

# Il controllo del moto con i motori passo-passo

I motori passo-passo sono contraddistinti da statori e rotor con proporzioni angolari in grado di favorire un adeguato sistema rotazionale basato sul principio magnetico

MATTEO MARINO

I motori passo-passo sono in grado di produrre rotazioni dell'albero estremamente precise e il controllo del moto e della velocità di rotazione è effettuabile senza circuiti di tipo retroattivo. Attraverso tali dispositivi è possibile ottenere spostamenti angolari predeterminati dell'albero motore e la coppia motrice, esercitata dal rotore, è generata dall'interazione tra i campi magnetici che si instaurano tra gli elementi fissi e mobili.

Il campo magnetico che si genera tra le unità è proporzionale al numero di spire del pacco statorico e può variare in funzione dell'intensità di corrente circolante negli avvolgimenti.

Il campo magnetico che si genera tra le unità è proporzionale al numero di spire del pacco statorico e può variare in funzione dell'intensità di corrente circolante negli avvolgimenti. Il passo di tali motori è condizionato dalle caratteristiche costruttive dei dispositivi che, di tipo a magneti permanenti, a riluttanza variabile o

ibridi, rispondono in modo differente alle esigenze del settore del controllo del moto.

## Il principio di funzionamento

Il principio di funzionamento dei motori passo-passo risiede nell'attrazione e repulsione che si genera tra poli magnetici opposti (N, S). I motori di questa categoria sono costruttivamente contraddistinti da avvolgimenti statorici e rotorici con precise proporzioni angolari che favoriscono un adeguato sistema rotazionale basato sul principio magnetico. Per comprendere la modalità di funzionamento è possibile avvalersi dell'esempio riportato in figura 1, nel quale compare la sezione di un motore passo-passo dotato di sei poli rotorici (3 Nord, 3 Sud) e quattro poli statorici rotanti.

L'impulso elettrico inviato alternativamente alle coppie di avvolgimenti dello statore determina l'attrazione dei poli del rotore a esse più vicini generando rotazioni consecutive del rotore di 30° ciascuna e ottenendo una rivoluzione completa dell'albero motore solo dopo dodici impulsi elettrici.

Durante l'inattività elettrica i magneti permanenti del rotore sono attratti dai campi magnetici residui dei poli statorici. La circolazione di corrente in modo alternato nelle spire delle coppie opposte dello statore provoca, invece, l'attrazione consecutiva dei poli rotorici generando una coppia motrice proporzionale alle caratteristiche elettriche del circuito del motore e all'intensità della corrente circolante nei poli della parte fissa.

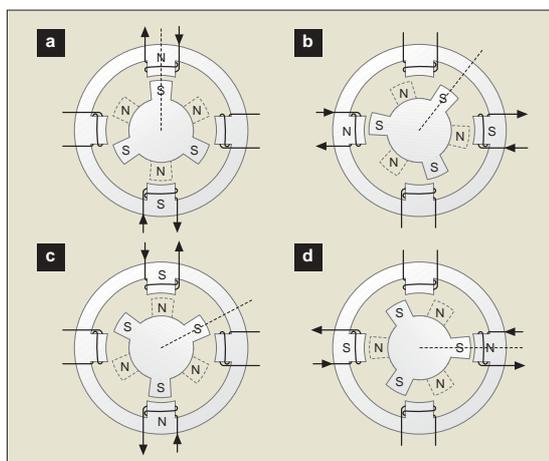
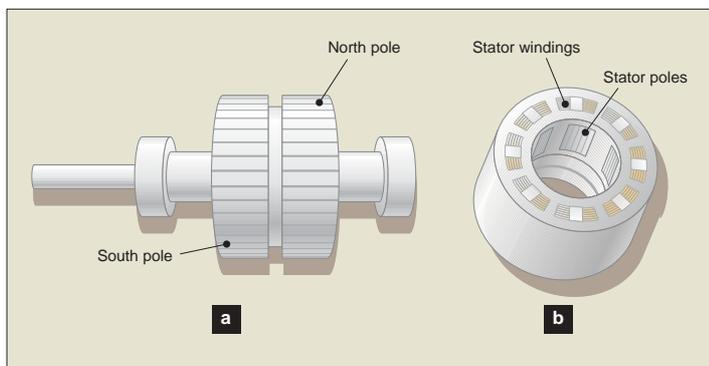


