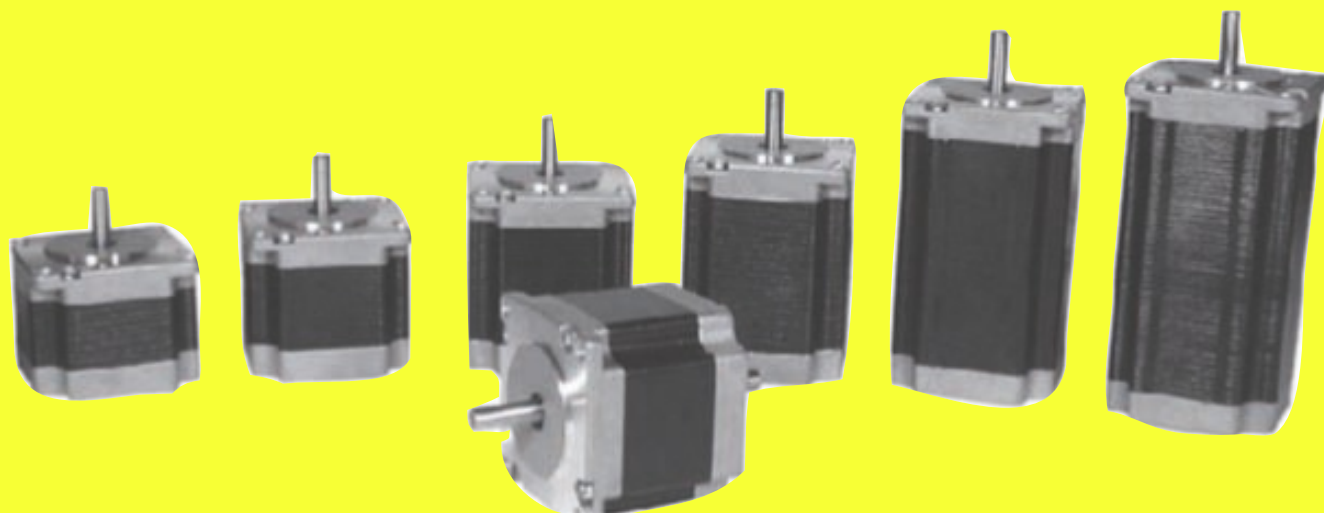
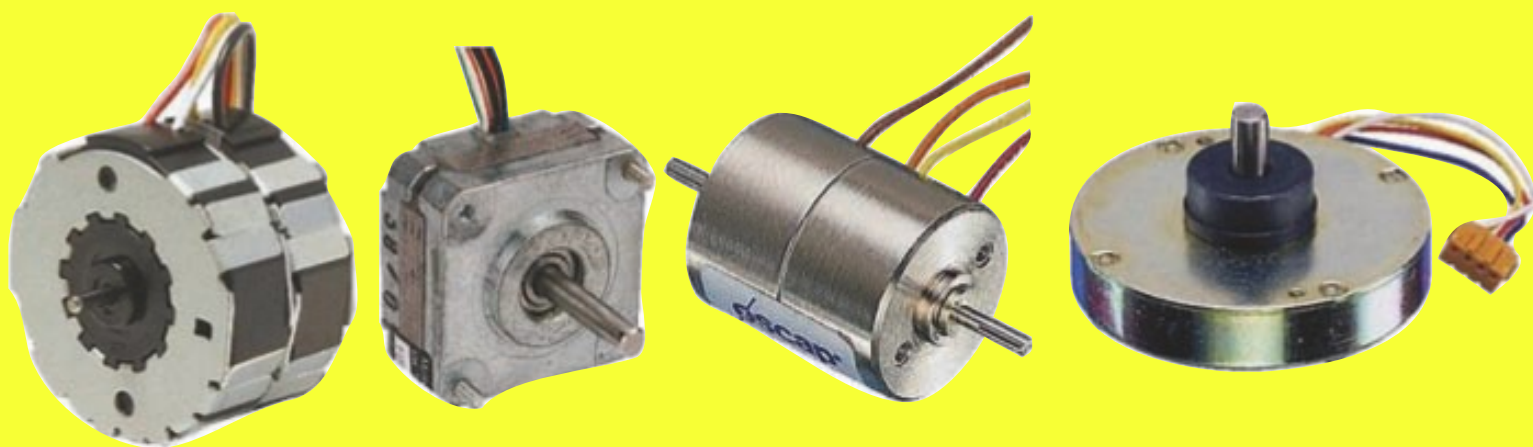


IE-CLOUD FOCUS



I MOTORI PASSO-PASSO



I motori passo-passo (prima parte) di Antonio Giannico

TIPOLOGIE di MOTORI

I motori passo-passo, anche noti tecnicamente come stepper motor, sono macchine elettriche estremamente versatili utilizzati in una infinità di applicazioni, soprattutto negli azionamenti elettrici incrementali. Le loro caratteristiche elettromeccaniche e la loro affidabilità rendono questi motori elettrici unici nel loro genere. Scopriamo come sono fatti, su quali principi si basa il loro funzionamento, quali sono i loro pregi e quali le loro applicazioni

I motori passo-passo sono macchine elettriche che presentano caratteristiche specifiche che li rendono differenti da qualunque altro tipo di motore elettrico e adatti ad applicazioni in cui qualunque altro motore elettrico sarebbe di difficile impiego. Trattare in modo organico e sufficientemente completo l'argomento richiede uno spazio abbastanza ampio, motivo per cui si è preferito scomporlo in due parti. Nella prima parte (il presente articolo) tratteremo le generalità sui motori passo-passo, ne illustreremo le diverse tipologie esistenti e tecnicamente realizzate oggi e ne analizzeremo il principio di funzionamento in modo da poter poi porre l'attenzione sulle sue principali caratteristiche statiche e dinamiche. Tutto questo ci consentirà di dedurre in maniera naturale quali siano i vantaggi e gli svantaggi

legati all'impiego di questi motori e quindi di delinearne in maniera ovvia i campi applicativi. Concluderemo pertanto il presente articolo lasciando alla seconda ed ultima Parte, che sarà presentata nel prossimo numero di Fare Elettronica, gli approfondimenti che riguarderanno soprattutto un argomento cruciale e imprescindibile quando si parla di motori passo-passo: i circuiti di pilotaggio e l'elettronica di controllo.

GENERALITÀ SUI MOTORI PASSO-PASSO

I motori elettrici sono macchine elettriche rotanti capaci di convertire l'energia elettrica in energia meccanica e per questo sono impiegati in una infinità di applicazioni sia industriali che non industriali, dagli elettrodomestici a sistemi meccanici complessi. L'energia di movimento in cui

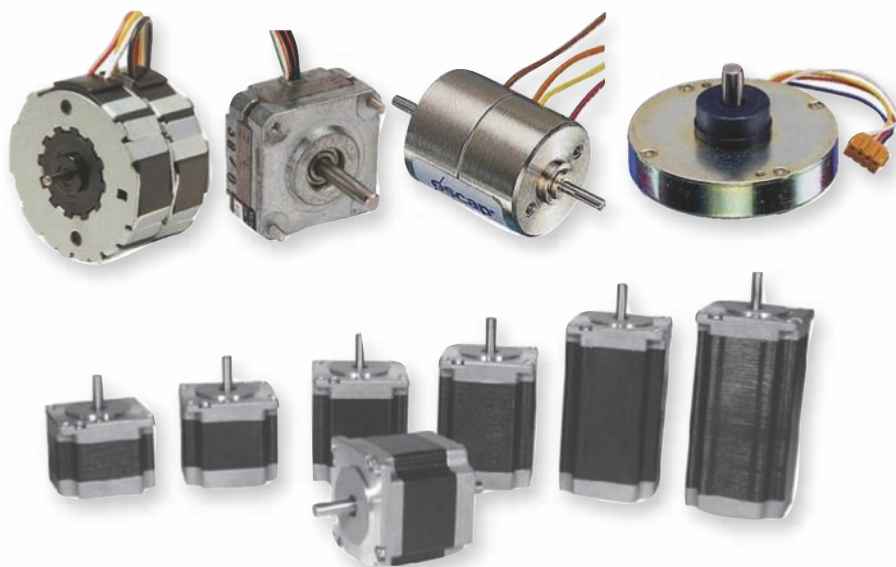


Figura 1: alcune tipologie di motori passo-passo diffusi in commercio.

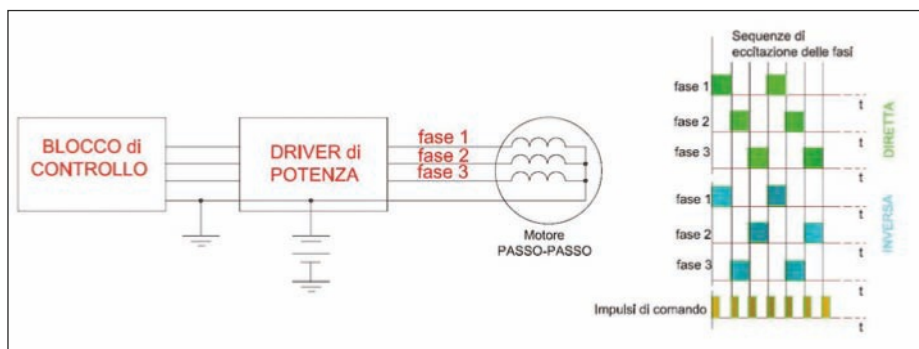


Figura 2: schematizzazione a blocchi di un motore passo-passo, della logica di controllo e delle fasi di eccitazione per un motore a tre fasi.

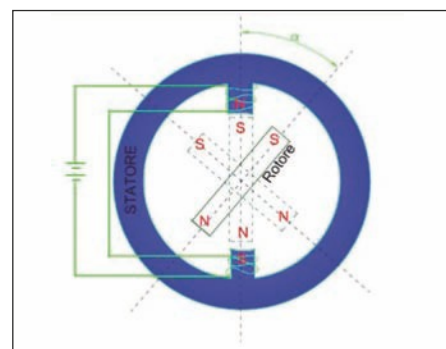


Figura 3: schematizzazione di un motore passo-passo a riluttanza variabile (VR Motor).

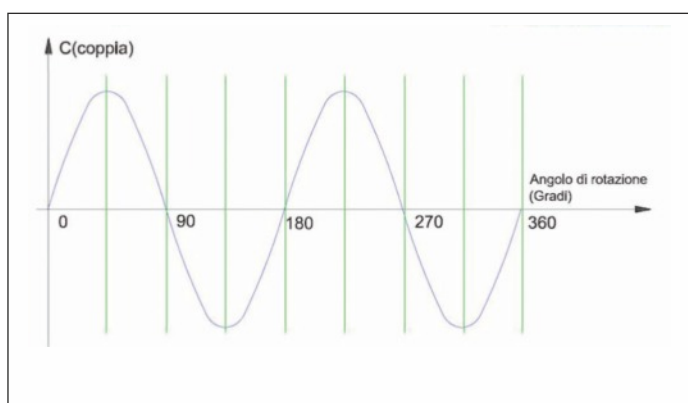


Figura 4: coppia statica del motore passo-passo a riluttanza variabile della precedente figura 3.

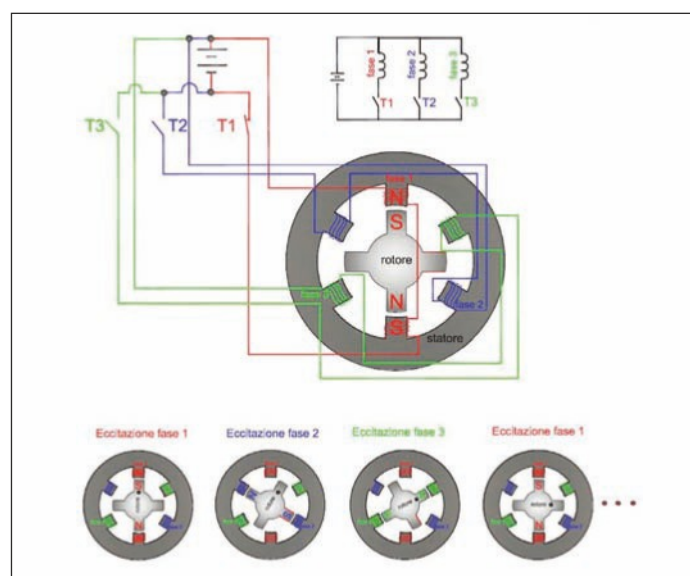


Figura 5: motore passo-passo a riluttanza variabile a tre fasi (6 poli statorici e quattro poli rotorici).

è possibile trasformare l'energia elettrica è infatti di fondamentale importanza per mettere in moto qualunque macchina operatrice e qualunque azionamento elettromeccanico. Tutti i motori elettrici presentano in comune tra loro il fatto di funzionare grazie ad effetti ed interazioni elettromagnetiche tra avvolgimenti o tra avvolgimenti e magneti e sono meccanicamente dotati di uno statore, solidalmente legato alla carcassa della macchina stessa, ed un rotore che rappresenta quella parte della macchina che ruotando trascina con se un asse di rotazione su cui è possibile rendere disponibile, di conseguenza, una coppia motrice necessaria ad azionare meccanismi e/o macchine operatrici. A parte questi aspetti va detto che esistono tipi di motori elettrici molto diversi tra loro adatti a funzionare in regime di corrente continua o al-

ternata, monofasi o trifasi, sincroni o asincroni e diversi tipi di motori spesso classificati come motori speciali tra cui anche piccoli motori spesso detti micromotori. Ciascuno di questi tipi di motori trova applicazioni differenti a causa delle differenti caratteristiche di potenza, affidabilità, facilità di controllo in catena aperta o chiusa, caratteristiche costruttive, caratteristiche elettriche, robustezza e prestazioni meccaniche. Alcuni tipi di motori elettrici, inoltre, sono fondamentali nel campo degli azionamenti elettrici in quanto più facilmente controllabili di altri. Quando si parla di azionamenti elettrici molti pensano ai motori in corrente continua dimenticando le numerose applicazioni che sono invece proprie di un altro tipo di motore elettrico: il motore passo-passo appunto, anche detto motore stepper o stepping motor. Come per la

maggior parte dei motori elettrici anche i motori passo-passo sono in realtà di concezione abbastanza vecchia, tuttavia sono stati impiegati diffusamente nelle applicazioni pratiche solo dopo che la tecnologia dei dispositivi elettronici a semiconduttore ha permesso lo sviluppo di circuiti di controllo sufficientemente efficienti e veloci (dispositivi elettronici di potenza).

I motori passo-passo (figura 1) sono infatti motori con rotore a magneti e quindi senza avvolgimenti rotorici il cui controllo può essere ricondotto, almeno in linea di principio, all'impiego di un certo numero di interruttori elettronici che realizzando la commutazione elettronica intervengono sull'alimentazione degli avvolgimenti, che sono dislocati sullo statore, con una determinata sequenza. Per questo motivo essi rientrano nella categoria

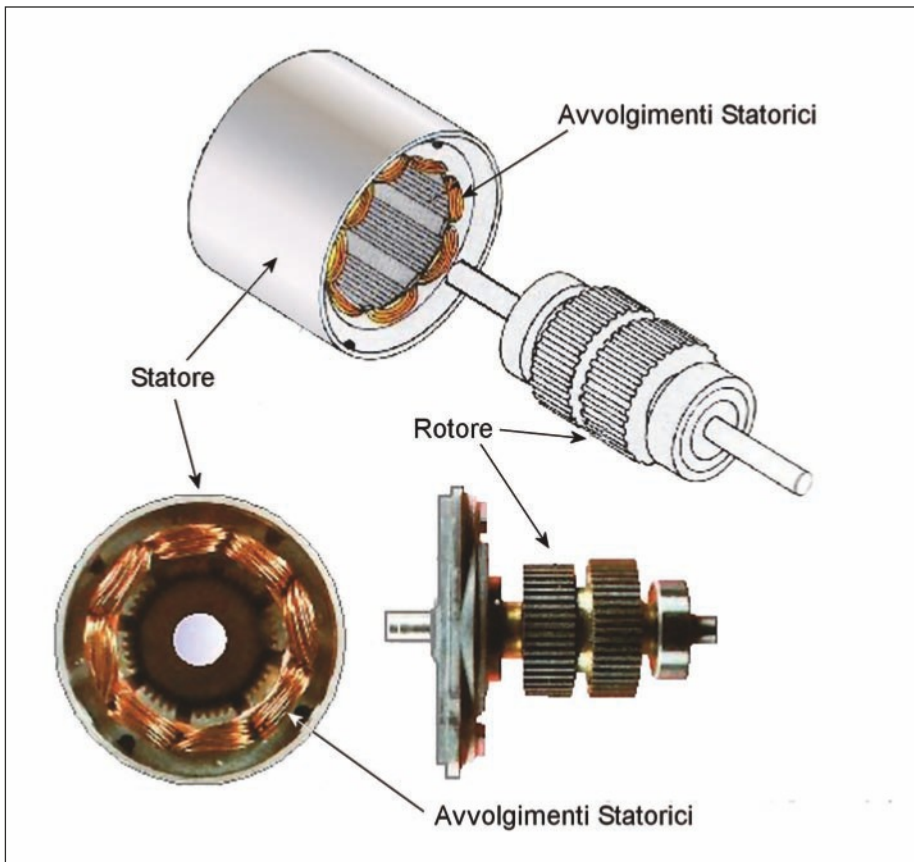


Figura 6: struttura meccanica di un motore passo-passo a riluttanza variabile con passo angolare pari a 30°.

