equazione di equilibrio elettrico si può scrivere come

$$V_a = R I_a + L_a \left( \frac{dI_a}{dt} \right) + \frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial \theta} \omega$$

dove il terzo termine è la forza controelettrica

$$E = \frac{\partial \Phi_{ca}}{\partial \theta} \omega = k_e \omega$$

dove  $k_e$  è detta costante di forza controelettrica. Passando alle potenze abbiamo:

1. potenza dissipata  $P_d = RI^2$
2. potenza immagazzinata  $P_i = I_a \left( L_a \frac{\partial I_a}{\partial t} \right)$
3. potenza meccanica  $P_m = k_e I_a \omega$

Da queste relazioni, si ottiene l'equazione di coppia considerando che  $P_m = C * \omega = k_e I_a \omega$  si ha

$$C = k_e I_a = k_t I_a$$

$k_t$  è detto costante di coppia del motore ed è uguale alla costante di forza controelettrica.

Per quanto riguarda la parte meccanica da un bilancio di coppie si ottiene

$$J \frac{\partial \omega}{\partial t} = C_m(t) - C_r(t) - b\omega$$

dove  $b$  è il coefficiente di attrito,  $C_m$  è la coppia motrice,  $C_r$  è la coppia resistente (dovuta al carico) e  $J$  è il momento di inerzia.

Quindi il modello dinamico complessivo è dato da

$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_e \omega \\ K_t I_a = J \frac{d\omega}{dt} + b\omega + C_r \end{cases}$$

dove gli ingressi possono essere considerati la coppia resistente (carico del sistema) e la tensione di armatura, lo stato la corrente di armatura e la velocità di rotazione e l'uscita è la velocità di rotazione.

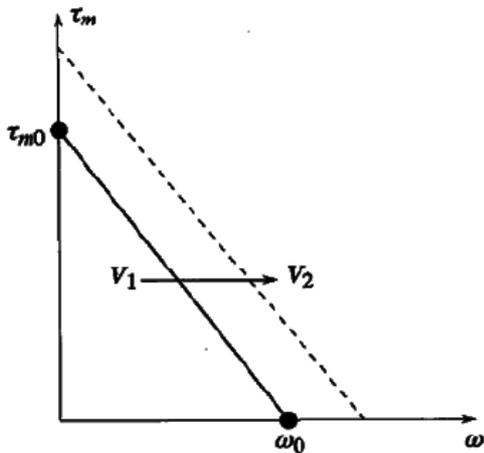
Nel funzionamento a velocità costante, anche le grandezze elettriche devono essere costanti (quindi  $I_a$  costante) e trascurando il termine di attrito, il modello diventa

$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + k_e \omega \\ K_t I_a = C_r \end{cases}$$

da cui si può facilmente ricavare la relazione tra la coppia motrice e la velocità

$$I_a = \frac{C_m}{k_t} \rightarrow V_a = R_a \frac{C_m}{k_t} + k_e \omega \text{ da cui si ottiene } C_m = \frac{k_t}{R_a} (V_a - k_e \omega)$$

Questa è la relazione coppia velocità. La coppia decresce *linearmente* all'aumentare della velocità, con *pendenza* indipendente dalla tensione applicata e dalla velocità di rotazione → pendenza pari a  $-K_t K_e / R_a$  dipende solo dalle caratteristiche elettriche e costruttive del motore



Questa è la caratteristica coppia velocità a tensione  $V_a$  costante ( $V_a = V$ ). Sulla caratteristica possono essere individuate due grandezze importanti:

**Coppia allo spunto**  $\tau_{m0} = \frac{k_t}{R_a}$

**velocità a vuoto**  $\omega_0 = \frac{V}{k_e}$

**Vantaggi del motore a c.c.**

L'uso di magneti permanenti per la generazione del campo induttore è la soluzione ideale per la regolazione della coppia. Infatti, il problema di regolazione è molto semplice perché la coppia è legata alla corrente di armatura da una costante di proporzionalità. Inoltre il modello dinamico della corrente al variare della tensione impressa alle spazzole è lineare. La coppia può essere modulata regolando la corrente di armatura agendo sulla tensione di alimentazione.