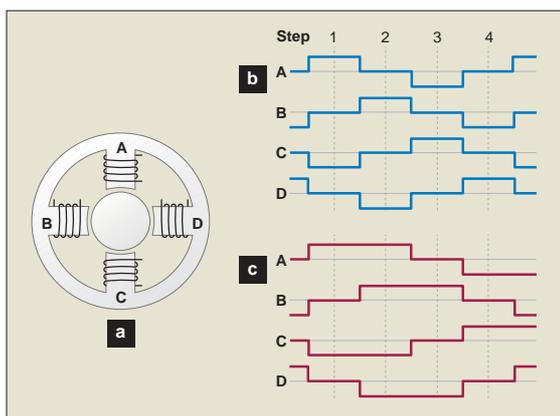
Fig. 1 - Per far ruotare il rotore di 90° è necessario eccitare le coppie statoriche opposte con quattro impulsi di corrente

## Tipologie di motori

I motori passo-passo convertono gli impulsi elettrici di corrente all'interno dei circuiti statorici in successive rotazioni predefinite dell'albero motore, in funzione delle caratteristiche costruttive della struttura del motore stesso.



**Fig. 2 - Componenti statorici e rotorici di un motore passo-passo a magneti permanenti**



**Fig. 3 - La differente eccitazione degli avvolgimenti genera una rotazione antioraria con passo di 90° nel primo caso e di 45° nel secondo**

$$\psi = \frac{(N_s - N_r)}{(N_s * N_r)} * 360^\circ$$

$\psi$ : passo angolare espresso in gradi  
 $N_s$ : Numero dei denti dello stator  
 $N_r$ : numero dei denti del rotore

$$N = \frac{\psi * (s/s)}{6}$$

$N$ : velocità del motore in giri/min  
 $\psi$ : passo angolare  
 $s/s$ : numero di passi al secondo

**Fig. 4 - Espressioni riguardanti il passo angolare e la velocità dei motori a riluttanza variabile in funzione delle caratteristiche costruttive**

so. Il passo del motore è costituito da una fase rotazionale che l'albero subisce in conseguenza di un singolo impulso elettrico di eccitazione nei circuiti dello stator. La peculiarità della rotazione predefinita rende i motori passo-passo ideali a numerose applicazioni nel settore della robotica e del controllo del moto, adattandosi facilmente a ricevere impulsi digitali per rotazioni prefissate. I motori a magneti permanenti e a riluttanza variabile costituiscono le due varianti principali dei dispositivi

passo-passo e di seguito ne sono descritti i criteri principali di funzionamento, oltre a una loro variante che ne accorpa gli elementi distintivi.

## Motori a magneti permanenti

I motori passo-passo di questo tipo sono costituiti da un rotore a magneti permanenti che reagisce alla sollecitazione elettromeccanica del campo magnetico rotazionale generato dagli impulsi elettrici che attraversano lo stator in successione. La figura 2 illustra una tipica struttura statorica e rotorica di un motore passo-passo a magneti permanenti; il rotore e lo stator sono realizzati con strutture dentate che costituiscono rispettivamente i poli magnetici permanenti della struttura rotante e rotazionali della parte fissa. La struttura illustrata a titolo esemplificativo fa emergere come il numero dei denti statorici e rotorici determini il passo rotazionale che il motore è in grado di produrre; più elevato è il numero dei denti presenti sulle ruote rotoriche, minore è il passo rotazionale che il motore è in grado di esercitare per ogni impulso elettrico. L'eccitazione degli avvolgimenti del rotore da parte di un omogeneo segnale in corrente continua genera un adeguamento del campo magnetico rotorico nei confronti del campo rotazionale statorico, originando conseguentemente la coppia motrice. La coppia motrice di un motore è costituita dal momento necessario per modificare di un passo la posizione del rotore, quando sottoposto a campo magnetico statorico rotante; una caratteristica importante che contraddistingue questi motori è costituita dalla capacità di mantenere la coppia motrice durante il bloccaggio del rotore. Nei motori di questa categoria la curva caratteristica di eccitazione dell'avvolgimento statorico può, inoltre, influenzare la velocità e la direzione della rotazione dell'asse del motore. Nella figura 3 sono illustrate due fasi differenti di eccitazione degli avvolgimenti che influiscono in modo diverso sulla rotazione. Nel primo caso l'eccitazione delle coppie di avvolgimenti dei poli è effettuata alternativamente generando una rotazione in