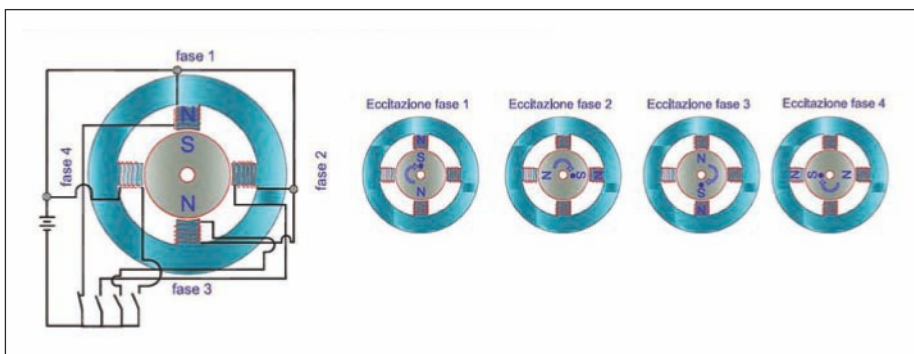


Figura 7: schematizzazione di un motore passo-passo a magnete permanente con quattro fasi (4 poli statorici, 2 poli rotorici e passo 90°).

dei motori anche detti a commutazione elettronica (di cui fanno parte anche i motori in corrente continua senza spazzole cioè i cosiddetti brushless DC motor). La realizzazione dei motori passo-passo è divenuta pertanto conveniente a partire dagli anni '60 e '70 dopo l'enorme progresso compiuto dai componenti elettronici allo stato solido (che ha permesso la realizzazione di efficienti circuiti di pilotaggio e controllo) e dai processi di costruzione dei magneti permanenti. Il mo-

motore passo-passo viene alimentato in corrente continua e permette di risolvere efficacemente un problema ricorrente negli azionamenti elettrici: quello del controllo del posizionamento angolare. Infatti, pensare di poter effettuare uno spostamento angolare preciso con un normale motore in corrente continua è quasi impossibile. Con i motori passo-passo invece è possibile ottenere elevate precisioni nella risposta al segnale di ingresso anche con configurazioni circuitali in catena aper-



Figura 8: struttura magnetica di un rotore liscio per motore passo-passo a magneti permanenti (numero di coppie polari $N_d=12$ passo angolare = 7,5°).

ta, cioè, senza anello di retroazione che riporti in ingresso l'errore o scostamento rispetto al valore di uscita che si desidera ottenere.

Il fatto che la commutazione elettronica, cioè statica, abbia efficientemente sostituito in quegli anni la commutazione elettromeccanica ha significato per la macchina un significativo miglioramento in termini di facilità di impiego e versatilità. Gli aspetti principali che distinguono il motore passo-passo dagli altri tipi di motore sono legati alla sua caratteristica di moto incrementale invece che continuo. Si tratta in altre parole di un movimento che avviene a scatti discreti in cui ogni scatto corrisponde ad un impulso dell'apparecchiatura elettronica di controllo, la quale elabora i segnali necessari per il pilotaggio dell'alimentazione del motore che solitamente è una tensione continua. Questo significa che un motore passo-passo necessita sempre, a differenza degli altri motori, di un sistema di controllo elettronico per poter seguire in modo opportuno gli spostamenti angolari programmati. Ad ogni impulso il rotore del motore passo-passo ruota in una direzione ben precisa e di un angolo ben preciso comunemente detto *angolo di passo* o più semplicemente *passo* o *step* (da cui l'appellativo di motore passo-passo o stepper). L'angolo di passo dipende essenzialmente dalle caratteristiche costruttive del motore per cui un motore passo-passo può avere un passo più o meno fine a seconda del modello, solitamente compreso tra 1,8° e 90° ed in alcuni casi anche inferiore. Solitamente il controllo di questo tipo di motore avviene in catena aperta. Prima di comprenderne le caratteristiche costruttive, da cui dipendono tutte le caratteristiche di con-

PER APPROFONDIRE

- **Macchine elettriche II Ed.-Cap. 17 (Motori a commutazione elettronica)**
M. Pezzi-Zanichelli Editore
- **Datasheet di motori passo passo dai siti web di diversi costruttori**
(Crouzet, Hurst manufacturing, Johnson Electric, McLennan Servo Supplies, Philips)
e fornitori (RS Components);

trollo, è opportuno fissarne una schematizzazione a blocchi che riassume il più possibile gli aspetti funzionali fin qui discussi. A tale proposito si osservi quanto riportato in **figura 2**.

Il circuito di controllo determina la fase o la coppia di fasi dello statore da pilotare, cioè da eccitare. Il motore passo-passo, infatti, come già accennato, non presenta avvolgimenti rotorici ma solo avvolgimenti statorici. L'eccitazione delle fasi del motore corrisponde alla chiusura dell'alimentazione sulla o sulle fasi per il tempo di durata compreso tra due impulsi di comando. Ad ogni impulso di comando il rotore ruota di un passo nel verso stabilito. Lo schema di **figura 2** esemplifica più precisamente il funzionamento di un motore passo-passo a tre fasi pilotato in catena aperta. Nel diagramma delle fasi, in alto, è indicata la sequenza delle fasi che determina una eccitazione diretta mentre nella parte in basso

dello stesso diagramma si osserva la sequenza di eccitazione inversa. Quest'ultima è ottenuta invertendo l'ordine di pilotaggio di due delle tre fasi del motore e pertanto non è univoca. Quanto appena esposto spiega, in ogni caso, anche il perché il motore passo-passo sia spesso visto come un attuatore elettromeccanico incrementale di precisione che converte gli impulsi elettrici in rotazioni.

Anche senza avere ancora alcun dettaglio sugli aspetti costruttivi del motore è faci-

le intuire che la coppia motrice sviluppata sia massima all'inizio del passo e minima alla fine del passo cioè a passo compiuto. Diciamo minima e non nulla in quanto l'angolo finale dopo un passo dipende anche dalla coppia resistente applicata all'asse del motore, cosa che non consente al passo angolare di compiersi completamente (il punto di arresto dopo un generico impulso di comando è determinato dal punto di equilibrio tra coppia motrice e coppia resistente o antagonista e solo se quest'ultima è nulla il rotore compie completamente il passo posizionandosi nel punto di equilibrio teorico).

La seguente relazione esprime in modo ideale il valore della coppia motrice, relazione che evidenzia un aspetto importante dei motori passo-passo: la coppia motrice può essere tanto positiva quanto negativa. L'angolo argomento della funzione seno altro non è che lo scostamento angolare rispetto alla posizione di equilibrio a vuoto quando non vi sono coppie antagoniste in gioco.

$$C = C_M \sin \alpha$$

Coppia positiva significa che il motore sta sviluppando una coppia motrice che tende a vincere l'opposizione di una coppia resistente mentre coppia negativa significa che il motore tende a sviluppare una coppia frenante rispetto a quella applicata dall'esterno sul suo asse.

La presenza di una coppia resistente evidentemente determina il seguente punto di equilibrio:

$$C = C_M \sin \alpha_{eq}$$

Dove C_r è la coppia resistente e pertanto l'angolo argomento della funzione seno è

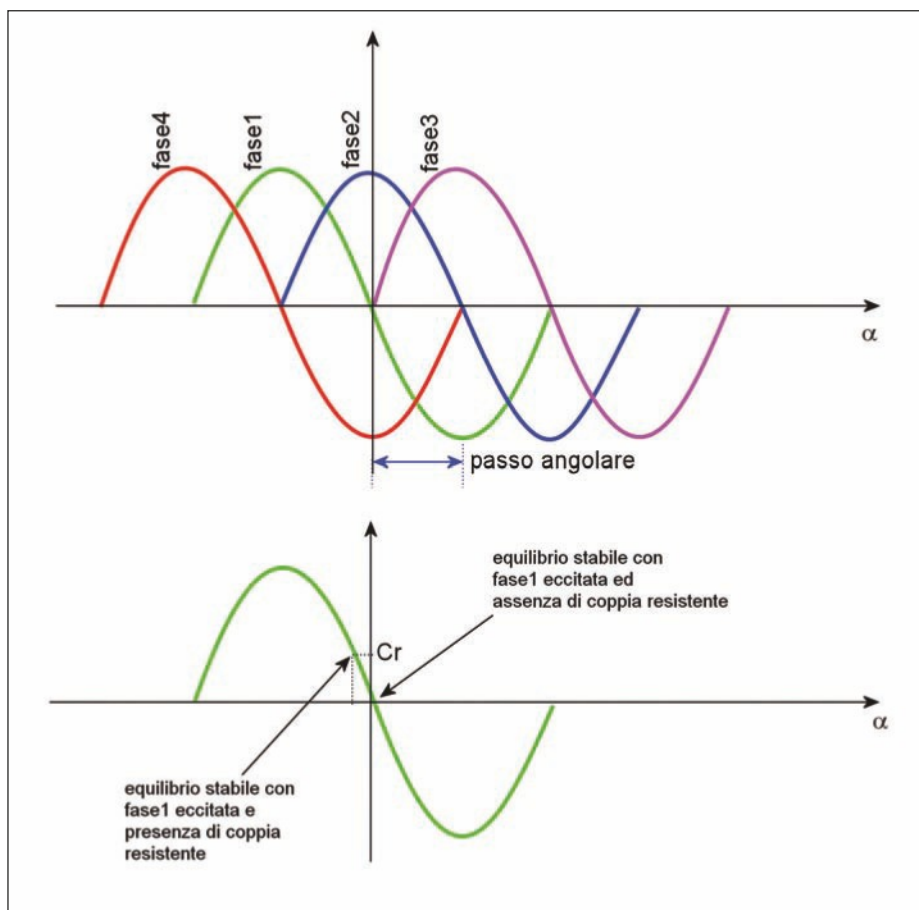


Figura 9: andamento ideale della coppia statica per eccitazione delle diverse fasi statoriche (motore passo-passo con quattro fasi, $m=4$) e punto di equilibrio stabile in assenza di coppia resistente ed in presenza di coppia resistente.

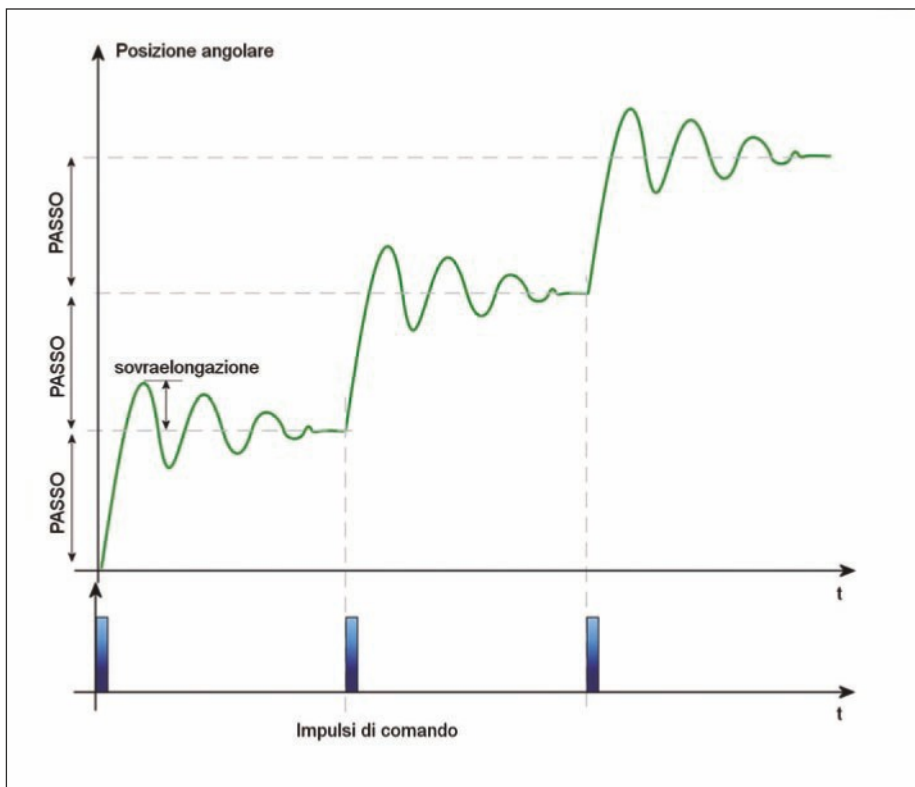


Figura 10: risposta nel tempo della posizione angolare del rotore in presenza di una successione di impulsi.

l'angolo di equilibrio che si discosta da quello nullo che coincide con la posizione di equilibrio a vuoto. Evidentemente tale scostamento è tanto minore quanto maggiore è la coppia massima C_M (coppia massima) che si manifesta all'inizio dello spostamento angolare di passo. Nel proseguo dell'esposizione gli schemi e gli esempi che mostreremo consentiranno di comprendere con maggiore efficacia quanto detto.

TIPI DI MOTORI PASSO-PASSO

I motori passo-passo possono essere classificati in tre tipologie: motori passo-passo a riluttanza variabile, anche detti VR Motors, i motori passo-passo a magnete permanente (PM Motors) e quelli a passo ibridi (HY motors). Il principio di funzionamento, come avremo modo di comprendere nei successivi paragrafi, non è molto dissimile da uno all'altro, tuttavia vi sono delle differenze di natura costruttiva che implicano una serie di conseguenze di tipo funzionale e prestazionale. E' quindi più che mai opportuno illustrare, per ciascuno di essi, almeno nelle linee generali, le specifiche caratte-

ristiche costruttive, in modo da comprendere adeguatamente le conseguenze applicative che ne scaturiscono.

IL MOTORE PASSO-PASSO A RILUTTANZA VARIABILE (VR Motor)

La coppia sviluppata dal motore è detta di riluttanza in quanto si manifesta all'estremità dei poli rotorici fino a quando la posizione assunta dal rotore non è tale da rendere minima la riluttanza del circuito magnetico rappresentato dal rotore e dallo statore. Lo schema di figura 3 evidenzia questo aspetto. Se l'angolo α è diverso da zero sul rotore agisce una coppia motrice C_m che tende, se la coppia resistente lo consente, ad annullare l'angolo α e quindi evidentemente a minimizzare la riluttanza del circuito magnetico da cui il nome di "motore a riluttanza variabile". Fisicamente questo significa anche massimizzare l'energia magnetica immagazzinata nel circuito magnetico visto che tale condizione corrisponde a quella in cui il campo magnetico massimizza il suo flusso.

Lo schema riportato può essere generalizzato, ovviamente, al caso di motori a

più fasi. Il fenomeno è quindi il principio di funzionamento può anche essere descritto in maniera più semplice ed intuitiva dicendo che i poli statorici N-S generano, a causa dell'induzione elettromagnetica, poli rotorici di segno opposto e quindi delle forze di attrazione le cui componenti tangenziali determinano la coppia motrice. Poiché le polarità rotoriche sono sostanzialmente indotte dallo statore (il rotore non presenta magnetizzazione permanente) è facile comprendere che l'andamento della coppia motrice in funzione della posizione angolare non può che presentare l'andamento di **figura 4**.

In **figura 5** è riportata una schematizzazione di un motore passo-passo a riluttanza un po' più elaborato di quello precedentemente mostrato e che aiuta a comprendere quanto precedentemente detto. Ciascuno degli avvolgimenti rotorici rappresenta una fase per cui si hanno 3 fasi statoriche cui corrispondono sei poli statorici mentre i poli rotorici sono in numero di quattro. Occorre riflettere, osservando la figura, sul fatto che il passo dei poli statorici sia diverso dal passo dei poli rotorici è ciò che consente al motore di avviarsi e funzionare.

In **figura 5** è anche mostrata una successione di passi di funzionamento del motore. La prima configurazione riguarda quella corrispondente all'eccitazione della prima fase statorica; partendo da questa situazione, se si eccita la seconda fase statorica è facile comprendere che le forze magnetiche che nascono per induzione sul rotore sono tali da far ruotare quest'ultimo in senso orario di 30° . Questa condizione corrisponde alla nuova condizione di minima riluttanza.

Analogamente, se adesso si eccita la terza fase il rotore ruoterà ancora dello stesso angolo in senso orario e così la successione ricomincia. In realtà il motore potrebbe essere pilotato anche attraverso l'eccitazione simultanea di due fasi alla volta. Infatti il secondo stato (eccitazione fase 2) potrebbe anche essere raggiunto partendo dal primo anche pilotando fase 1 e 3 simultaneamente in maniera tale che entrambi i poli in alto a destra siano Nord e quelli simmetrici entrambi Sud. Il funzionamento del motore può essere riassunto in maniera molto

semplice dicendo che esso passa ad ogni step in una nuova posizione di equilibrio determinata dalla particolare configurazione di eccitazione delle fasi. In altre parole il rotore in ogni istante tende ad allinearsi con il campo magnetico generato dal corrispondente avvolgimento statorico (o con quello di due avvolgimenti nel caso in cui impieghiamo una eccitazione di due avvolgimenti per volta). Ovviamente, come in tutti i motori elettrici il traferro tra rotore e statore è molto piccolo (decimi di millimetro) ed il materiale di cui lo statore ed il rotore sono fatti è ad alta permeabilità magnetica (tipicamente ferro-silicio).