**Svantaggi del motore a c.c.**

L'utilizzo del collettore comporta problemi di *scintillamenti* e *usure*. L'insorgenza di tali problemi si può comprendere modellando il distacco tra la spazzola e una lamella del collettore mediante l'apertura di un interruttore. Una spira può essere modellata come una semplice induttanza  $L_s$ . All'apertura dell'interruttore si determinerà una **brusca variazione di corrente** in  $L_s$  che genera una **sovratensione** pari a  $L_s di/dt$  in grado di perforare il dielettrico posto tra i morsetti dell'interruttore → *scarica elettrica* (scintilla)



Scintille di debole entità sono ben sopportate dalle spazzole e dai segmenti del collettore, invece scintille di maggiore intensità e ripetute nel tempo possono provocare la bruciatura delle spazzole e la volatilizzazione del metallo delle lamelle → *usura progressiva del collettore*. Pertanto sarà necessario sostituire periodicamente le spazzole e rettificare il collettore. Le spire vengono progettate in modo da ridurre il più possibile l'induttanza.

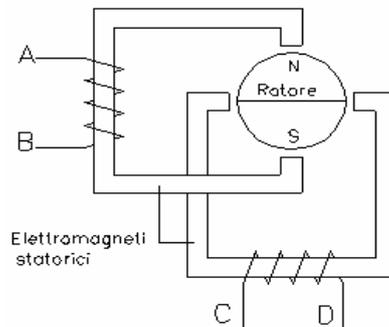
L'alternativa sono i motori **Brushless** (senza spazzole).

## Motori a Passo

I motori a passo sono attuatori elettrici che possono ruotare di incrementi angolari fissi (passi). Ogni passo di rotazione è la risposta del rotore ad un impulso applicato al suo ingresso, quindi ad ogni impulso di comando l'albero ruota di un angolo la cui ampiezza dipende dalla struttura della macchina e dalla modalità d'alimentazione. La velocità di rotazione è determinata dalla frequenza degli impulsi inviati. A seconda della struttura fisica interna con cui si realizzano rotore e statore potremo avere diversi tipi di motore passo-passo. In ogni caso, lo statore reca degli avvolgimenti mentre il rotore comprende soltanto una struttura magnetica. Gli avvolgimenti statorici sono realizzati con delle bobine di fili di rame, connessi in modo da formare un sistema polifase. Possiamo distinguere tra motori a magneti permanente (PM) e a riluttanza variabile (VR). Esistono anche motori ibridi che sfruttano i lati positivi di entrambi ma sono di complessa costruzione ed hanno un elevato costo, compensato da ottime prestazioni.

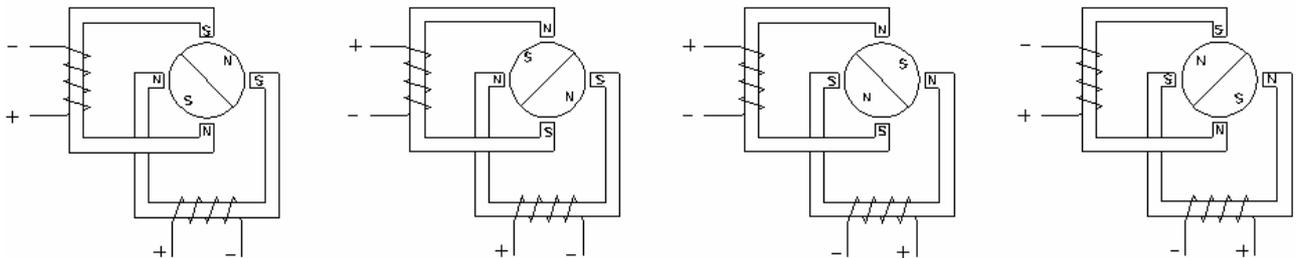
### Motore a magneti permanente

All'interno del motore vi sono due elettromagneti disposti in maniera ortogonale tra loro che rappresentano lo statore mentre il magnete permanente a due poli nel centro costituisce il rotore



Il sequenziatore di impulsi comanda i deviatori attraverso una sequenza di posizioni man mano che arrivano impulsi di comando.