senso antiorario con passo di 90°. Nel secondo caso, invece, l'introduzione di impulsi sovrapposti nelle spire dello stator genera una rotazione antioraria con un passo di 45°. Il progresso tecnologico applicato ai motori passo-passo ha indotto i costruttori di tali dispositivi a orientarsi alla progettazione e costruzione di propulsori elettrici a magneti permanenti a disco sottile. Tali dispositivi sono, infatti, in grado di elevare la efficienza dei sistemi dissipando il calore generato durante la circolazione della cor-

rente all'interno dei blocchi statorici. L'efficienza dei motori è un parametro importante nella valutazione del rendimento globale di un dispositivo elettrico di movimentazione soprattutto in applicazioni robotizzate, ove la generazione di calore può causare anomalie di funzionamento. I motori di questa categoria sono in grado, inoltre, di ruotare a una velocità almeno doppia dei motori passo-passo convenzionali e i dischi magnetici permanenti, costruiti in lega di cobalto, sono avvolti da due segmenti statorici distinti.

## Motori a riluttanza variabile

I motori passo-passo a riluttanza variabile si distinguono dagli omologhi a magneti permanenti sia costruttivamente sia dal punto di vista del principio di funzionamento. Tali motori non sono, infatti, dotati di rotor a magnete permanente e non sono soggetti alla coppia residua negli stati di inattività. Il funzionamento dei motori a riluttanza variabile si basa sulla minimizzazione di tale grandezza che esprime il rapporto tra la forza magnetomotrice applicata al circuito magnetico del motore e il flusso di induzione esistente nel circuito stesso. La minimizzazione della riluttanza durante la circolazione della corrente negli avvolgimenti determina l'inseguimento da parte del rotore nei confronti del flusso elettrico rotante. Lo statore dei motori a riluttanza variabile ha un nucleo magnetico costituito da un pacco lamellare di acciaio mentre il rotore è composto di un blocco di acciaio non magnetico dentato. Il passo angolare di tali motori è proporzionale al numero dei denti presenti sullo statore e sul rotore e dipende dalla relazione riportata in figura 4.