Indicando con m il numero delle fasi statoriche (generalmente pari a tre o quattro nella maggior parte dei motori passo-passo di questo tipo), che nell'esempio risulta pari a tre, e con N_d il numero di denti rotorici, che nell'esempio risulta pari a 4 e con α l'angolo di passo, l'angolo coperto con una sequenza completa di passi, pari al numero delle fasi, è pari a quello che intercorre tra due fasi rotoriche quindi $360^\circ/N_d$. Quest'angolo è anche uguale al passo angolare per il numero di passi fatti cioè $(m \cdot \alpha)$ quindi:

$$m\alpha = 360/N_d \implies \alpha = 360/(mN_d)$$

L'esempio mostrato in **figura 5** presenta un ridotto numero di denti rotorici; in realtà ciò che è contenuto generalmente è il numero di fasi statoriche mentre i denti rotorici sono più numerosi. Se per esempio si hanno quattro fasi e 50 denti rotorici la precedente relazione porta ad ottenere un passo angolare pari ad $1,8^\circ$. Infatti, il fatto che si abbia un elevato numero di denti rotorici comporta la necessità di avere un numero elevato di denti statorici ma non di fasi.

Costruttivamente un motore di questo tipo può anche essere realizzato con una struttura differente in cui esso sia suddiviso in più stack cioè in più coppie rotore-statore calettati sullo stesso asse. Ogni parte dello stack corrisponde ad una fase. I tre statori sono perfettamente allineati tra loro a differenza dei rotor i quali sono sfasati angularmente di una quantità pari ad $1/m$ volte l'angolo di passo. Se in un settore i denti rotorici sono allineati, sicuramente vi è un altro settore in cui non

lo sono per cui eccitando quest'ultimo si genera la rotazione di un passo del rotore. Il motore a riluttanza variabile è abbastanza robusto (**figura 6**) e non difficile da realizzare, tuttavia presenta rumorosità e coppia notevolmente pulsante per cui non è in realtà molto usato nella pratica tecnica. E' facile comprendere come in un motore di questo tipo sia importante la sequenza di pilotaggio degli avvolgimenti statorici ma non la polarità ed il senso di circolazione della corrente in quanto il magnete di rotore non è permanente ma indotto dal campo magnetico statorico, tanto che ciò che determina la rotazione è la sostanziale anisotropia del traferro visto lungo lo sviluppo angolare (si osservino attentamente le precedenti figure).

Come si osserva in **figura 6** il rotore presenta l'attesa forma cilindrica, è costituito sostanzialmente di ferro dolce e presenta un certo numero di denti che si sviluppano longitudinalmente lungo la superficie laterale. Con tre avvolgimenti ed un rotore a quattro denti, come esemplificato in **figura 4**, è possibile eseguire passi ciascuno di 30° . Appare evidente ed immediato che se si desidera diminuire l'angolo di passo è sufficiente raddoppiare il numero di denti rotorici senza alcuna necessità di aumentare il numero de-

gli avvolgimenti statorici. Con 8 denti rotorici e gli stessi tre avvolgimenti statorici sarà pertanto possibile ottenere un motore passo-passo a riluttanza variabile con passo angolare pari a 15° ($360/(mN_d = 360/(3 \cdot 8) = 15)$).

In generale più ridotto deve essere l'angolo di passo e maggiore deve essere il numero di denti rotorici. Facciamo osservare che la sequenza dei passi può raggiungere facilmente in questi motori valori anche di 1000-1500 passi al secondo. In ogni caso essi sono caratterizzati da uno statore dentato che supporta gli avvolgimenti ed un rotore dentato che non presenta caratteristiche di magnete permanente. E' importante sottolineare comunque che in questo tipo di motore il numero dei denti rotorici è differente dal numero di fasi statoriche e questo fa sì che quando un dente e una fase sono allineati, i due adiacenti non lo siano. Questi motori, realizzati in ferro-silicio laminato, permettono di ottenere coppie elevate, azionamenti ad elevata velocità ed un elevato numero di passi.

MOTORI PASSO-PASSO A MAGNETI PERMANENTI (PM Motors)

Si tratta di motori passo-passo il cui rotore è dotato di magneti permanenti generalmente privi di anisotropie di natura geometrica. Infatti, il rotore appare perfettamente cilindrico e con magnetizzazione radiale. In **figura 7** è riportata una schematizzazione di questo tipo di motore passo-passo. La figura fa riferimento ad un motore con quattro fasi statoriche ed altrettanti poli statorici ed un rotore bipolare a magnete permanente. Eccitando la fase relativa ad un determinato polo statorico questo assume una polarità magnetica ben precisa attirando il polo ro-

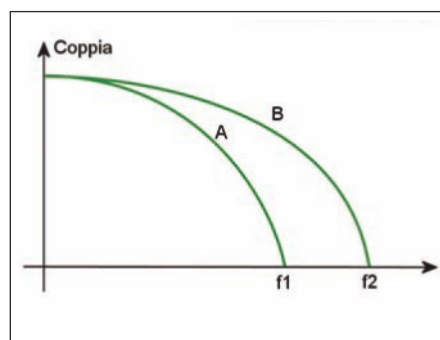
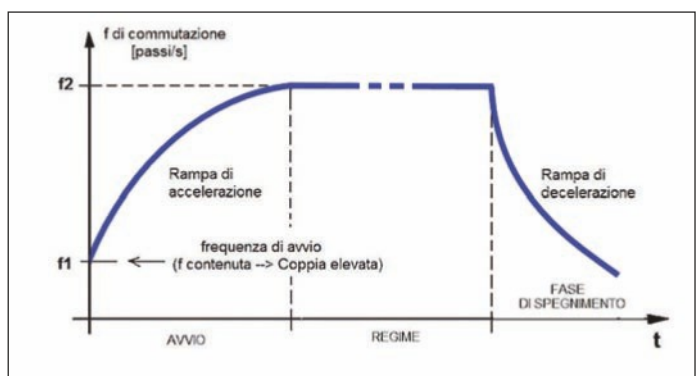


Figura 11: caratteristica dinamica ideale di un motore passo-passo (A-Coppia sincronizzante; B-Coppia sincrona).

Figura 12: accelerazione all'avvio e decelerazione all'arresto di un motore passo-passo mediante il controllo della frequenza degli impulsi di comando.



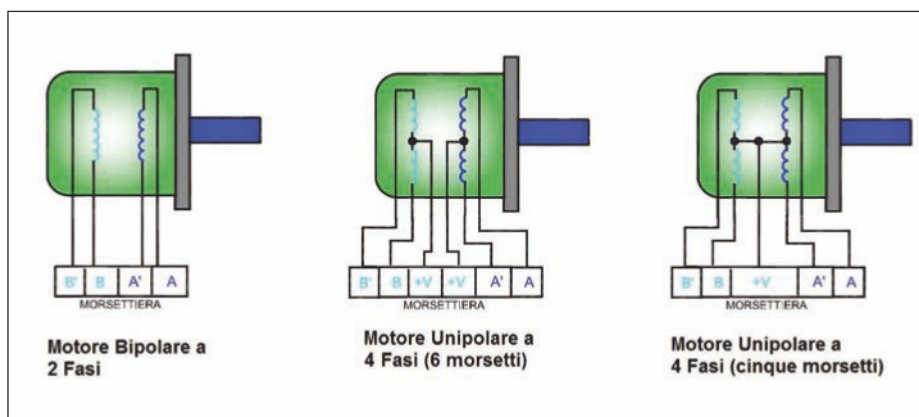


Figura 13: dai motori passo-passo bipolari fuoriescono solamente 4 fili, da quelli unipolari fuoriescono invece 6 fili se ciascuna coppia di avvolgimenti presenta un punto in comune detto "presa centrale" oppure 5 fili se le due prese centrali vengono fatte coincidere in una sola.

torico permanente di segno opposto e respingendo quello dello stesso segno. Questo effetto è all'origine della coppia e del movimento angolare di passo. Nella stessa figura 7 è indicata una sequenza di passi del motore. E' facile verificare che la relazione

$$m\alpha = 360/N_p \implies \alpha = 360/(mN_p)$$

risulta ancora valida a patto di considerare in corrispondenza di una coppia di poli rotorici $N_d=1$. La schematizzazione di figura 7 è una esemplificazione didattica; in realtà il rotore presenta un certo numero di poli. In figura 8 è riportato il caso di 12 coppie polari ($N_d=12$) cui corrisponde per la relazione precedentemente esposta (e nel caso per esempio il motore sia a quattro fasi) un angolo di passo pari a $7,5^\circ$.

In ogni caso, anche se adesso il magnete non è indotto, come nel motore a riluttanza, bensì permanente il concetto fondamentale che è alla base della generazione della coppia motrice è quello che il magnete di rotore tende ad ogni passo ad allinearsi con il campo magnetico generato dagli avvolgimenti statorici. Il motore passo-passo a magneti permanenti presenta alcuni vantaggi importanti rispetto a quello a riluttanza. Il vantaggio principale è costituito dal fatto che una volta raggiunta una posizione angolare di equilibrio, corrispondente all'eccitazione di una certa fase, anche annullando l'eccitazione stessa rimane sempre presente una interazione magnetica dovuta ai magneti permanenti per cui il rotore rimane saldamente bloccato (coppia

di bloccaggio). Questo vantaggio non si ha nei motori a riluttanza dove non vi sono effetti magnetici permanenti. A questo vantaggio si aggiunge quello di essere facilmente realizzabile e quindi molto economico. E' facile comprendere come, diversamente da quanto accade in un motore a riluttanza variabile, in quello a magnete permanente oltre alla sequenza di pilotaggio degli avvolgimenti statorici è importante la polarità ed il senso di circolazione della corrente in quanto il magnete di rotore è permanente e non indotto dal campo magnetico statorico per cui presenta una polarità propria preconstituita. In ogni caso essi sono caratterizzati da uno statore dentato che supporta gli avvolgimenti ed un rotore che presenta caratteristiche di magneti permanenti.

MOTORI PASSO-PASSO IBRIDI (HY motors)

I motori passo-passo ibridi sono così detti perché presentano sia caratteristiche proprie di quelli a riluttanza che caratteristiche proprie di quelli a magneti permanenti. Essi sfruttano, pertanto, sia l'effetto della riluttanza variabile che quello dei magneti permanenti. Costruttivamente risultano, ovviamente, più complessi e come accade per i motori a riluttanza variabile possono avere composizione multi-stack, composizione che ne consente un adeguato aumento di coppia. Evitiamo di analizzarne nel dettaglio la struttura, cosa che porterebbe via eccessivo spazio e che non aggiungerebbe molto di nuovo ai principi di fun-

zionamento fin qui visti. In ogni caso sottolineiamo come il motore passo-passo ibrido permetta di ottenere coppie e velocità più elevate rispetto agli altri due tipi di motori e di mantenere un'efficiente frenatura che porta ad un rapido arresto del motore stesso appena viene a cessare l'eccitazione o l'alimentazione. Quest'ultima è una caratteristica molto gradita in molte applicazioni, specie nel campo degli azionamenti elettrici.

IL COMPORTAMENTO STATICO DEI MOTORI PASSO-PASSO

Il funzionamento del motore passo-passo, a prescindere dalla particolare tipologia, si basa sul passaggio da uno stato di equilibrio, legato al fatto che il rotore è in una certa posizione, ad uno stato di squilibrio di coppia generato da un opportuno pilotaggio delle fasi e dal conseguente spostamento in una nuova posizione angolare. La rotazione del rotore continua seguendo questo principio mediante la solita eccitazione delle fasi statoriche. Se si considera eccitata una sola fase statorica del motore e si considera il funzionamento a vuoto, il rotore tende a portarsi nella posizione di equilibrio caratterizzata da coppia nulla. La posizione di equilibrio raggiunta dal rotore è una posizione di equilibrio stabile; infatti se si tenta di spostare angularmente di un piccolo angolo il rotore questo tende a tornare nuovamente nella posizione di equilibrio come l'andamento della coppia statica (figura 9 in basso) lascia intendere chiaramente. Ovviamente, questo è vero se si sta parlando di un motore passo-passo a magnete permanente o ibrido mentre per quello a riluttanza variabile la cosa è vera solo fino a che le fasi sono opportunamente alimentate. Ovviamente, quando si eccita una fase successiva del motore la coppia statica non è più quella di figura 9 in basso ma appare traslata rispetto ad essa nel verso della rotazione lungo la crescita degli angoli, il che significa che si è spostato nella direzione di rotazione il punto di equilibrio. Appare anche evidente che nel funzionamento a carico il motore vede in realtà sempre una certa coppia resistente, motivo per cui il punto di equilibrio sarà generalmente vicino a quello di equilibrio statico ma non esat-

tamente coincidente con esso (**figura 9**). Va osservato che l'andamento sinusoidale della coppia è in realtà una approssimazione, sebbene una buona approssimazione; infatti all'interno di un motore passo-passo, ibrido per esempio, abbiamo l'affetto non solo della coppia dovuta all'eccitazione ma anche quella dovuta alla riluttanza variabile. Appare chiaro in ogni caso che tanto in un motore passo-passo a riluttanza variabile quanto in uno a magneti permanenti o ibrido è possibile facilmente invertire il senso di rotazione pilotando opportunamente l'eccitazione degli avvolgimenti statorici. Sostituendo una sequenza costante di impulsi di eccitazione degli avvolgimenti

statorici del motore, inviati con frequenza f , questi determineranno una sequenza di step angolari di avanzamento del rotore che si susseguiranno con lo stessa frequenza. Appare chiaro allora come sia possibile controllare e regolare la velocità di rotazione: è sufficiente controllare opportunamente la frequenza degli impulsi di eccitazione. Questo è vero entro certi limiti esposti nel paragrafo che segue all'interno del quale si evidenziano alcuni aspetti tipicamente dinamici del motore passo-passo. Il campo magnetico generato dagli avvolgimenti statorici, complessivamente viene ad essere un campo magnetico rotante ma a differenza di quanto accade in altri motori elettrici la

tazione di questo campo avviene per salti discreti in numero pari al numero dei passi; si tratta cioè di un campo magnetico rotante in modo discontinuo. In base a quanto detto nei precedenti paragrafi è possibile anche riassumere il funzionamento del motore dicendo che il campo magnetico rotorico, che sia questo generato da un magnete indotto come accade nei motori a riluttanza variabile o che sia dovuto ad un magnete permanente come accade nel motore a magnete permanente o ibrido tende ad allinearsi come direzione a quello statorico per cui in qualche modo è come se lo inseguisse da cui la coppia motrice e la rotazione.

TABELLA 1

CARATTERISTICHE	VANTAGGI	SVANTAGGI
Assenza di spazzole	Scarsa usura nel tempo da cui elevata affidabilità e durata di vita	
Funzionamento ad anello aperto	Semplicità di impiego, riduzione dei costi non è necessario utilizzare sensori di posizione o di velocità	
Disponibilità di numerosi passi angolari	Elevata precisione di posizionamento e possibilità di ottimizzare le caratteristiche risoluzione-velocità e di coppia	
Pilotaggio digitale	Facilità di interfacciamento a sistemi di controllo a microcontrollore, a processore o basati su PLC e PC	
Struttura semplice	Costo contenuto da cui economicamente vantaggioso	
La velocità di rotazione può essere molto bassa se necessario	Minore necessità di impiegare riduttori meccanici nelle applicazioni	
Necessità di circuiti di pilotaggio digitali		Non possono essere impiegati senza tali circuiti. La potenza meccanica a parità di assorbimento in corrente, dipende spesso dal tipo di pilotaggio elettronico adottato, il quale diventa quindi un elemento determinante per le prestazioni.
Presentano un funzionamento a scatti	Ottimi per l'impiego in azionamenti incrementali anche di precisione	Producono vibrazioni, soprattutto ai bassi regimi se si adottano le tecniche di pilotaggio più semplici.
Caratteristica di coppia		La caratteristica di coppia decresce quasi esponenzialmente al crescere della velocità.

Alcune caratteristiche tipiche dei motori passo-passo e le implicazioni in termini di vantaggi e svantaggi in campo applicativo.

IL COMPORTAMENTO DINAMICO DEI MOTORI PASSO-PASSO

Va osservato che quando in un motore passo-passo si ha lo spostamento di un passo, il rotore alla fine della singola commutazione non si ferma esattamente nella posizione di equilibrio stabile immediatamente, ma piuttosto subisce una oscillazione intorno al punto di equilibrio stabile che può presentare una sovraelongazione più o meno accentuata (**figura 10**). La cosa si ripete, ovviamente, alla fine di ciascun passo. Se la frequenza delle commutazioni che determina la velocità con cui i passi si susseguono è abbastanza contenuta il motore ha tutto il tempo di adeguarsi all'eccitazione che si è avuta e di rispondere con uno spostamento angolare del rotore. In ogni caso il comportamento dinamico mette in evidenza la tendenza che il motore ha ad oscillare intorno alle singole posizione di equilibrio appena dopo che la commutazione è avvenuta.