I deviatori invertono il campo magnetico generato dagli elettromagneti provocando la rotazione del magnete permanente di 90° ogni passo. Il primo impulso cambia la polarità del primo elettromagnete facendo ruotare in senso orario il rotore. Poi si cambia la polarità del secondo elettromagnete che genera una seconda rotazione e così via. Se si inverte la sequenza di azionamento è possibile far ruotare il rotore nella direzione opposta.



La coppia generata dai due elettromagneti dello statore e del magnete permanente del rotore è usata per muovere il rotore stesso e il carico applicato. Inoltre una volta raggiunta la posizione di equilibrio, ogni coppia di disturbo applicata al carico troverà questa coppia a resisterle.

Per rimuovere il rotore dall'ultima posizione acquisita è necessario applicare una coppia anche se il motore non è alimentato. Tale coppia detta coppia d'arresto, è dovuta all'attrazione reciproca fra i poli rotorici, permanenti ed i poli statorici generati dal magnetismo residuo.

Gli svantaggi consistono nel fatto che gli avvolgimenti devono essere sempre alimentati e quindi consumano energia. Inoltre non si riescono ad avere passi troppo piccoli a causa di problemi costruttivi.

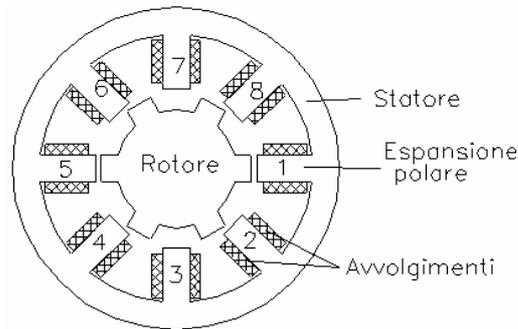
### Motore a riluttanza variabile

La riluttanza indica quanto un materiale si oppone al transito di un flusso magnetico

$$f.m.m = R\Phi$$

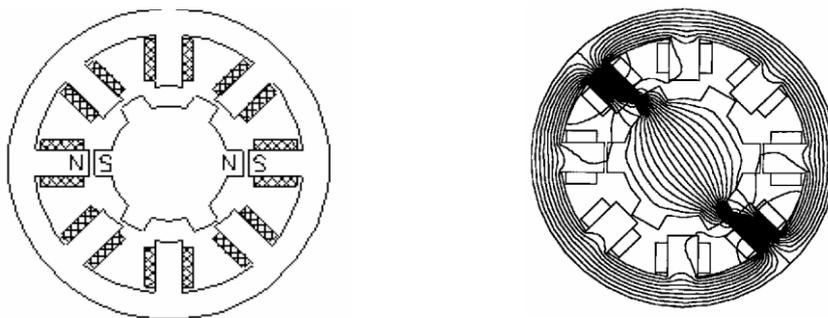
f.m.m=forza magnetica motrice, R riluttanza.

Il principio di funzionamento di questo tipo di motore è molto semplice. Si prenda in esame la figura, in cui è rappresentato un motore a passo a riluttanza variabile. Il rotore è costituito da materiale ferro-magnetico e sono presenti 6 espansioni polari, mentre nella struttura dello statore sono evidenti 8 espansioni polari: attorno a ciascuna di queste si trova un avvolgimento di eccitazione.



Nello schema ci sono 8 bobine di statore, alimentate in gruppi di due (1-5, 2-6, 3-7, 4-8). Ogni gruppo è denominato fase. Il rotore ha sempre un numero di denti inferiore al numero di poli statorici (6<8).

Se si alimenta una sola fase, i denti del rotore tendono ad allinearsi con l'insieme dei poli statorici alimentati che è più vicino ad ogni dente del rotore, cioè nella posizione di minore riluttanza magnetica tra il campo rotorico e quello statorico. Se si alimenta la fase successiva (2-6) il rotore si sposterà per presentare sempre minore riluttanza.