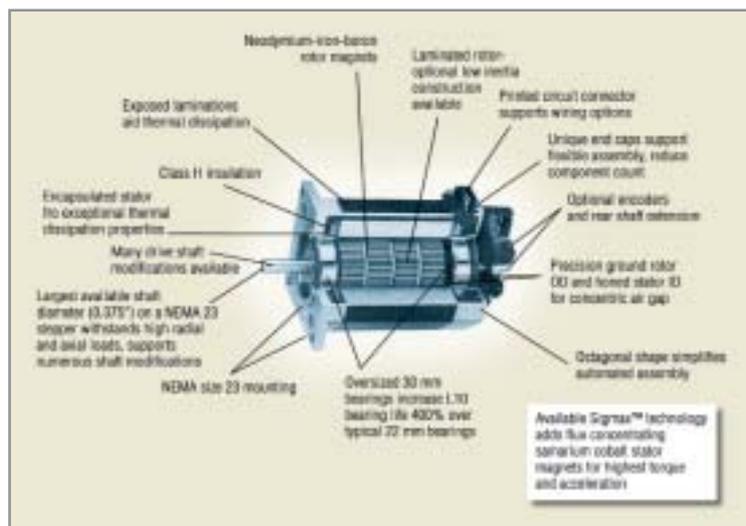


Fig. 5 - Rappresentazione di un motore passo-passo ibrido

## Motori ibridi

I motori ibridi a passo-passo (figura 5) sfruttano entrambi i principi di funzionamento dei precedenti sistemi descritti e sono costituiti da rotor a magnete permanente e da statore con nucleo costruttivamente simile a quello dei motori a riluttanza variabile. La differenza sostanziale riguarda la struttura statorica che, nei motori ibridi, è costituita da entrambi gli avvolgimenti polari. La configurazione dei collegamenti elettrici dei motori ibridi è detta connessione bifilare e ogni polo è caratterizzato dalla presenza di denti di acciaio dolce uniformemente disposti. I denti presenti sulle due sezioni di ogni polo sono disallineati di una quota, pari a mezzo passo nei confronti degli altri denti, e la coppia motrice è generata dall'interazione del campo magnetico dei magneti permanenti del rotore con il campo magnetico prodotto dallo statore. I motori di questa categoria sono classificabili in funzione del numero di passi compiuti per unità di tempo (stepping rate), della quota angolare del passo e della coppia motrice in grado

## Vantaggi e svantaggi

I motori passo-passo sono utilizzati, come i servomotori, in applicazioni di controllo del moto. Disponibili in varie dimensioni e potenze, i motori di questa categoria sono solitamente più economici degli omologhi servomotori oltre a presentare alcuni ulteriori vantaggi. I motori passo-passo non richiedono, infatti, l'utilizzazione di sistemi di controllo in anello chiuso e, anche se forniscono livelli limitati di coppia motrice ad alte velocità di rotazione, sono in grado di esercitare momenti significativi a velocità basse. Nelle fasi di inattività i motori passo-passo sono, inoltre, in grado di esercitare una coppia di bloccaggio del rotore superiore rispetto ai servomotori simili. Ulteriori benefici sono costituiti dalla limitata manutenzione necessaria in conseguenza dell'assenza di elementi striscianti e dalle elevate prestazioni nelle attività di posizionamento in funzione delle specifiche caratteristiche (passo). Gli svantaggi maggiori offerti dall'uso dei motori passo-passo rispetto ai servomotori sono costituiti dalle prestazioni limitate a basse velocità (a meno dell'utilizzazione di sistemi di microstepping), dai consumi di corrente significativi, dalla rumorosità, dal decremento della coppia motrice al crescere della velocità di rotazione e dai rischi derivanti dall'assenza di circuiti retroattivi per il controllo delle funzionalità del motore. La scelta dei motori passo-passo idonei ad applicazioni pratiche di controllo del moto deve prevedere l'osservanza di regole precise basate sulla valutazione di otto specifici parametri caratteristici. I parametri che contraddistinguono integralmente i motori passo-passo sono costituiti dalla velocità operativa espressa in passi per unità di tempo (step/s), dal valore della coppia, dal momento di inerzia, dal valore di step minimo offerto dalla macchina, dai tempi di accelerazione e di decelerazione, dal tipo di sistema di controllo e dai parametri dimensionali e di peso del dispositivo. La selezione di appropriati sistemi di propulsione elettrica può essere eseguita semplicemente assecondando le necessità espresse dalle specifiche calcolando, ove necessario, i valori dei parametri non identificati dai costruttori.