La progettazione del motore si complica allora per il fatto che è necessario tenere conto delle sue caratteristiche di smorzamento. Questo aspetto, ovviamente, ha importanza anche sulla rapidità con cui i comandi di commutazione possono susseguirsi nel senso che si rischia di intervenire con il nuovo impulso di commutazione quando la sovraelongazione, avutasi in seguito alla precedente commutazione, ancora non si è smorzata. Questo è sufficiente a comprendere come, se ad una prima analisi sommaria potrebbe sembrare semplice ottenere anche successioni veloci di commutazione, che facciano apparire la rotazione del rotore regolare ed altrettanto veloce, nella realtà progettuale la questione è più complessa ed evidenza la necessità che il motore presenti uno smorzamento dinamico efficace in corrispondenza di ciascuna posizione di equilibrio stabile. Saremmo costretti ad entrare in dettagli eccessivamente specifici se volessimo approfondire questo aspetto, tuttavia è possibile affermare che per ottenere uno smorzamento più efficiente vengono impiegati sistemi sia meccanici che effetti magnetici e/o basati su correnti parassite oltre che sistemi di controllo elettronici che invertendo la corrente nella fase eccitata,

in un istante preciso, tendono a indurre uno smorzamento delle sovraelongazioni meccaniche più rapido e quindi un comportamento più efficiente e sicuro. La conseguenza è che è possibile aumentare la frequenza con cui gli impulsi di comando si susseguono e quindi la velocità di rotazione del motore.

Va tenuto presente che ad un motore passo-passo, a dispetto della sua relativa semplicità costruttiva e di funzionamento, almeno a livello di principio, è richiesto un comportamento dinamico piuttosto impegnativo in quanto caratterizzato da rapidissime accelerazioni e decelerazioni, ottenute in risposta alla commutazione delle fasi, per non parlare delle situazioni in cui la commutazione debba generare una rapida inversione di marcia per bloccare o frenare il carico meccanico, come accade in determinate applicazioni. Le condizioni dinamiche in cui il motore è impiegato devono essere tali da non generare situazioni in cui lo stesso, come si usa dire, perda il passo. In generale il problema è poco sentito per commutazioni a bassa frequenza mentre diventa di maggiore importanza a frequenza di commutazione elevata. In queste condizioni può verificarsi che il motore perda il passo durante la commutazione. In particolare può accadere che il motore perda il passo già alla partenza oppure allo stop.

Già nel funzionamento al vuoto è possibile definire un valore di frequenza di commutazione oltre il quale il motore perde il passo all'avvio oppure allo stop ed un valore di frequenza di commutazione alla quale il motore perde il passo durante la rotazione. Si sottolinea che l'ordine di grandezza di queste frequenze può raggiungere il valore delle migliaia di Hz. Per motivi che non approfondiamo in questa sede, inoltre, è importante sottolineare che anche la coppia sviluppata dal motore è in realtà dipendente dalla frequenza di commutazione e tipicamente diminuisce all'aumentare di quest'ultima. In **figura 11** sono riportate due caratteristiche di coppia in funzione della frequenza di commutazione.

La curva A rappresenta la coppia massima con cui il motore può essere caricato senza che esso perda alla fissata frequenza f di commutazione qualche pas-

so alla partenza. Tale coppia è detta coppia sincronizzante e come si può osservare dal grafico tende a diminuire all'aumentare della frequenza di commutazione. E' intuitivo aspettarsi che un motore alla presenza di una fissata coppia frenante perda più facilmente il passo all'avvio quando deve vincere anche la coppia di inerzia piuttosto che a regime. Infatti la curva B rappresenta la massima coppia che applicata al motore non gli fa perdere il passo quando esso sta già ruotando alla velocità corrispondente alla fissata frequenza di passo.

Tale curva è detta coppia sincrona. Ovviamente in entrambe le curve i punti a valore nullo di coppia sono quelli a vuoto, pertanto f_1 ed f_2 sono rispettivamente la massima frequenza alla quale il motore può avviarsi e arrestarsi senza perdere il passo e la frequenza alla quale il motore già in rotazione alla stessa frequenza di passo può continuare a funzionare senza perdere il passo a vuoto. L'inerzia meccanica del sistema e del carico e le variazioni nel tempo della coppia resistente sono inoltre tutti aspetti che influiscono sul comportamento del motore o più precisamente sul comportamento dinamico del sistema motore-carico meccanico. Una tecnica che può essere impiegata per portare il motore alla velocità di commutazione desiderata è quella di controllare gli impulsi di commutazione evitando di partire dalla frequenza di lavoro ma raggiungendo questa gradualmente. In altre parole, invece di far raggiungere al motore la velocità desiderata entro la durata del primo impulso lo si accelera gradualmente sotto l'azione di impulsi che si susseguono a velocità crescente e la cui durata va pertanto diminuendo. Questo consente, tra le altre cose, al motore di adeguarsi alla coppia resistente più facilmente sviluppando la coppia massima quando l'effetto di inerzia del carico è massimo.

La stessa tecnica può essere impiegata per arrestare il motore. Anche in questo caso il motore si adegua con più facilità alle condizioni dinamiche che deve affrontare. In **figura 12** è riportato un possibile andamento della frequenza di commutazione nel tempo che è possibile impiegare. La frequenza f_1 è quella del treno di impulsi all'avvio (che può essere

dell'ordine di poche centinaia di Hz, tale cioè da permettere un avvio sicuro caratterizzato da una maggiore coppia motrice necessaria a vincere la coppia di inerzia).

La frequenza f_2 è invece la frequenza di commutazione a regime quando si ha bisogno di minore coppia motrice per mantenere in rotazione il carico meccanico. Segue la diminuzione parabolica della frequenza degli impulsi di commutazione che precedono l'arresto del motore. Per concludere le considerazioni sul comportamento dinamico del motore passo-passo è opportuno definire con più precisione alcune sue grandezze caratteristiche di tipo meccanico e in particolare:

- *la coppia di sincronizzazione (pull-in torque)*: coppia massima che il motore riesce a vincere ad una certa frequenza di commutazione senza perdere il passo in qualunque condizione di funzionamento cioè sia all'avvio che durante il funzionamento che all'arresto;
- *coppia sincrona (pull-out torque)*: coppia massima che può essere applicata al motore durante il funzionamento in regime permanente ad una data frequenza di commutazione senza che esso perda il passo;
- *massima coppia di partenza (maximum starting torque)*: massima coppia con la quale il motore può partire sincronizzandosi con il treno di impulsi ad una frequenza contenuta tipicamente da poche decine di Hz al centinaio di Hz; corrisponde alla coppia intercettata in **figura 11** per $f=0$;
- *velocità di rotazione (stepping rate)*: velocità espressa in Hz indicante il numero di passi eseguiti in un secondo;
- *velocità sincronizzanti (start-stop)*: range di velocità di commutazione entro la quale, in determinate condizioni di carico, il motore è in grado di fermarsi, ripartire e mantenere la velocità senza perdere passi;
- *velocità sincrone (slew-rate)*: range di velocità di commutazione entro il quale, in determinate condizioni di carico, il motore è in grado di mantenere la velocità senza perdere il passo, sebbene non sia in grado di partire e fermarsi senza perdere il passo sotto l'azione degli stessi impulsi di frequenza costante;

- *massima frequenza di rotazione (maximum pull-out rate)*: massima frequenza di commutazione alla quale il motore può funzionare a vuoto senza perdere il passo;
- *massima velocità di sincronizzazione (maximum pull-in rate)*: massima frequenza di commutazione alla quale il motore a vuoto è in grado di non perdere il passo sia alla partenza che a regime, che all'arresto.

COPPIA E FREQUENZA

Un motore passo-passo, per come è costruito, ha un ben determinata curva coppia/frequenza. La coppia è in linea di massima inversamente proporzionale alla frequenza per cui più il motore gira veloce minore è la coppia che è possibile ottenere sull'albero di rotazione. Di questo aspetto è possibile rendersi conto in maniera molto semplice. Se si prende un motore passo-passo di piccolissima potenza con il relativo circuito di controllo e lo si pilota con una frequenza di fase prima piccola e poi via via crescente e si prova contemporaneamente a fermare la rotazione dell'albero con una mano si osserva che all'aumentare della velocità diventa sempre più facile bloccare l'albero motore il che conferma il fatto che la sua coppia motrice sta diminuendo. In realtà quello che accade anche se non blocchiamo del tutto l'albero del motore è che esso ad un certo punto perde il passo. Va osservato anche un altro aspetto: se facciamo ruotare l'albero lentamente, essendo la coppia sviluppata maggiore noteremo che esso esegue gli spostamenti angolari praticamente senza scostamento angolare dalle posizioni nominali di equilibrio. Aumentando la velocità diminuisce la coppia per cui l'errore nella posizione di equilibrio finale comincerà a non essere più nulla. Al limite, quando comincia a presentarsi il problema della perdita del passo arriveremo sicuramente ad un punto in cui l'albero non riesce a stare al passo ed inizia ad oscillare senza compiere più passi completi e ruotando solo di pochi gradi. Impiegando un motore di piccola potenza è possibile effettuare qualche altro piccolo esperimento che può aiutarci a evidenziare il comportamento coppia-frequenza. Per esempio, se a motore fermo pilotiamo il motore ad una certa frequenza e rifacciamo la stessa prova aumentando

ogni volta il valore di frequenza noteremo che ad un certo punto il motore perderà il passo in partenza cioè l'albero oscillerà subito intorno al proprio asse (anche se sta funzionando a vuoto cioè senza carico meccanico).

CAMPI DI APPLICAZIONE

Sebbene il motore passo-passo fosse stato progettato e realizzato già negli anni '30, solo negli ultimissimi decenni si è diffuso ampiamente in campo applicativo. Questo è accaduto grazie al fatto che solo negli ultimi decenni l'elettronica di potenza si è sviluppata sufficientemente fino a divenire una tecnologia matura a tal punto da permettere il controllo di questo tipo di motori in molte applicazioni, soprattutto nel campo degli azionamenti elettrici (azionamenti incrementali).

Durante l'esposizione abbiamo visto che esistono tre tipi di motori passo-passo, tuttavia occorre sottolineare che da un punto di vista applicativo quello più diffuso è quello con rotore a magnete permanente. Abbiamo visto come il suo impiego necessiti di opportuni circuiti di pilotaggio che distribuiscano correttamente l'alimentazione in corrente continua in forma sequenziale a tutti gli avvolgimenti dello statore, in maniera tale che in ogni istante ne sia eccitato (generalmente) uno solo. A voler essere più precisi quando si dice che il motore è alimentato in corrente continua si intende effettivamente che la sorgente di tensione è continua, tuttavia attraverso il sistema di controllo questa tensione viene trasformata in impulsi di tensione e di corrente poiché solo così facendo il motore può effettivamente funzionare. Poiché la tensione di alimentazione più diffusa, in campo non solo civile ma anche industriale, è quella alternata appare anche chiaro come l'impiego di questi motori necessiti di gruppi raddrizzatori che consentano di ottenere la corrente continua da quella alternata. Questo aspetto rafforza ancora una volta le motivazioni che hanno portato questo tipo di motori a diffondersi nelle applicazioni solo dopo la sufficiente maturazione dell'elettronica di potenza.

Per essere più precisi, il ruolo svolto da questi motori nell'ambito degli azionamenti elettrici è il più delle volte quello da

attuatore incrementale, generalmente di piccola potenza ed il fatto di essere, come si è visto nel precedente paragrafo, facilmente controllabile elettronicamente lo rende particolarmente versatile e quindi apprezzato in questo ambito. Spesso in queste applicazioni si chiede, in certi frangenti, al motore di mantenere il rotore in maniera naturale stabilmente nella posizione di equilibrio in modo da bloccare il carico meccanico. Il motore passo-passo è l'unico in grado di assicurare questa possibilità. Il pregio maggiore di questi motori risiede infatti nella capacità di ruotare l'asse e fermarlo, eventualmente, bloccandolo in posizioni prefissate con estrema precisione. Questa condizione è praticamente impossibile da attuare con qualunque altro motore elettrico. Infatti, con gli altri motori elettrici togliere alimentazione al motore quando il suo asse è in una determinata posizione non con-

sente di fermare lo stesso in quella posizione a causa dell'inerzia che continua a far ruotare ancora lo stesso asse. La possibilità di bloccare l'asse di rotazione in una determinata posizione è tuttavia una caratteristica propria dei soli motori passo-passo a magnete permanente ed ibridi ma non di quelli a riluttanza variabile. Questo è un ulteriore motivo che spiega la maggiore diffusione dei primi due tipi rispetto al terzo nell'ambito degli azionamenti elettrici. La possibilità di pilotare movimenti angolari estremamente rapidi ed arresti altrettanto rapidi è un'altra importante caratteristica che rende questi motori fondamentali ed unici nel loro genere. In ogni caso ci sono delle applicazioni in cui può essere conveniente impiegare motori a riluttanza variabile, tipicamente quando si vuole realizzare un motore economico che sia tuttavia caratterizzato dal fornire spostamenti an-

golari molto ridotti senza la necessità di aumentare il numero degli avvolgimenti statorici. Normalmente i motori passo-passo consentono un posizionamento angolare molto affidabile e questo spiega l'impiego prevalentemente in catena aperta. Nonostante ciò è anche possibile un controllo a catena chiusa cioè in retroazione. L'impiego più comune del motore passo-passo è quello come attuatore incrementale in quelle applicazioni in cui non si richiedono grosse potenze ed il carico è caratterizzato, possibilmente, da una coppia resistente non molto variabile, non molto grande e con un momento di inerzia abbastanza contenuto; tanto per intenderci non è un motore da impiegare per il trascinamento di grosse macchine operatrici. Essi permettono di realizzare degli efficienti sistemi di posizionamento sicuri ed affidabili evitando in molti casi l'impiego di complessi servo-



SCOPRI TUTTI GLI **ebook**



SU WWW.IE-CLOUD.IT/EBOOK



€ 5,49

Teoria e pratica dei cross-over





€ 6,49

Lavorare con Raspberry Pi





€ 3,99

Diventa Maker



meccanismi. Inoltre il loro impiego, come già accennato, consente di evitare complicazioni realizzative di sistemi in cui si necessita di funzioni di bloccaggio. Il motore in se presenta elevata robustezza ed affidabilità, tuttavia tali caratteristiche sono influenzate in maniera consistente dall'elettronica di controllo. Attraverso l'elettronica è possibile controllare i movimenti di passo che possono raggiungere la velocità di migliaia di passi al secondo. Le potenze possono andare da poche decine di watt e pochi kilowatt. Infatti vi sono molti tipi di motori passo-passo che come si è visto si differenziano per tipologia sia costruttiva che di funzionamento, ma anche per dimensioni e potenza. Generalmente si impiegano motori passo-passo ibridi e quando si vuol favorire l'aspetto economico motori passo-passo a magnete permanente che a causa della loro maggiore semplicità costruttiva risultano meno costosi mentre sono meno diffusi quelli a riluttanza variabile. Questi motori sono anche impiegati in molte macchine automatiche o in alcune macchine utensili, nelle macchine robotizzate, nel comando di valvole ed in tutti gli azionamenti incrementali di precisione ma anche in applicazioni consumer a noi molto famigliari come nei plotter, stampanti e fotocopiatrici in cui controllano il movimento del carrello o in periferiche di computer come i disk-drive. Il loro impiego è inoltre una scelta ideale per tutte quelle applicazioni che richiedono precisione nello spostamento angolare e nella velocità di rotazione, quali la robotica, le montature dei telescopi ed i servomeccanismi e le macchine a controllo numerico in genere.

VANTAGGI E SVANTAGGI LEGATI ALL'IMPIEGO DEI MOTORI PASSO-PASSO

E' possibile riassumere sinteticamente alcuni aspetti caratteristici dei motori passo-passo ed i vantaggi e gli svantaggi che ne scaturiscono. A tale proposito si riporta la **tabella 1** alla cui analisi si rimanda. Tra gli aspetti vantaggiosi riassunti in **tabella 1** che caratterizzano un motore passo-passo quello principale è costituito dalla caratteristica della macchina di poter essere impiegato a efficientemente ad anello aperto, in quanto nelle normali condizioni d'impiego ad un nu-

mero N d'impulsi corrisponde esattamente un numero N di passi. La grande affidabilità di risposta e precisione nel posizionamento angolare rende infatti per questo tipo di motore spesso inutile l'impiego in retroazione.

COME RICONOSCERE UN MOTORE PASSO-PASSO UNIPOLARE DA UNO BIPOLARE

E' possibile riconoscere indirettamente un motore passo-passo bipolare da uno unipolare semplicemente osservandone i fili terminali o la sua morsettiera. Infatti, se consideriamo la struttura semplificata di un motore passo-passo così come mostrata nella seguente **figura 13** si comprende che se esso presenta due soli avvolgimenti indipendenti (raffigurazione a sinistra) ciascuno dei quali è costituito da due parti che si sviluppano una su un polo magnetico e l'altra sul polo magnetico opposto, per farlo funzionare è necessario pilotare questi avvolgimenti in modo bipolare. I morsetti che è necessario portare fuori dal motore sono allora quattro, due di un avvolgimento e due dell'altro avvolgimento. Evidentemente, se dal motore fuoriescono quattro morsetti si deduce che il motore è bipolare nel senso che il suo funzionamento necessita di alimentare ad un passo uno delle due fasi al passo successivo l'altra fase, a quello successivo ancora nuovamente la prima fase ma con polarità invertita e quindi nuovamente la seconda fase anch'essa con polarità invertita. A questo punto il ciclo riprende. In conclusione, gli avvolgimenti sono la metà rispetto alle configurazioni del campo magnetico statorico che è necessario ottenere in quanto essi possono essere pilotati con entrambe le polarità da cui il termine "bipolare". Se il motore è unipolare invece, gli avvolgimenti possono essere percorsi da corrente in una sola direzione e pertanto si possono avere le altre due situazioni schematizzate in **figura 13**. Nella prima di queste abbiamo quattro avvolgimenti ciascuno dei quali è alimentato con una sola e ben precisa polarità. Le configurazioni del campo magnetico statorico che si possono ottenere sono ancora quattro. Per ottenere ciò si sarebbe portati a pensare che si necessiti di 8 morsetti, due per ciascun avvolgimento, tuttavia per eccitare ciascuna dei quattro avvolgimenti in una

specifica direzione è possibile impiegare una presa centrale per ciascuna coppia di avvolgimenti riducendo il numero complessivo dei morsetti necessari a sei (seconda schematizzazione di **figura 13**). A questo punto appare tuttavia ovvio come rendendo tra loro comuni le due prese centrali sia possibile ridurre ulteriormente il numero di morsetti a cinque (terza schematizzazione di **figura 13**). Per questo motivo se da un motore passo-passo vediamo fuoriuscire sei morsetti dobbiamo pensare che si tratti di un motore unipolare con ciascuna coppia di avvolgimenti provvista di presa centrale mentre se vediamo fuoriuscire cinque morsetti dobbiamo pensare che si tratti di un motore ancora unipolare ma con tutte le bobine aventi in comune un'unica presa centrale. I motori bipolari sono mediamente più diffusi di quelli unipolari in quanto a parità di potenza presentano dimensioni leggermente più contenute, inoltre possono essere pilotati interfacciando quattro soli morsetti dato che la maggior complessità del pilotaggio è comunque spostato a carico dell'elettronica di controllo, il che non costituisce in ogni caso una grande complicazione. Da quanto detto consegue anche che, volendo comprendere quale elettronica di controllo sia necessaria per pilotare il motore, la prima cosa da osservare è quanti fili escono dal motore in modo da dedurre se si tratti di un motore unipolare o bipolare.