Il numero degli impulsi controlla l'angolo di rotazione, la frequenza degli impulsi controlla la velocità, mentre l'ordine dell'alimentazione delle fasi controlla il verso di rotazione. il numero di passi per giro è dato dalla formula

$$N = \frac{N_S N_R}{N_S - N_R}$$

dove  $N_S$  e  $N_R$  sono il numero di poli statorici e rotorici. L'ampiezza del passo è data da  $360/N$  gradi. Nel nostro esempio ( $N=24$ , ampiezza  $15^\circ$ ). Il numero di passi per giro può essere maggiore

di quello del motore a magnete permanente (passi di ampiezza minore). Non c'è bisogno di coppia d'arresto.

### *Parametri del motore a passi*

**Angolo di passo:** è questo l'angolo di cui si sposta il rotore quando, non soggetto ad alcun carico, viene eccitato con un impulso. E' possibile definirlo anche come numero di passi per rotazione. Il valore dell'angolo può essere compreso tra  $0,72^\circ$  e  $90^\circ$ .

**Precisione del passo:** è l'errore commesso nel posizionarsi rispetto al valore nominale, dovuto ad imperfezioni di costruzione: è dato in percentuale dell'angolo di passo. Valori possibili sono compresi tra 5% e 30%. Non è un errore cumulativo. Questo ultimo concetto è molto importante perché se è vero che ad un singolo passo corrisponde un errore non sempre accettabile, l'errore relativo diminuisce all'aumentare del numero dei passi.

**Coppia statica o di tenuta (*holding torque*):** è la massima coppia all'albero di macchina quando lo statore è alimentato

**Coppia residua (*detent torque*):** è la massima coppia presente all'albero quando nessuna fase di statore è alimentata (nel motore a riluttanza variabile la coppia residua è nulla).

	Magneti permanenti	Riluttanza variabile	Ibridi
Costo	basso	medio-alto	alto
Velocità	bassa	alta	molto alta
Coppia residua	alta	minima	media
Coppia di ritenuta	bassa	media	alta
Rendimento	medio	medio	alto
Precisione angolare	bassa	media	alta

### *Vantaggi*

1. Le piccole dimensioni, la buona robustezza meccanica ed elettrica.
2. Assenza di elementi striscianti come spazzole che possono produrre problemi di attrito e di usura.
3. Grande accuratezza del moto, possibilità di raggiungere elevati numeri di giri e la capacità di passi molto piccoli.
4. Grande facilità e accuratezza nel controllo anche a ciclo aperto. poiché ogni passo del motore è sincronizzato con gli impulsi che vengono direttamente dal controllore numerico. Quindi è possibile controllarli a ciclo aperto anche attraverso un computer.
5. Possibilità di rimanere bloccato "in coppia".

### *Svantaggi*

1. I valori coppia non elevati.
2. Impossibilità di eseguire rapide accelerazioni e decelerazioni a causa di una possibile perdita di passo, quindi velocità basse.
3. Il funzionamento a passi introduce forti vibrazioni.
4. Il movimento è dato da una successione di risposte a gradino, quindi la posizione effettiva del rotore dopo l'applicazione dell'impulso di comando presenterà una sovraelongazione e delle oscillazioni smorzate. Se l'impulso successivo arriva prima che si sia esaurito questo transitorio, è possibile avere

comportamenti anomali. Nel motore a magnete permanente il problema è minore a causa dello smorzamento del moto implicito nel tipo di costruzione, nei motori a riluttanza variabile se ne tiene conto con uno smorzamento esterno.

### *Campi di applicazione*

Nelle stampanti sono necessari almeno due motori, uno per la trazione della carta e uno per il movimento laterale del carrello: è evidente il vantaggio di utilizzare per questa movimentazione motori a passo, in quanto ogni movimento deve essere quantizzato. Infatti l'avanzamento della carta deve avvenire per ogni riga con lunghezza costante e con la possibilità di controllare esattamente di quanti passi è avanzata la carta; analogamente, per il movimento laterale è fondamentale controllare esattamente la posizione orizzontale della testina di stampa.