di produrre. La velocità che i motori passo-passo possono raggiungere è dipendente sia dallo stepping rate sia dal passo angolare e può essere calcolata attraverso la relazione in figura 4. Come si evince dalla relazione, la coppia motrice ottenibile dai motori con tali caratteristiche è inversamente proporzionale al numero di passi che il motore è in grado di effettuare per unità di tempo. La direzione della rotazione dell'albero motore è ottenuta attraverso un idoneo processo di eccitazione degli avvolgimenti e il posizionamento angolare del rotore è ottenuto, in modo estremamente preciso, mediante specifiche combinazioni di impulsi. L'assenza di circuiti di retroazione per il controllo della posizione dell'albero motore rende estremamente semplici i sistemi di controllo dei motori passo-passo. Uno dei più diffusi circuiti di controllo dei motori passo-passo è costituito da drive unipolari che, utilizzando avvolgimenti bifilari e quattro transistor di tipo Darlington, esercitano il pieno controllo della direzione e dello stepping rate dei motori. Le differenze costruttive tra i dispositivi ibridi, a magnete permanente e a riluttanza variabile rendono tali apparecchi idonei ad applicazioni diverse.

### Passo-passo ma in linea

Tra i motori della categoria dei passo-passo si evidenziano anche quelli di tipo lineare, attraverso i quali è possibile ottenere un movimento lineare discreto invece che rotatorio con le medesime caratteristiche di controllabilità e precisione. La struttura principale di un motore lineare di questa categoria (figura 6) è composta da un piano dentato e da un dispositivo magnetico che, rispettivamente, costituiscono la parte statorica e la sezione di movimentazione (cursore). Il piano fisso, non magnetico, è costituito da una superficie a denti dritti simile alla superficie dei rotori dei motori tradizionali. Il cursore è composto da quattro poli, ognuno dei quali avente una struttura dentata a tre denti dritti con passo identico alla struttura fissa ma con allineamento differente. Le superfici dentate contrapposte del cursore e della piastra statorica sono mantenute a una distanza predefinita in funzione delle caratteristiche magnetiche della macchina e il campo magnetico del cursore, modificato dall'eccitazione degli specifici avvolgimenti induttivi, determina l'attrazione dei denti disallineati, con conseguente spostamento lineare del carro. Il cursore subisce uno spostamento pari a un passo completo attraverso l'applicazione di quattro impulsi di corrente in ognuno degli avvolgimenti. Il cursore è formato da due elementi magnetici con i relativi avvolgimenti induttivi (A, B) e un elemento a magnete permanente centrale. Mentre la dentatura della parte inferiore del carrello concentra il campo magnetico che si stabilisce durante il moto, i denti delle quattro sezioni dei poli sono disposti in quadratura solo alternativamente. La corrente elettrica di eccitazione degli avvolgimenti del cursore genera un flusso magnetico che avvolge anche i denti del piano fisso, originando l'allineamento delle linee di forza che consegue in uno spostamento del curso-

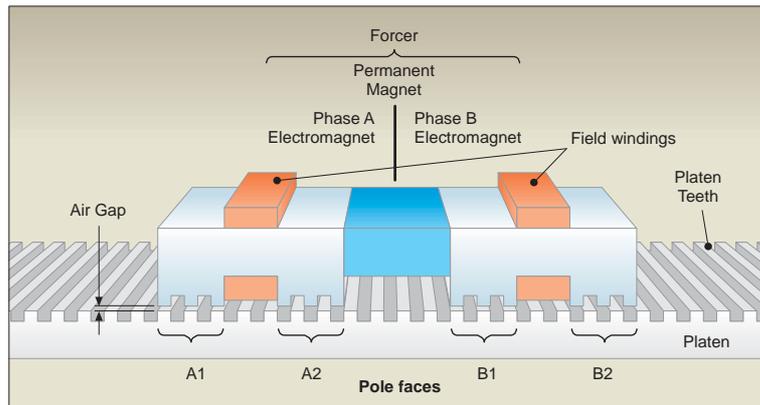


Fig. 6 - Schema di un motore passo-passo di tipo lineare

re. Il sistema di controllo dei motori passo-passo lineari determina il verso del moto mediante un'ideale fase di eccitazione dei circuiti induttivi del cursore ed è solitamente equipaggiato con un microprocessore direttamente collegato a un convertitore analogico/digitale, un amplificatore di corrente, un sistema di amplificazione per l'accelerometro e blocchi di memoria ROM/Eprom per la memorizzazione di specifici programmi di movimentazione. ■