CONCLUSIONI

In questa prima puntata dedicata ai motori passo-passo si sono illustrate le principali caratteristiche di queste macchine elettriche e si sono evidenziate oltre al principio di funzionamento, i vantaggi e gli svantaggi tecnici connessi al loro impiego. Tutto questo ci consente di avere un quadro abbastanza chiaro di cosa siano i motori passo-passo, di come funzionino e come si collochino nello scenario applicativo che ne consegue ma soprattutto ci consentirà di trattare, nella seconda parte che troverete, gli aspetti che riguardano più da vicino il loro pilotaggio e controllo elettronico.

Pilotaggio E CONTROLLO

I motori passo-passo (parte seconda)

Dopo aver introdotto, i motori passo-passo, dando enfasi alle differenze che caratterizzano le diverse tipologie realizzative di questo motore elettrico e dopo averne esposto in dettaglio il principio di funzionamento, trattiamo in questa seconda parte gli aspetti tecnici e pratici più importanti che riguardano in maniera specifica il loro pilotaggio e controllo.

Nel precedente numero di *Fare Elettronica* abbiamo fornito le nozioni necessarie a comprendere cosa siano esattamente i motori passo-passo. In quella occasione sono state illustrate le principali caratteristiche di queste macchine elettriche e si sono evidenziati, oltre al principio di funzionamento, i campi applicativi, i vantaggi e agli svantaggi tecnici legati al loro impiego. Alla luce di tutto ciò, in questa seconda ed ultima puntata dedicata all'argomento, tratteremo gli aspetti che riguardano più precisamente il pilotaggio e il controllo elettronico di questi motori. Come già si è avuto modo di comprendere nella precedente puntata, infatti, i motori passo-passo non sono motori che è sufficiente alimentare perché possano funzionare, come accade nei comuni motori elettrici. La conoscenza del

circolerebbero staticamente nei suoi avvolgimenti. Ne consegue che un motore passo-passo, a differenza di altri motori elettrici, può funzionare correttamente solo se pilotato adeguatamente attraverso una opportuna elettronica di controllo che ne rispetti il principio di funzionamento. Per questo motivo conoscere le tecniche ed i circuiti di potenza, che sono alla base del pilotaggio e del controllo di questi motori, e gli integrati più noti in commercio, utili a realizzare la logica stessa del controllo, è importante tanto quanto conoscere la struttura meccanica ed elettrica della macchina ed il suo principio di funzionamento. Di questo e di altro ci occuperemo in dettaglio nei paragrafi che seguono.

CIRCUITI DI PILOTAGGIO E CONTROLLO DEI MOTORI PASSO-PASSO

I sistemi in cui sono impiegati i motori passo-passo sono generalmente caratterizzati dai seguenti elementi costitutivi:

- *unità di comando* (microprocessore, microcontrollore, PLC, PC, logica di controllo) che fornisce degli impulsi a frequenza proporzionale alla velocità di rotazione che si vuole ottenere, in un determinato e preciso senso di rotazione; essa costituisce, a tutti gli effetti la logica di controllo che determina l'andamento temporale della coppia motrice del motore e pertanto il comportamento dell'azionamento elettrico ottenuto tramite di esso;
- *un sequenziatore* che guida le diverse bobine del motore fornendo e distribuendo loro la potenza elettrica necessaria ad ottenere le singole rotazioni angolari di step;
- *un'alimentazione di potenza in corrente continua* da cui il sequenziatore preleva la potenza con cui alimenta gli avvolgimenti del motore. La **Figura 1** schematizza in maniera chiara questo concetto.

Prima di parlare espressamente dei circuiti

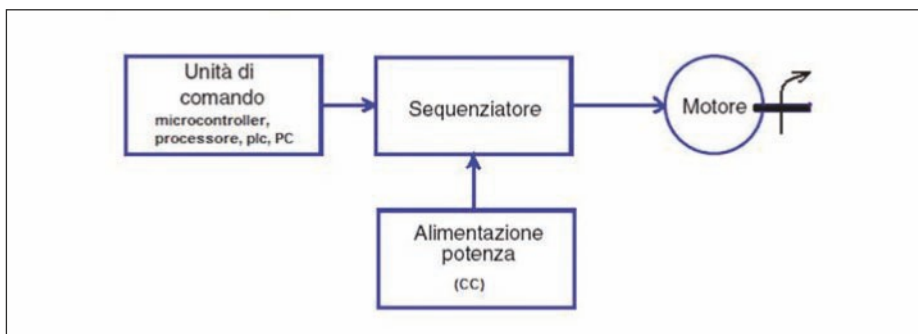


Figura 1: schematizzazione generale a blocchi di un sistema di controllo per motori passo-passo.

principio di funzionamento di queste macchine, ampiamente trattato nella precedente puntata, è più che sufficiente a comprenderne il motivo. Non è difficile intuire, infatti, che alimentare un motore passo-passo come si farebbe con un comune motore elettrico non solo non consente il corretto funzionamento (il rotore rimarrebbe praticamente fermo) ma addirittura rischierebbe di danneggiarlo seriamente a causa delle elevate correnti che

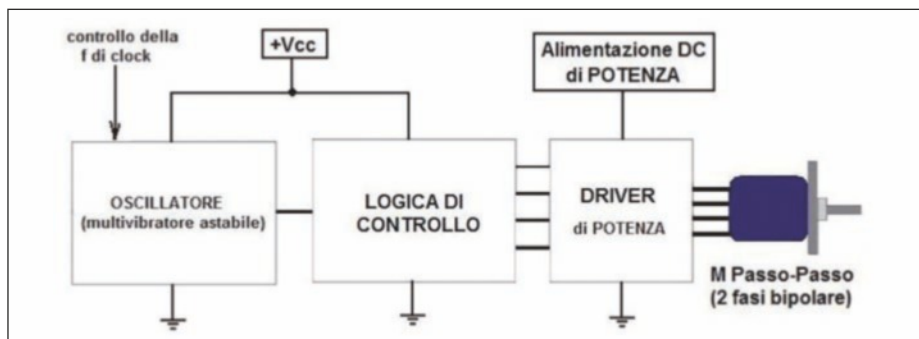


Figura 2: schema a blocchi di un generico sistema di controllo per motore passo-passi a 2 fasi bipolare.

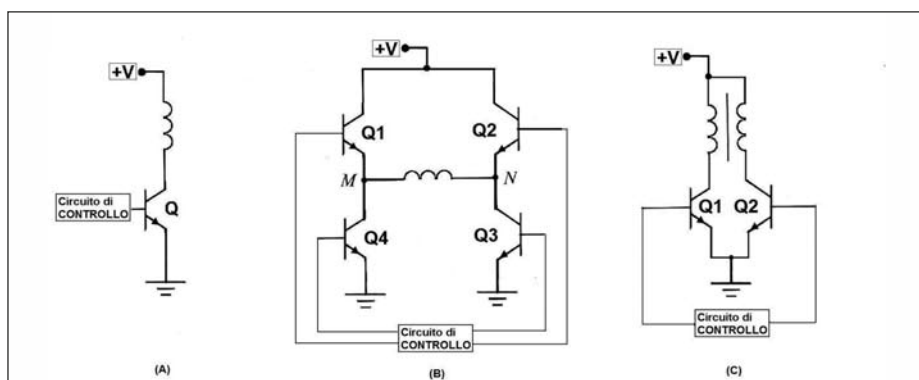


Figura 4: i circuiti base per l'eccitazione di un avvolgimento di fase di un motore passo-passo.

di pilotaggio, va precisato che i motori passo-passo a riluttanza variabile presentano, tipicamente, tre o quattro fasi mentre quelli a magneti permanenti e quelli ibridi presentano spesso due sole fasi con la possibilità di inversione di polarità delle coppie polari statoriche (motore bipolare). Le fasi, come abbiamo compreso nella prima puntata, sono alimentate singolarmente o a coppie in corrente continua secondo un preciso ordine. A tale scopo sono necessari dei veri e propri dispositivi di commutazione pilotabili e questo spiega il motivo per cui la diffusione di questi motori è stata possibile solo con la messa a punto dei dispositivi di commutazione a semiconduttore. Essi infatti erano tecnicamente realizzabili già prima dell'avvento dei dispositivi a semiconduttori ma difficilmente pilotabili e controllabili. Per fornire alle fasi del motore passo-passo la corretta sequenza di impulsi di comando sono necessari circuiti pilotati da un generatore di clock. Evidentemente, se quest'ultimo è a frequenza controllabile è anche possibile controllare la velocità del motore. Questa funzionalità può essere ot-

tenuta in diversi modi; per esempio è possibile realizzare un generatore di clock basato semplicemente su un oscillatore astabile a 555 ed una rete logica che comanda il driver di potenza. Questo tipo di pilotaggio rientra nella schematizzazione di **Figura 2** nella quale l'oscillatore determina la scansione dei passi da parte della logica di controllo e quest'ultima comanda i driver di potenza per l'alimentazione degli avvolgimenti.

Un'altra possibilità è quella di impiegare un microcontroller, il quale pilota direttamente il driver di potenza che fornisce l'alimentazione alle fasi del motore. In ogni caso la struttura del sistema di controllo così come mostrata in **figura 2** può essere considerata di carattere generale. In realtà molte soluzioni, anche più elaborate, sono direttamente disponibili in commercio sotto forma di schede elettroniche utilizzabili allo scopo. Ovviamente, nella scelta del circuito di pilotaggio è necessario tenere ben presente il tipo di motore passo-passo da controllare, poiché a seconda del tipo di motore (unipolare o bipolare) sarà necessario im-

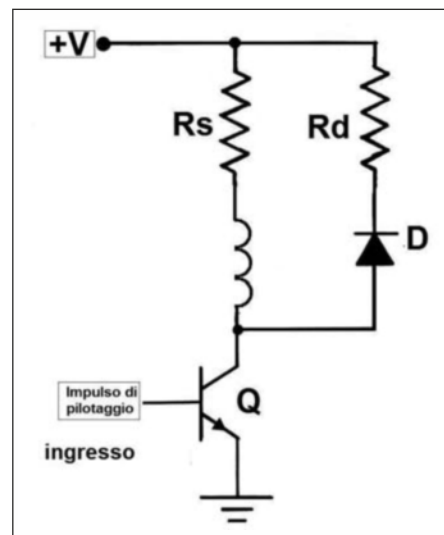


Figura 3: circuito di base per il pilotaggio di una fase statorica in un motore passo-passo.

piegare un driver adeguato. Questo aspetto è legato al fatto che mentre in un motore unipolare il driver assorbe corrente da ciascuna fase verso massa, in un motore bipolare, il driver deve sia assorbire che erogare corrente, cioè essere in grado di invertire il verso di quest'ultima.

Il principio di base che rende possibile la commutazione elettronica a semiconduttore si basa sull'impiego di elementi circuitali invertitori. Il circuito di base per il pilotaggio della singola fase è infatti piuttosto semplice e può essere schematizzato come in **Figura 3**. Il circuito a diodo serve a consentire una rapida estinzione della corrente quando l'alimentazione dell'avvolgimento viene interrotta (protezione del transistor dai picchi di tensione indotti sugli avvolgimenti del motore in occasione delle commutazioni). Per questo motivo, i diodi impiegati sono generalmente diodi veloci in grado di intervenire in maniera rapida ed efficiente.

Cosa analogo dicasi per la resistenza serie R_s la quale evita l'assorbimento di correnti eccessivamente elevate durante le fasi di commutazione in stato di ON dello stesso transistor.

Il circuito mostrato in **Figura 3** è solo un circuito di base per il pilotaggio di una singola fase unipolare. In realtà, come accennato precedentemente, il pilotaggio può avvenire in maniera tale che in una coppia di poli uno sia sempre nord e l'al-

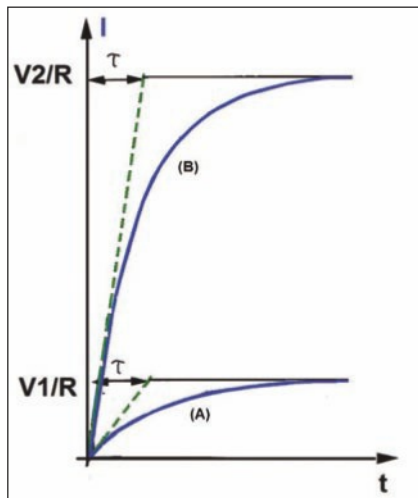


Figura 5: andamento della corrente statorica durante il transitorio per diversi valori di tensione di alimentazione.

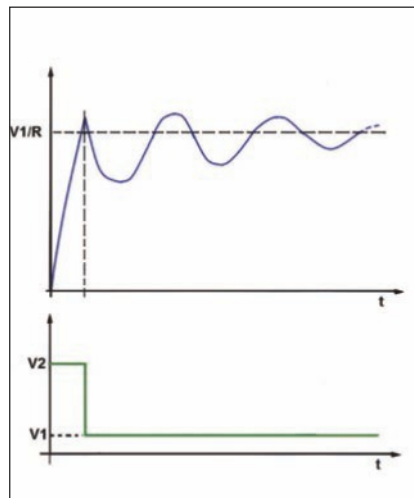


Figura 6: andamento della corrente statorica in un motore passo-passo pilotato con due tensioni di alimentazione.

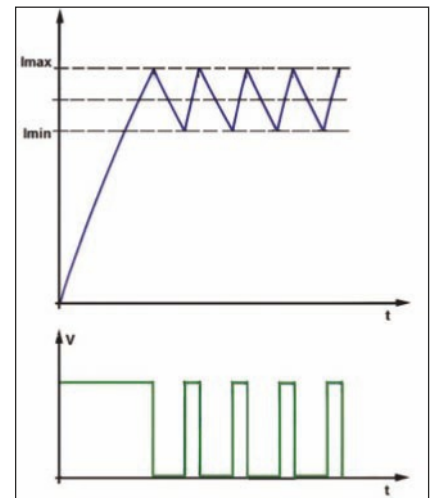


Figura 7: pilotaggio in modulazione di un motore passo-passo ed andamento della corrente statorica.

tro sempre sud quando la relativa fase è alimentato oppure può avvenire in maniera tale che sia possibile invertire la polarità dell'eccitazione in modo da poter scambiare anche la polarità di ciascuna coppia polare di statore. In questo secondo caso (motori bipolari) il circuito di pilotaggio della singola fase appare ovviamente più complesso. A seconda dei casi si parla, pertanto, di pilotaggio unipolare o di pilotaggio bipolare.

In **Figura 4-A**, per esempio, si ha un pilotaggio unipolare in quanto la corrente all'interno della fase statorica può essere fatta scorrere in una sola direzione mentre in **Figura 4-b** il pilotaggio è bipolare in quanto il circuito permette, se opportunamente controllato, la circolazione della corrente in entrambe le direzioni per cui la relativa coppia statorica può essere polarizzata magneticamente in entrambi i versi. Anche il circuito di **Figura 4-C** rappresenta un pilotaggio di tipo bipolare in quanto, a seconda che si faccia circolare corrente nel primo o nel secondo avvolgimento, i poli statorici vengono polarizzati in una direzione piuttosto che nell'altra. Questo è possibile avvolgendo intorno agli stessi poli magnetici, ma in verso opposto, i due avvolgimenti. Gli avvolgimenti corrispondenti al caso (C) vengono anche detti "avvolgimenti in bifilare" e sono molto utilizzati negli attuali motori passo-passo.