Come secondo esempio applicativo può essere analizzato l'impiego dei motori passo passo nei registratori a disco magnetico utilizzati in informatica come i floppy disk o gli hard disk.

Questi apparecchi hanno bisogno di due movimenti fondamentali. Un movimento è quello di rotazione del

disco, in cui è necessario un controllo a velocità assolutamente costante: per questa movimentazione un motore passo-passo pilotato a frequenza costante è una soluzione naturale, oppure può essere usato un motore in corrente continua. L'altro movimento necessario è quello radiale della testina di lettura, anch'esso realizzato con motore passo passo e con una semplice parte meccanica

Di grande importanza è l'applicazione di questi motori nel campo della lavorazione industriale; per avere un'idea è sufficiente pensare a quanti motori passo passo vengono impiegati nella produzione automatica degli integrati che poi serviranno per il controllo degli stessi.

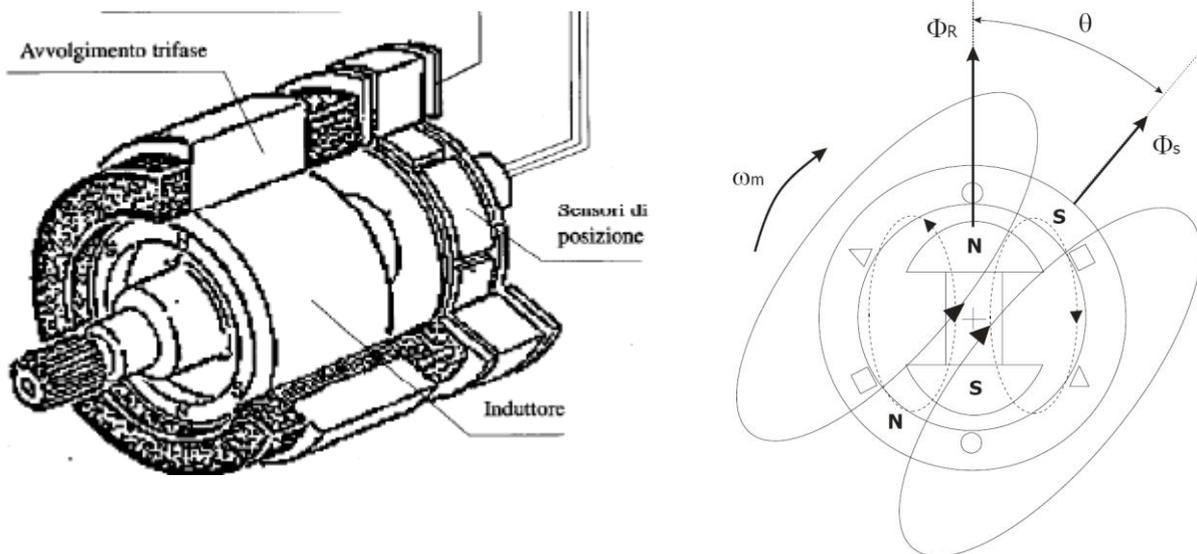
Un altro esempio di utilizzo dei motori a passo è in ambiente aerospaziale: sulle sonde tutti gli strumenti di rilevamento trasmissione dati (antenne ricetrasmittenti, telecamere, spettrometri) sono movimentate da motori a passo per il corretto puntamento sulla zona di interesse. Il controllo ad anello chiuso, con ritorno dei parametri cinematici, sarebbe molto difficoltoso a causa dei lunghi tempi di trasmissione fra il satellite e la Terra.

Per completare la carrellata delle macchine di comune uso si possono nominare fotocopiatrici, fax, ricamatrici, distributori automatici, lettori di schede magnetiche, lettori di compact disk, sistemi d'iniezione di liquidi, apparecchiature scientifiche, produzione di circuiti integrati, catene di montaggio.

## Motori a magneti permanenti brushless

La parola brushless significa senza spazzole e serve ad indicare un motore sincrono a magneti permanenti e commutazione elettronica. Come per qualsiasi altro motore abbiamo anche per il brushless uno statore ed un rotore dotato di magneti permanenti collocati sulla superficie esterna. Rispetto al motore in corrente continua il brushless ha l'indotto e l'induttore invertiti (l'induttore è il rotore che genera il campo magnetico e l'indotto è lo statore), ed inoltre per la commutazione non viene più usato il collettore ma un convertitore che opera commutando elettronicamente in funzione della posizione angolare del rotore.

I motori Brushless sono costituiti da un **rotore** su cui sono alloggiati i magneti permanenti e uno **statore** su cui vengono disposti gli avvolgimenti di fase (in genere tre). Il rotore genera il flusso magnetico di eccitazione.



Le correnti circolanti negli avvolgimenti statorici generano un campo magnetico statorico  $\Phi_s$ . Poiché sul rotore si ha un bipolo magnetico (N-S), i due campi magnetici (di statore e di rotore) interagiscono: si creano così delle forze di attrazione tra i poli di segno opposto ( $N_{\text{statore}} - S_{\text{rotore}}$  e  $S_{\text{statore}} - N_{\text{rotore}}$ ). Il rotore viene allora ad essere soggetto ad una coppia (di natura elettrica) che è espressa dalla relazione:

$$C_m = \Phi_R \Phi_s \sin(\theta)$$

dove:  $\Phi_s$  = intensità del flusso di statore,  $\Phi_R$  = intensità del flusso di rotore e  $\theta$  è l'angolo compreso tra le direzioni medie dei due campi.

Per effetto di tale coppia il rotore tenderà a ruotare con una certa velocità angolare ( $\omega_m$ ) in modo da raggiungere l'allineamento tra i due campi. La coppia è massima quando i due campi magnetici sono ortogonali fra loro e nulla quando questi sono allineati.

Quindi per mantenere il rotore in rotazione è necessario che il campo magnetico di statore sia sempre sfasato (la condizione ottima è che siano ortogonali) rispetto a quello di rotore.

E' chiaro che, per mantenere lo sfasamento mentre la macchina ruota, occorrerà commutare la corrente negli avvolgimenti di statore, in modo dipendente dalla posizione del rotore: quindi a monte ci dovrà essere un **inverter**, comandato da un segnale che rileva la posizione rotorica (ad esempio un **encoder** o un **resolver**). Le **Fasi** vanno alimentate in modo che il campo magnetico generato dalle relative correnti si mantenga sempre *ortogonale* e *sincrono* al campo generato dai magneti di rotore.

L'inverter svolge la stessa funzione svolta dal sistema spazzole-collettore in un motore a corrente continua, funge cioè da **commutatore elettronico** anziché meccanico. La **commutazione elettronica** consente di

eliminare il problema dell'usura legata alla scarica dell'energia elettromagnetica immagazzinata negli avvolgimenti.

In un certo senso è una macchina sincrona, perché i campi di rotore e di statore sono sempre mantenuti sincroni e sfasati tra loro per creare la coppia motrice.

I motori brushless possono essere alimentati con:

- campo trapezoidale, generato usando correnti costanti commutate opportunamente (Brushless a corrente continua)
- campo sinusoidale, generato da correnti variabili sinusoidali (Brushless a corrente alternata).