I circuiti mostrati in **Figura 4** rappresentano i circuiti fondamentali per il pilotaggio di una fase di un motore passo-passo. Nel primo si ha passaggio di corrente

nella fase statorica quando il transistor è portato in conduzione ed interruzione della stessa corrente quando il transistor è portato in interdizione. Nel secondo invece portando in conduzione i transistor Q1 e Q3 ed in interdizione i transistor Q2 e Q4 si determina il passaggio della corrente in una direzione della fase statorica, portando invece in conduzione Q2 e Q4 ed in interdizione Q1 e Q3 si determina il passaggio della corrente nella direzione opposta. Se invece si portano tutti i transistor in interdizione non si ha alcun passaggio di corrente nella fase statorica controllata dal circuito. In **Figura 4-C** invece può aversi una polarizzazione del circuito magnetico statorico quando si porta in conduzione Q1 ed in interdizione Q2, polarizzazione opposta quando si porta in interdizione Q1 ed in conduzione Q2 oppure assenza di polarizzazione quando entrambi i transistor risultano interdetti. Facciamo osservare che la corrente che circola nella fase statorica può essere considerata continua e pari a V/R , dove V è la tensione di alimentazione ed R la resistenza dell'avvolgimento, solo se la frequenza di commutazione non è eccessivamente elevata. Infatti, l'avvolgimento è un carico ohmico-induttivo, con resistenza tipicamente dell'ordine degli ohm o decine di ohm ed induttanza tipicamente dell'ordine dei mH, da cui segue che la costante di tempo del circuito LC, costituito dallo stesso avvolgimento, è tipicamente dell'ordine del millisecondo. Di conseguenza, solo se il periodo di

commutazione è molto maggiore di questa costante di tempo è possibile considerare continuo o meglio di forma rettangolare e modulo pari a V/R l'andamento della corrente, in quanto il fronte di salita può essere approssimato come verticale. In tutti gli altri casi appare evidente il transitorio della corrente, transitorio che influenza il comportamento dello stesso motore specie per le implicazioni meccaniche che comporta in termini di coppia motrice.

Appare ovvio ed intuitivo allora come, a seconda del circuito che si adotta per il controllo questo possa risultare più o meno efficiente ma anche più o meno complesso e quindi costoso. È opportuno chiedersi in che modo sia possibile ridurre il tempo di salita. Il modo più immediato di ottenere questo risultato è quello di ridurre la costante di tempo dell'avvolgimento. Essendo quest'ultimo pari ad L/R è allora sufficiente porre in serie allo stesso avvolgimento una resistenza aggiuntiva R_s in modo da avere $L/(R+R_s) < L/R$, dove L ed R sono i parametri di resistenza ed induttanza tipici dello stesso avvolgimento.

Questo modo di agire è estremamente semplice e pratico costruttivamente, tuttavia presenta due fondamentali inconvenienti: da un lato si diminuisce il valore della corrente a fine transitorio con conseguenze sulla coppia del motore che risulta ridotta, dall'altro si introduce un elemento di dissipazione che limita il rendimento dello stesso motore. Queste due considerazioni sono sufficienti a spiegare

il motivo per cui tale accorgimento è di solito adottato solo per il pilotaggio di motori passo-passo di piccola potenza. Un modo più efficiente ma anche più complesso che può essere adottato allora, soprattutto per motori passo-passo di potenza maggiore, è quello di impiegare due sorgenti di alimentazione, una che interviene durante il transitorio e avente valore maggiore, che consenta una rapida salita della corrente e l'altra di valore più ridotto che interviene in sostituzione della prima appena si è raggiunto il valore di corrente desiderato. La prima sorgente può essere considerata una sorgente di avviamento mentre la seconda una sorgente di mantenimento. Ovviamente, anche la commutazione dalla sorgente di avvio a quella di mantenimento è controllata attraverso dispositivi di commutazione a semiconduttore. In **Figura 5** è riportato il tipico andamento che assume la corrente all'interno dell'avvolgimento nei due casi distinti. Nel primo (A) si impiega una tensione di alimentazione di valore V_1 mentre nel secondo si impiega la tensione di alimentazione $V_2 > V_1$. Come mostra la figura la costante di tempo resta la stessa, tuttavia la rapidità con cui sale la corrente assorbita è molto maggiore nel secondo caso. Impiegando entrambe le tensioni durante il transitorio è allora possibile ottenere il comportamento di **Figura 6** in cui si sfruttano entrambe le tensioni di alimentazione, la V_2 come tensione di transitorio (avviamento) e la V_1 come tensione di mantenimento.

Quanto detto permette di introdurre anche un terzo metodo, ancora più complesso ma allo stesso tempo più efficiente, utile ad eccitare l'avvolgimento con un tempo di salita estremamente ridotto. Si tratta di

metodi cosiddetti switching o a chopper. In pratica si ricorre ad un'unica alimentazione, di valore molto più elevato rispetto a quella che normalmente si adopererebbe per l'intero intervallo di passo. Questa consente, appena avvenuta la commutazione del circuito, di ottenere una rapida salita della corrente, alla quale tuttavia non si dà il tempo di raggiungere il valore di regime poiché la si interrompe appena supera di poco il valore desiderato; allo stesso modo non si dà il tempo alla corrente di scendere al di sotto di un determinato valore in quanto appena essa scende al di sotto di un valore stabilito si ricommuta il circuito in conduzione. Il comportamento è schematizzato nel diagramma di **Figura 7** e perdura per tutto il periodo di passo.

Controllando adeguatamente la frequenza degli impulsi di chopper è allora possibile controllare il valore medio della corrente che effettivamente fluisce all'interno della fase statorica durante il periodo di passo. Questi metodi, anche detti a modulazione, presentano il vantaggio di necessitare di una sola sorgente di alimentazione, sono caratterizzati da basse perdite e quindi elevati rendimenti e permettono non solo il controllo ma anche la regolazione automatica della corrente all'interno dell'avvolgimento. Gli schemi precedentemente riportati (**Figura 4**) fanno riferimento al pilotaggio del singolo avvolgimento statorico della macchina. Volendo, in linea di principio, riprodurre la cosa per tutti gli avvolgimenti del motore è possibile considerare un circuito di pilotaggio come quello mostrato in **Figura 8** che fa riferimento ad un motore passo-passo unipolare a cinque fili (e quindi con presa centrale). Facciamo osservare che i transistor bipolari rap-

presentati nello schema possono in realtà essere sostituiti da Mosfet oppure da dispositivi IGBT; in ogni caso la logica del controllo resta sostanzialmente invariata. Facciamo osservare che il movimento di un passo non corrisponde necessariamente all'alimentazione di un solo avvolgimento statorico. Infatti, come mostrato in **Figura 9**, è anche possibile ottenere questo effetto alimentando due avvolgimenti simultaneamente. La **Figura 9** fa riferimento ad un caso semplice in cui si ha un solo magnete permanente e quattro bobine eccitatrici che presentano a coppie una presa centrale (motore unipolare). Pilotando le coppie di bobine (1-3) attraverso la presa centrale, successivamente le bobine (3-2) attraverso le due prese centrali quindi le (2-4) attraverso un'unica presa centrale e così via (4-1) ed (1-3) è possibile ottenere la rotazione oraria. Appare evidente, a questo punto, anche quale sia il tipo di pilotaggio da effettuare per determinare una rotazione in senso antiorario. Nel caso in cui si intenda realizzare un motore pass-passo con un maggior numero di passi, si ha un maggior numero di poli del magnete permanente ed anche un maggior numero di bobine eccitatrici. In realtà si hanno comunque ed ugualmente quattro avvolgimenti in quanto le suddette bobine eccitatrici vengono in collegate a gruppi in parallelo tra loro. Nel caso di **Figura 10**, per esempio, abbiamo 12 bobine statoriche dislocate lungo lo sviluppo dello statore, tuttavia esse sono connesse in parallelo a gruppi di tre. La morsettiera del motore, pertanto, è costituita comunque da 6 morsetti dei quali quattro sono quelli effettivi di controllo mentre gli altri due sono quelli connessi al polo positivo dell'alimentazione, a meno che le due prese centrali non coincidano, caso in cui il numero dei morsetti si riduce a cinque.

La conseguenza di ciò è non solo che il numero di morsetti in uscita non cambia ma anche che la sequenza di controllo da applicare a questi morsetti non cambia anch'essa: semplicemente sarà necessario ripetere più volte la stessa sequenza per ottenere una rotazione del rotore pari ad un giro completo. Nel caso di 12 bobine parallelate a gruppi di tre, per esempio (**Figura 10**), sarà necessario eseguire la sequenza completa tre volte se si vuole ottenere una rotazione completa di 360° . Quanto esposto spiega perché se

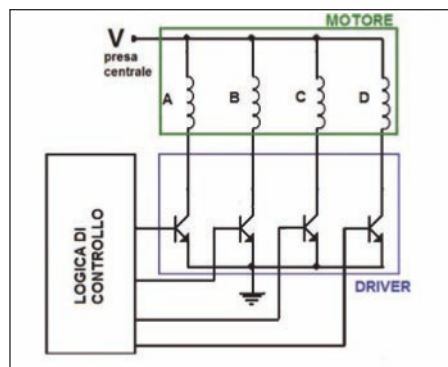


Figura 8: schematizzazione del circuito di pilotaggio di un motore passo-passo a quattro fasi unipolare.

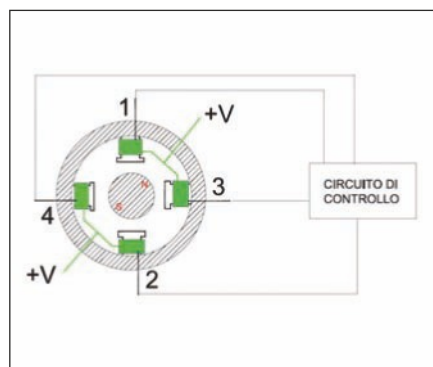


Figura 9: un motore passo-passo può anche essere pilotato eccitando simultaneamente due fasi statori che.

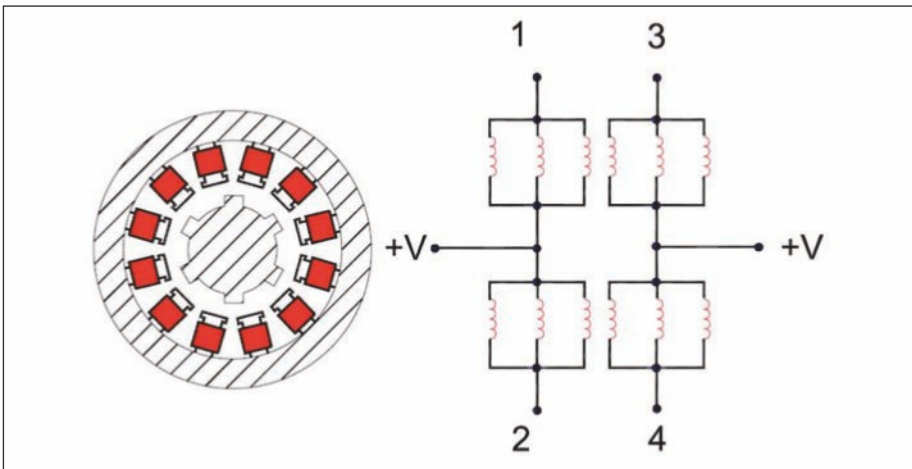


Figura 10: all'interno di un motore passo-passo unipolare sono, generalmente, presenti più bobine di quanto non siano le fasi (per esempio 8 o 12 bobine), tuttavia queste sono connesse in parallelo tra loro in modo da dare origine a 4 avvolgimenti o fasi caratterizzate dai soliti quattro morsetti più due (due prese centrali) o uno (una sola presa centrale) da connettere all'alimentazione.

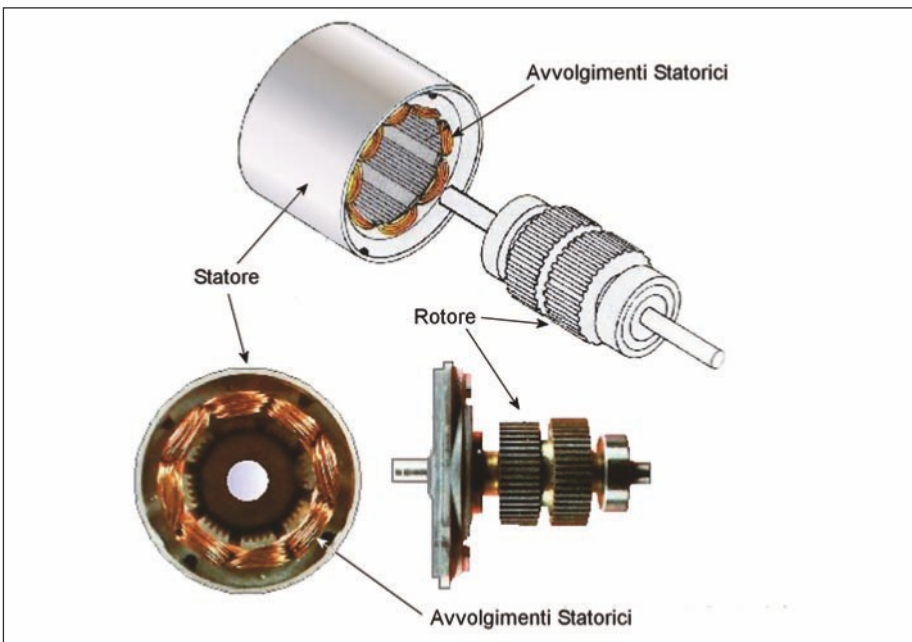


Figura 11: in un motore passo-passo unipolare si trovano, generalmente, un numero di bobine multiple di 4, per esempio 8, tuttavia il numero di fasi è sempre pari a 4 in quanto le bobine risultano connesse in parallelo tra loro in modo da dare origine sempre a quattro avvolgimenti statorici (fasi).

si apre un motore passo-passo si trova sempre, all'interno, uno statore nel quale è possibile riconoscere un numero di bobine multiplo di quattro. Per esempio nel motore riportato in **Figura 11** si riconoscono 8 bobine statoriche.

Ovviamente, quanto detto adesso si riferisce ai motori unipolari che sono anche quelli più comuni e che risultano caratterizzati da cinque o sei morsetti, a differenza dei bipolari che sono caratterizzati da soli quattro morsetti. In realtà può capitare, anche se raramente, di avere un motore passo-passo con 8 morsetti. In

questo caso semplicemente si stanno portando fuori gli estremi di ciascuno dei quattro avvolgimenti (**Figura 12**).

Sia che si realizzi il circuito di pilotaggio direttamente, sia che si utilizzino circuiti di controllo comunemente presenti in commercio, può essere opportuno misurare la resistenza ohmica degli avvolgimenti del motore per calcolare la corrente assorbita, in modo da essere certi che il circuito di controllo adottato presenti dei transistor che siano in grado di fornire una corrente sufficientemente superiore. Generalmente, le correnti in gioco sono comprese tra

Tabella 1 – Pilotaggio di un motore passo-passo a due fasi bipolare (pilotaggio ad una fase)

I_1	I_2	POSIZIONE ANGOLARE(°)
1	0	0
0	1	90
-1	0	180
0	-1	270

Tabella 2 - Pilotaggio di un motore passo-passo a due fasi bipolare (eccitazione a due fasi)

I_1	I_2	POSIZIONE ANGOLARE(°)
1	1	45
-1	1	135
-1	-1	225
1	-1	315

il centinaio di milliampere e pochi ampere. Con un caso realizzativo molto semplice è possibile illustrare come sia semplice pilotare un motore bipolare. La **Figura 13** esemplifica il caso di un motore passo passo a due fasi bipolare.

Pilotando i morsetti A-A' in modo da rendere il polo A di tipo SUD si tende ad orientare il rotore a magnete permanente nella posizione A. È evidente allora che pilotando successivamente B-B' allo stesso modo e disalimentando A-A' si potrà il magnete a ruotare di un ulteriore passo; a questo punto si rialimenta la coppia A-A' ma con polarità opposta a quella impressa nel primo step, disalimentando allo stesso tempo B-B' e si ottiene un altro step, quindi si disalimenta A-A' e si alimenta B-B' con polarità invertita ottenendo l'ultimo step della rotazione. Anche in questo caso, se si desidera un numero di step maggiori per giro è necessario impiegare motori a più poli rotorici e bobine statoriche ma i morsetti che si hanno in uscita saranno comunque in numero pari a quattro. Il fatto di poter impiegare un pilotaggio bipolare, infatti, consente di ridurre il numero complessivo dei morsetti. Non è difficile comprendere che alimentando opportunamente sia la coppia A-A' che B-B' è anche possibile portare il rotore nelle posizioni intermedie rispetto a quelle appena menzionate, per cui complessivamente è possibile affermare che un motore passo-

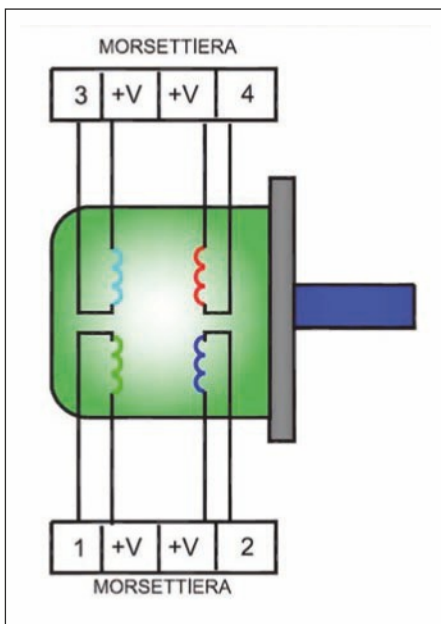


Figura 12: se il motore è provvisto di una morsettiera ad 8 fili è un motore unipolare a quattro fasi; ciascuna coppia di morsetti fa capo ad uno dei quattro avvolgimenti statorici.

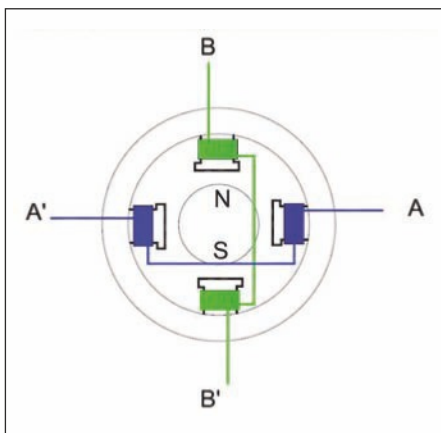


Figura 13: esemplificazione di un motore passo-passo bipolare.

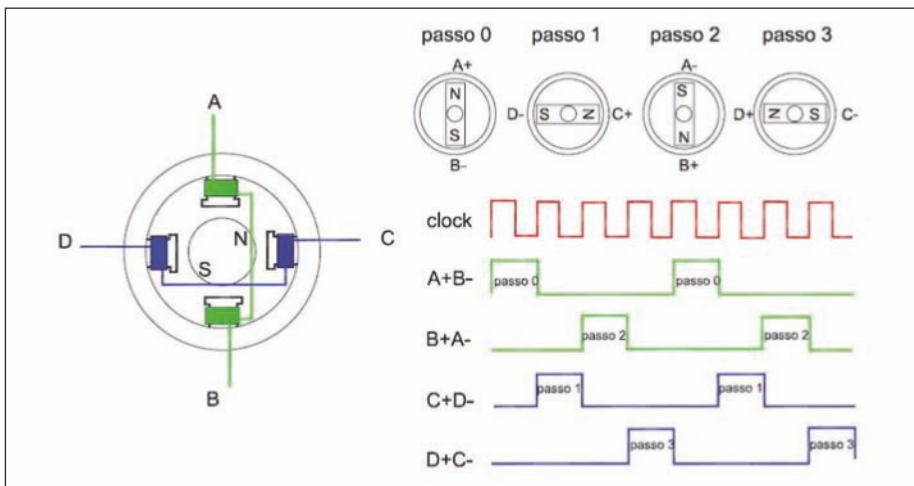


Figura 14: pilotaggio a fase singola di un motore passo-passo bipolare a due fasi (eccitazione ad una fase).

passo, se opportunamente pilotato, permette anche di eseguire step di rotazione che corrispondono a metà passo.

Il funzionamento di un motore passo-passo può essere espresso attraverso tabelle che ne evidenziano gli stati in termini di posizione angolare e le relative correnti di pilotaggio. Tali tabelle, ovviamente, si diversificano a seconda del numero di passi che caratterizza il motore ed a seconda del numero di fasi e del fatto che si tratti di un motore bipolare o unipolare. Il pilotaggio di un motore bipolare a quattro passi, per esempio, è riportato in **Tabella 1**, nel caso in cui si ecciti una sola fase per volta. I1 ed I2 sono le correnti nelle due fasi; esse danno origine, grazie alla caratteristica del motore di essere bipolare, a quattro possibili combinazioni. In questo caso si parla di pilotaggio ad una fase, in quanto si alimenta una sola fase per volta. In **Figura 14** è riportata, in dettaglio, la sequenza delle fasi di **Tabella 1**. Le sequenze è sincronizzata da un clock il cui periodo determina la frequenza degli impulsi di comando e quindi in ultima analisi la velocità di rotazione del motore. Poiché i quattro stati non sono fra loro equivalenti ed è richiesta una sequenza ben precisa di comando, un errato collegamento, anche di una sola fase, può comportare un funzionamento irregolare del motore o addirittura il suo blocco. È facile rendersi conto come sia possibile ottenere la stessa cosa anche con un motore a quattro fasi unipolare. Se in un motore bipolare a due fasi si impiega invece l'eccitazione di entrambe le fasi (**Figura 15**) ad ogni passo, si ha il pilotaggio di **Tabella 2**.

Nel pilotaggio a due fasi il rotore si allinea in una direzione intermedia fra le due espansioni polari dello statore. Questo non è in realtà l'unico vantaggio in quanto questo tipo di pilotaggio consente anche di ottenere una forza di attrazione magnetica più intensa fra statore e rotore e quindi una maggior coppia motrice. Appare ovvio allora come sia possibile comporre entrambi i tipi di eccitazione per ottenere rotazioni a step di $\frac{1}{2}$ di passo. I passi di pilotaggio in questo caso sono riassunti in **Tabella 3** nella quale a ciascun passo corrisponde un ottavo di giro.

È inoltre immediato ottenere l'inversione del senso di rotazione del motore tramite l'inversione della sequenza degli impulsi (si inviano i comandi delle fasi come se fossero letti da destra a sinistra invece che da sinistra a destra).

In un motore reale il numero di espansioni polari di statore è in realtà maggiore, ma sempre multiplo di quattro, in modo da utilizzare esternamente solo 4 fili (le bobine sono connesse in parallelo a gruppi di quattro, la prima con la quinta, la seconda con la sesta, e così via) e consentire, in ogni caso, un numero maggiore di passi per giro.

Grazie a questo accorgimento le sequenze di impulsi rimangono invariate anche per motori caratterizzati da decine o addirittura da centinaia di passi per giro. L'unica differenza, rispetto a quanto mostrato nelle precedenti figure e tabelle, è costituita dal fatto che per poter compiere un giro completo sarà necessario ripetere più volte la stessa sequenza di combinazioni di eccitazione.

Tabella 3 – Pilotaggio di un motore passo-passo bipolare a due fasi (pilotaggio di una fase per volta alternata al pilotaggio di entrambe le fasi per volta in modo da gestire rotazioni di $\frac{1}{2}$ di passo)

I ₁	I ₂	POSIZIONE ANGOLARE(°)
I	0	0
I	I	45
0	I	90
-I	I	135
-I	0	180
-I	-I	225
0	-I	270
I	-I	315

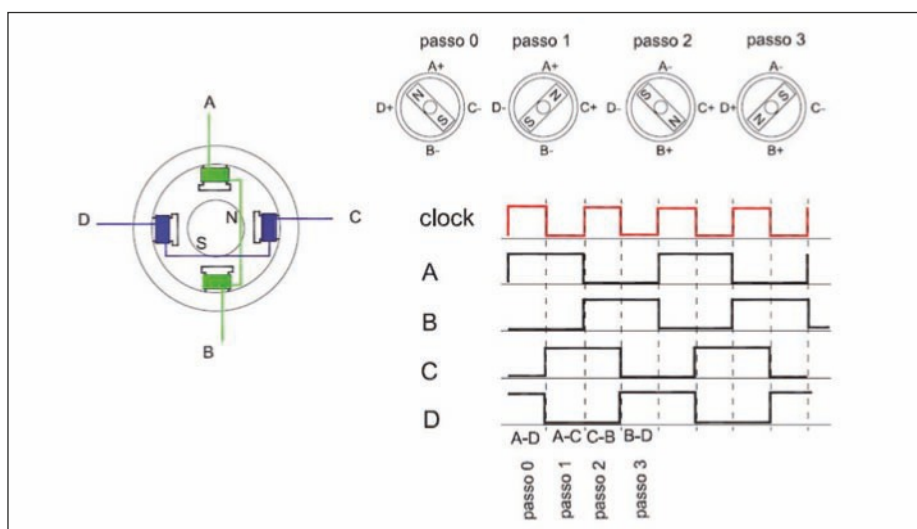


Figura 15: pilotaggio di un motore passo-passo bipolare a due fasi (eccitazione a due fasi).

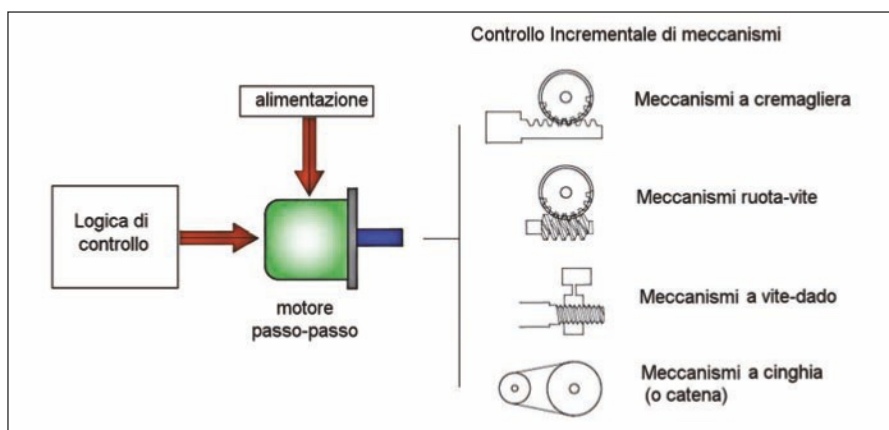


Figura 16: principali cinematismi con cui è possibile accoppiare meccanicamente l'asse di un motore passo-passo al sistema meccanico da azionare e controllare.

INDIVIDUARE LA SEQUENZA CORRETTA DEI MORSETTI

Quando non si hanno indicazioni specifiche stampate sulla carcassa del motore o sulla sua morsettiera circa l'impiego corretto dei morsetti è necessario impiegare un multimetro per dedurre direttamente quale sia la loro corrispondenza con gli avvolgimenti statorici.

Se il motore è bipolare si hanno quattro morsetti per cui, misurando la resistenza ohmica offerta da ciascuna coppia di morsetti, è possibile, prima di tutto, individuare e separare la prima coppia di avvolgimenti dalla seconda. A questo punto, in base a quanto detto alla fine del precedente paragrafo, appare ovvio quale sia il pilotaggio da imprimere. Ovviamente potrebbe capitare che la rotazione non avvenga nel senso

desiderato. In questo caso sarà sufficiente invertire la connessione di morsetti relativi alla prima coppia di avvolgimenti tra loro e fare la stessa cosa per i morsetti che fanno capo alla seconda coppia.

Nel caso in cui si abbia a che fare con un motore unipolare a sei fili sappiamo che tre, opportunamente individuati, corrispondono ad una coppia di avvolgimenti ed altri tre, analoghi e del tutto svincolati ed indipendenti elettricamente dai precedenti, corrispondono alla seconda coppia. Evidentemente sarà necessario, per prima cosa, individuare la prima terna e la seconda terna di morsetti impiegando ancora una volta un multimetro. Una volta individuata ciascuna terna si individuerà all'interno di essa, con altre misure di resistenza, quale sia il morsetto corrispondente al punto centrale.

Ancora una volta se si osserva che il pilotaggio del motore fa ruotare l'asse in senso opposto a quello desiderato sarà necessario invertire, all'interno di ciascuna terna, i morsetti non coincidenti con la presa centrale. Si osserva inoltre che, impiegando il motore opportunamente, escludendo l'impiego della presa centrale è possibile farlo funzionare come bipolare anche se costruttivamente risulta unipolare.

Sistemi meccanici comandati dai motori passo-passo

La progettazione di sistemi che impiegano motori passo-passo deve tenere conto, in maniera adeguata, di una serie di vincoli e fattori meccanici (coppie motrici, coppie resistenti, velocità di passo, coppie di inerzia, ecc..) che sono determinanti per un impiego efficace della macchina. Appare più che mai evidente la necessità che aspetti elettronici (elettronica di controllo), elettrici (il motore in se) e meccanici (cinesmatismi, rotismi e meccanismi in genere) siano sinergicamente considerati e correlati nel progettare un sistema basato sull'impiego di queste macchine.

Specie negli ultimi anni, infatti, la progettazione di macchine sempre più sofisticate, caratterizzate da un controllo full-digital della meccanica, ha portato alla realizzazione di veri e propri sistemi mecatronici che adottando strategie di sviluppo integrato fra meccanica ed elettronica consentono di ottenere prestazioni, funzionalità, flessibilità, controllabilità ed elevata affidabilità. L'impiego in questi ambiti dei motori passo-passo è più che mai diffuso. Non è questa la sede in cui approfondire questi aspetti, tuttavia è opportuno schematizzare i principali cinematismi con cui è possibile accoppiare meccanicamente un motore passo-passo al sistema meccanico da azionare e controllare. A tale proposito si rimanda all'analisi della **Figura 16**. Occorre segnalare che le applicazioni del motore passo-passo sono tipicamente ad anello aperto; nonostante ciò esistono sistemi di controllo che impiegano motori passo-passo di tipo ad anello chiuso che consentono il controllo anche di applicazioni in cui le particolari condizioni operative possono portare all'insorgenza del problema della "perdita di passo". Monitorando in tempo reale lo spostamento che il motore effettua è possibile garantire,



Figura 17: alcuni motori passo-passo diffusi in commercio.

Spesso integrano, inoltre, il controllo che consente, a motore fermo, una adeguata riduzione automatica della corrente di fase, precauzione importante che se non presa potrebbe portare ad un surriscaldamento eccessivo dello stesso motore ed al suo danneggiamento.

Gli stessi moduli spesso dispongono di uscite di diagnostica che consentono di monitorare costantemente dall'esterno lo stato dell'azionamento. Si tratta, generalmente, di moduli compatibili sia con livelli logici CMOS che TTL le cui porte di management possono essere di diverso tipo, per esempio RS232 o RS485 (ricorrente in campo industriale). Il controllo attraverso queste porte non è un semplice monitoraggio ma il più delle volte costituisce un vero e proprio pilotaggio che permette prima di tutto l'impostazione della frequenza degli impulsi di comando e quindi della velocità di rotazione del motore. Generalmente è possibile controllare direttamente da PC questi moduli o interfacciarli ad altre unità, per esempio a microcontrollore oppure a processori o a PLC.

Sono anche disponibili in commercio schede in grado di interfacciare più motori passo-passo e dotate di porta di management USB (Figura 18) o addirittura ethernet. La disponibilità di porte di management RS232 ed RS485 ed oggi soprattutto USB ed ethernet consente a questi moduli di ricevere i comandi di posizionamento direttamente da PC rispondendo così in modo efficiente a qualsiasi esigenza applicativa.

Generalmente si tratta di schede di ridotte dimensioni in grado di controllare uno, due o più motori passo-passo (bipolari, unipolari o con polarità programmabile) e che spesso integrano anche ingressi (come ingressi provenienti da sensori di fine corsa) ed uscite per il comando di altri apparati. Anche se la loro applicazione consiste principalmente nel gestire movimenti di rotazione finiti, integrano spesso la possibilità di gestire un funzionamento a ciclo continuo o un controllo a velocità variabile.

Stepper motor controllers

In commercio esistono circuiti integrati specifici per il controllo di motori passo-passo di tipo unipolare, bipolare e di entrambi i tipi. Di seguito riportiamo una breve trat-

Tabella 4 – Alcune caratteristiche dei principali motori passo-passo diffusi in commercio

CARATTERISTICHE TIPICHE	VALORI TIPICI
Tensione di alimentazione	2Vcc...120Vcc
Angoli di Sep tipici	0,9°-1,8 ° -7,5 ° -15 ° -18°
Numero di fili	4,6,8
costo	Tipicamente compreso tra 10-20 euro e 100-200 euro
Case costruttrici	Crouzet, Hurst manufacturing, Johnson Electric, McLennan Servo Supplies, Philips
Diametro albero	1,5mm...15 mm
Corrente nominale per fase	Tipicamente tra 100mA e qualche Ampere
Lunghezza	Compresa tra 10 mm e 150 mm
Larghezza	Compresa tra 15 e 100 mm
Coppia di lavoro tipica e massime	Comprese tra pochi N*cm e oltre 100 N*cm
Passi per giro	Tipicamente tra poche decine e alcune migliaia
peso	Da poche centinaia di grammi a pochi chilogrammi

anche in queste condizioni, posizionamenti precisi e privi di errore.

Il sistema in anello chiuso consente reazioni istantanee a variazioni di carico meccanico consentendo, al tempo stesso, di evitare i sovradimensionamenti necessari nei sistemi in anello aperto al fine di garantire il corretto funzionamento in tutte le situazioni di carico. Il controllo della corrente e quindi della coppia consente, inoltre, di ottenere movimenti sicuri e meccanicamente dolci e senza vibrazioni.

ALCUNE CARATTERISTICHE TIPICHE DEI MOTORI PASSO-PASSO DISPONIBILI IN COMMERCIO

In Tabella 4 si riportano alcune delle caratteristiche tipiche dei motori passo-passo diffusi in commercio. Tensioni di alimentazione, passo angolare, numero di fili disponibili sulla morsettiera, numero di passi per giro, coppia motrice sviluppata, corrente assorbita sono tutte carat-

teristiche che è necessario valutare correttamente per comprendere se il motore è adeguato alla specifica applicazione cui è destinato.

SOLUZIONI COMMERCIALI PER IL CONTROLLO DEI MOTORI PASSO-PASSO

Ossi sono disponibili in commercio moduli di controllo per motori passo-passo che possono essere montati su PCB o già disponibili sotto forma di schede di diverso formato (schede nude, moduli per montaggio su barra DIN come richiesto in molte applicazioni industriali, ecc..) e di diversa modularità. Gli stessi costruttori e distributori di motori passo-passo rendono disponibili una vasta gamma di queste schede. Esse integrano, oltre al controllo del motore (quello di velocità per primo), diversi tipi di protezione come la protezione contro il cortocircuito fase-fase, fase-massa, ed altre situazioni come l'insorgenza di sovratemperature.