### Motore brushless trapezio

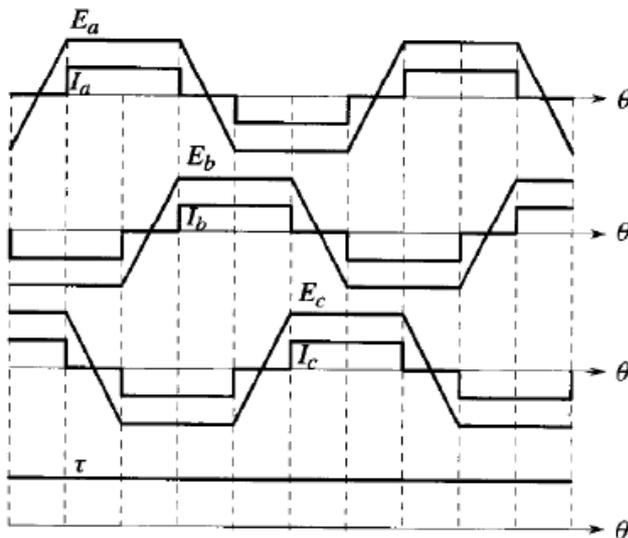
Nei motori brushless trapezio gli avvolgimenti sono alimentati con correnti continue che generano un campo magnetico concatenato con derivata rispetto all'angolo di rotazione costante per lunghi tratti ( $k_e$  costante). Ci sono 3 avvolgimenti statorici a  $120^\circ$  solitamente collegati a stella.

La potenza meccanica si ottiene come prodotto tra la corrente in ciascuna fase e la forza controelettromotrice da esse prodotta

$$P_m = I_a E_a + I_b E_b + I_c E_c = C_m \omega$$

da cui si ricava l'espressione della coppia motrice

$$C_m = \frac{I_a E_a + I_b E_b + I_c E_c}{\omega} \quad (*)$$



Le forze controelettromotrici sono date da

$$E_a = -\frac{d\Phi_a}{dt} = -\omega \frac{d\Phi_a}{d\theta}$$

In questi tipi di motori si ottengono delle forze controelettromotrici a profilo trapezoidale. Dalla relazione (\*), noto l'andamento delle forze controelettromotrici, si può determinare l'andamento da dare alle correnti in modo tale da avere una coppia indipendente dalla posizione angolare del rotore ( $k_e$  costante).

Allora, la coppia sull'intero arco di rotazione si può scrivere come

$$C_m = K_t I.$$

### Motori Brushless sinusoidali

La differenza rispetto ai precedenti sta nella *funzione di forma* ottenuta per le forze controelettromotrici indotte. In entrambi i casi, le forze controelettromotrici si possono esprimere come il prodotto della velocità angolare per una **funzione di forma**  $k_e(\theta)$

$$E_i = \omega k_e(\theta)$$

Sagomando opportunamente i magneti permanenti posti sul rotore è possibile ottenere una **distribuzione sinusoidale del campo magnetico**. Le funzioni di forma che si ottengono sono del tipo

$$\begin{aligned} k_a(\theta) &= pK \sin(p\theta) \\ k_b(\theta) &= pK \sin(p\theta - 2\pi/3) \\ k_c(\theta) &= pK \sin(p\theta - 4\pi/3) \end{aligned}$$

Per ottenere coppia costante rispetto alla posizione angolare del rotore è necessario alimentare gli avvolgimenti con correnti sinusoidali sfasate di  $120^\circ$ .

$$\begin{aligned}I_a &= I \sin(p\theta) \\I_b &= I \sin(p\theta - 2\pi/3) \\I_c &= I \sin(p\theta - 4\pi/3)\end{aligned}$$

In definitiva si ottiene anche in questo caso una coppia del tipo  $C_m = K_t I$ .

Il modello dinamico del motore brushless, in entrambi i casi, è analogo a quello del motore a corrente continua.

#### ***Vantaggi (rispetto ai motori a c.c.)***

- Assenza delle spazzole e quindi assenza di attrito, scintille
- Raffreddamento più facile perché l'alimentazione è nello statore e non nel rotore.
- Coppie allo spunto più alte e velocità maggiori
- Migliore rapporto peso-potenza
- Dimensioni molto ridotte
- Elevate accelerazioni meccaniche
- Ottima affidabilità
- Alta velocità di rotazione
- Minima manutenzione
- Idoneità al funzionamento anche in ambienti ostili

#### ***Svantaggi (rispetto ai motori a c.c.)***

- Necessità di un sensore di posizione
- Complessa logica di gestione della commutazione
- Difficoltà ad ottenere una coppia costante

Questi svantaggi si traducono in un costo maggiore.