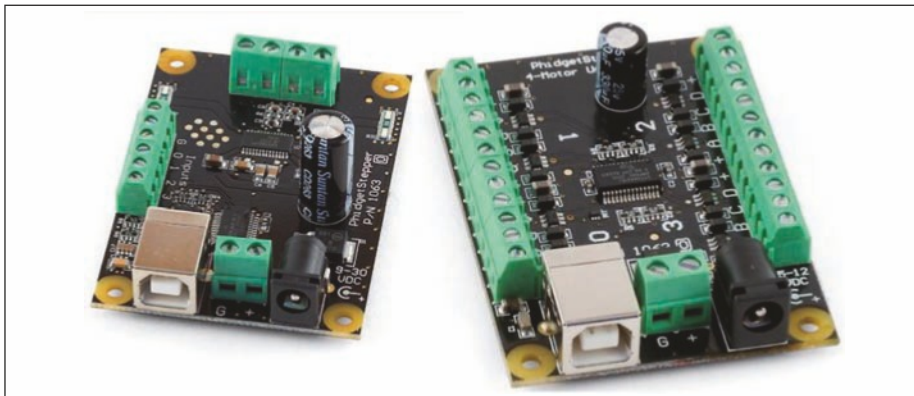


Figura 18: esempio di schede di controllo per motori passo-passo con porta di gestione USB (www.robot-italy.com).

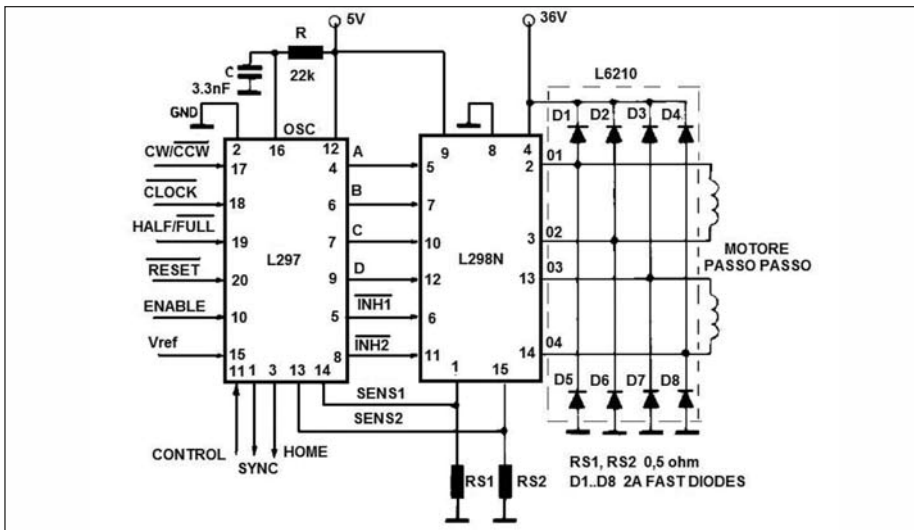


Figura 19: integrati L297 ed L298 impiegati per il controllo motori passo-passo bipolari a due fasi.

tazione di alcuni di questi dispositivi (ST L297, ST L298 ed SA1027) con qualche dettaglio specifico sul loro impiego.

ST L297 ed ST L298

L'integrato L297 della ST Microelectronics è uno *stepper motor controller* integrato che permette il pilotaggio di motori passo-passo a due fasi bipolari e a quattro fasi unipolari e che consente anche il controllo a mezzo passo. Esso genera la sequenza di eccitazione delle fasi del motore e permette di regolare la corrente che circola negli avvolgimenti pilotando opportunamente il driver in uscita (generalmente rappresentato dall'integrato L298) attraverso la tecnica PWM.

L'L297 è controllato digitalmente tramite gli ingressi di clock, di direzione e mode ed è generalmente impiegato con il driver L298 (della stessa casa costruttrice) anche se è possibile impiegarlo anche sostituendo al driver un circuito realizzato at-

traverso transistor discreti. In **Figura 19** è riportata una tipica applicazione per motori bipolari a due fasi. L'analisi diretta del datasheet del componente, facilmente scaricabile dal sito del costruttore (www.st.com), è sufficiente a comprendere il funzionamento del circuito illustrato nella stessa figura (il circuito è estratto direttamente dal datasheet suddetto). I pin 4-5-6-7-8-9 sono quelli che effettivamente generano le sequenze di eccitazione. Più precisamente, i pin 4-6 determinano il pilotaggio della coppia di morsetti A-A mentre i pin 7-9 servono a pilotare la coppia B-B. I pin 5 ed 8, definiti come INH1 (Inhibit1) ed INH2 (Inhibit2), sono di inibizione del pilotaggio (l'inibizione è attiva su livello logico basso).

Ovviamente, il controllo del pilotaggio attraverso questi pin permette indirettamente di controllare il verso di rotazione del motore.

I pin 14 (SENS1) e 13 (SENS2) sono di sen-

sing poichè opportunamente impiegati permettono di controllare o limitare la corrente assorbita dagli avvolgimenti statorici.

Il pin 15 (Vref) permette il funzionamento del suddetto controllo di corrente (unitamente ai pin 14 e 13).

Il pin 17 (CW/CCW) consente di stabilire e quindi controllare la direzione di rotazione del motore (portando quest'ultimo dallo stato logico alto a quello basso sarà possibile invertire il senso di marcia e riportandolo a zero sarà possibile ripristinare il senso di marcia iniziale).

Il pin 19 (Half/Full) è quello che consente di definire la modalità di funzionamento come a passo pieno (full-step) o a mezzo passo (half-step). A seconda che su questo pin sia portato un livello logico alto o basso pertanto, ad ogni colpo di clock avremo un avanzamento di un passo (livello basso) oppure di mezzo passo (livello alto).

Quanto detto significa, ovviamente, che per far funzionare il tutto è necessario una sorgente di clock applicata sul pin 18 (CLOCK) (onda quadra TTL compatibile). Ogni impulso di clock determina la rotazione dell'albero del motore di un passo o di mezzo passo, a seconda del livello di tensione presente sull'ingresso HALF/FULL.

Occorre inoltre ricordare che per far funzionare il tutto è necessario agire opportunamente sul PIN 10 il quale altro non è che il pin di ENABLE (abilita il chip quando è portato allo stato logico alto). Le uscite INH1, INH2, A, B, C, e D sono invece tutte a livello logico basso quando ENABLE = 0 Il C.I. L297 non pilota direttamente il motore ma necessita di un driver esterno. Infatti da solo esso è in grado di erogare una corrente massima di poche decine di mA. Per questo motivo, normalmente, l'L297 pilota un driver di potenza esterno il qual a sua volta fornisce l'effettiva alimentazione alle fasi del motore. Un driver di potenza molto utilizzato, unitamente all'integrato L297, nel caso di motori passo-passo bipolari, è l'ST L298. Quest'ultimo è un circuito di potenza in grado di pilotare carichi fortemente induttivi come i motori passo-passo in grado di erogare fino a 2A di corrente. Con riferimento al circuito applicativo riportato in **Figura 19**, la corrente fornita dal driver attraverso, rispettivamente, i pin 1 e 15 dello stesso integrato, viene trasformata in tensione attraverso le resistenze RS1 ed RS2 e questa informazione è acquisita dal C.I. L297 attra-

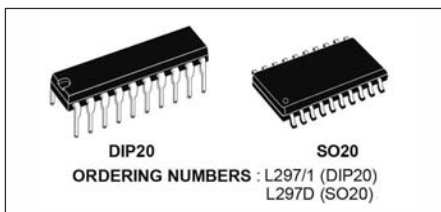


Figura 20: tipici package in cui è possibile trovare l'integrato L297.

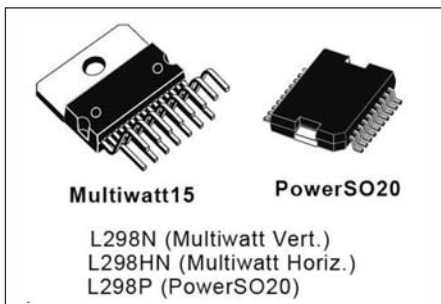


Figura 21: tipici package in cui è possibile trovare l'integrato L298.

verso i pin13(SENS2) e 14(SENS1) che pertanto si comportano come sensori di corrente delle fasi AB e CD.

Variando il valore di V_{ref} , attraverso un trimmer usato come potenziometro, è possibile regolare la corrente massima che si vuole che gli avvolgimenti assorbano (da pochi mA fino al valore massimo pari a circa 2A). In questo modo si introduce una misura di protezione sia per i driver che per gli avvolgimenti dello stesso motore, utile in situazioni come i frangenti di tempo nei quali il motore resta con il suo asse fermo in una determinata posizione (situazione nella quale se non si interviene con un controllo adeguato, l'elevata corrente assorbita dal motore rischia di rovinare gli avvolgimenti del motore stesso e/o il driver di potenza).

In **Figura 20** sono raffigurati i package tipici in cui è possibile trovare l'integrato L297, mentre in **Figura 21** è riportato il package in cui è possibile trovare l'integrato L298. Come si può osservare, diversamente da quanto accade per L297, L298 può essere dotato di aletta di raffreddamento in quanto essendo di fatto lo stadio di potenza che fornisce corrente alle fasi del motore è il componente che si riscalda maggiormente. Se si superano alcune centinaia di mA di corrente erogata dal driver è pertanto opportuno applicare su tale aletta un adeguato dissipatore. Nella descrizione non ci siamo preoccupati

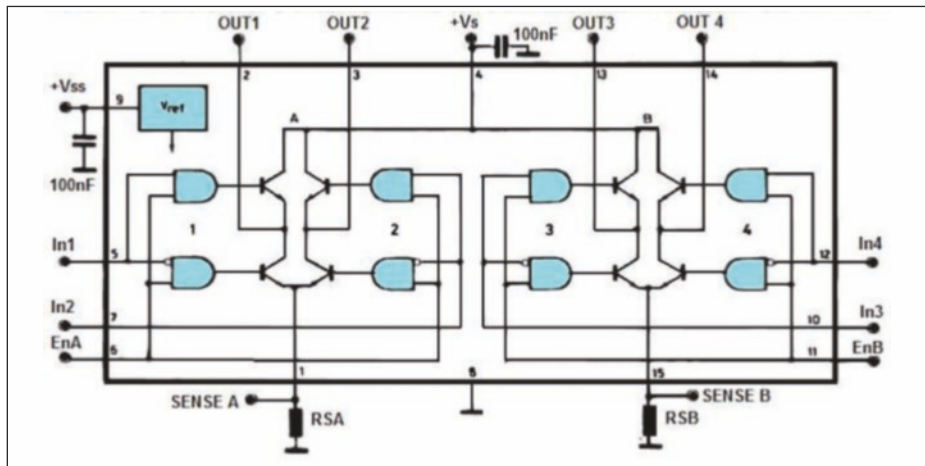


Figura 22: configurazione circuitale interna dell'integrato driver L298.

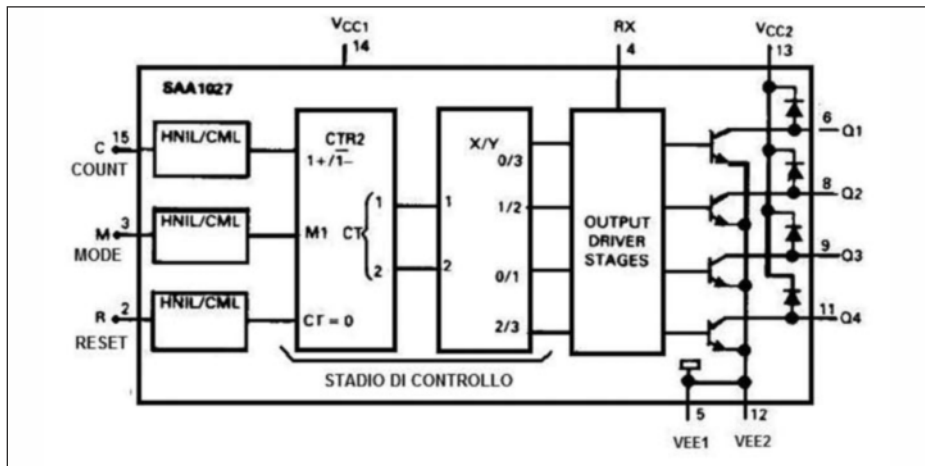


Figura 23: configurazione interna dell'integrato SA1027.

pati molto del piedino 16 (OSC) che in ogni caso, attraverso la rete esterna RC ad esso connessa, determina la frequenza dell'oscillatore ($f=1/(0,69RC)$) interno. In **Figura 22** è invece raffigurata la configurazione interna dell'integrato L298 così come riportato all'interno del suo datasheet. I diodi posti in uscita all'L298 (**Figura 19**) servono come protezioni contro le sovratensioni che si originano durante le commutazioni elettroniche del driver e devono pertanto essere diodi veloci (Schottky). Il pin 11 (CONTROL) dell'L297 può essere tenuto a livello alto così come il pin 12 che è di alimentazione. Nello specifico, l'ingresso di controllo definisce l'azione del chopper nel senso che quando CONTROL=1, gli impulsi applicati agli avvolgimenti del motore sono controllati direttamente attraverso le linee A, B, C e D collegate allo stadio di potenza (chopping di fase), mentre quando CONTROL

=0 questi sono controllati sulle linee INH1 e INH2 (chopping INHIBIT).

Il pin 1 è un uscita e può essere lasciato floating (si rimanda al datasheet per maggiori dettagli) mentre il pin 3 è una uscita in open collector che indica quando il motore si trova nella posizione di configurazione AA'BB'=1010. L'L297 va alimentato a 5V mentre i livelli logici di cui abbiamo parlato nel corso dell'esposizione sono rispettivamente 0V (livello basso) e 5V (livello alto).

Con riferimento alla configurazione interna dell'integrato L298 (**Figura 22**) facciamo osservare che sul pin 9 porremo 5V mentre sul pin 4, che è quello di effettiva alimentazione degli avvolgimenti del motore, va portata l'alimentazione di potenza che spesso è pari a 12V ma che può anche giungere anche fino a 36V come si deduce dal datasheet. Sul pin di clock dell'L297 possiamo porre una sor-

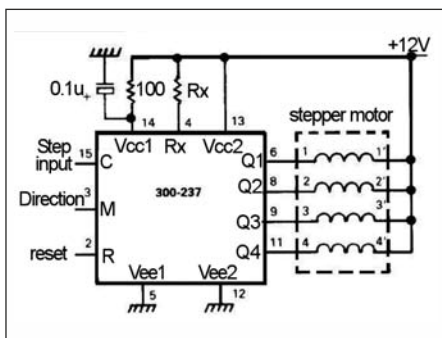


Figura 24: applicazione tipica dell'integrato SA1027 nel controllo di motori passo-passo.

gente qualunque di clock a frequenza opportuna, per esempio un NE555 impiegato come astabile oppure l'uscita di un controllore (in modo da poter eventualmente modulare facilmente la frequenza di clock nel tempo) o di un altro circuito di interfaccia.

Integrato SA1027

L'SA1027, di costruzione Philips, è un altro integrato sovente impiegato per il controllo dei motori passo-passo. Si tratta di un integrato che funziona tipicamente con tensioni che vanno da 10V circa fino ad un massimo di 18V e che può fornire una corrente massima, agli avvolgimenti del motore, di 500mA. In **Figura 23** è riportato lo schema a blocchi interno mentre in **Figura 24** è riportata la tipica applicazione circuitale dell'integrato, così come suggerita dal suo datasheet.

Le uscite 6, 8, 9 ed 11 sono quelle da connettere, ordinatamente, agli avvolgimenti per cui adotteremo un motore passo-passo a quattro fasi con 8 morsetti, di cui quattro andranno connessi comunemente alla tensione di alimentazione, oppure adotteremo un motore unipolare con cinque fili in uscita (centrali in comune) il cui centrale è da collegare all'alimentazione oppure ancora un motore a sei fili con i due centrali connessi in comune e collegati all'alimentazione in modo da ricadere nel precedente caso. Il piedino 15 (step Input-Count) è quello di comando e che quindi riceve a tutti gli effetti il clock. Su questo piedino va connesso il generatore di clock (mediante la variazione della frequenza di clock sarà possibile variare la velocità di rotazione del motore). Il verso di rotazione impresso è definito invece dallo stato logico im-

posto sul pin 3 (Mode-Direction). Si rimanda allo studio diretto del datasheet per maggiori dettagli ed approfondimenti.

DIMENSIONAMENTO DEI MOTORI PASSO-PASSO

La scelta di un motore passo-passo, quando si progetta una macchina il cui funzionamento risulta basato su questo tipo di motori, è una operazione piuttosto delicata. Il parametro più importante che occorre valutare preventivamente è sicuramente la coppia richiesta. Occorre allora valutare la coppia di mantenimento (holding torque) che il motore può sviluppare quando è fermo in una determinata posizione. È opportuno poi considerare la coppia di esercizio (pull-out) del motore tenendo conto del fatto che quest'ultima non è unica ma è rappresentata da una curva funzione del numero di passi al secondo (step rate o frequenza di step) e decrescente al crescere del valore di frequenza di passo. Questo significa, evidentemente, che quanto più elevata è la velocità di rotazione richiesta tanto più bisognerà scegliere un motore con coppia di mantenimento elevata. La determinazione delle coppie richieste dipende, inoltre, dal particolare sistema di trasmissione del moto che si impiega (accoppiamento diretto, ad ingranaggi, a pulegge e cinghia, ecc.). Va poi tenuto in conto l'inerzia del sistema cioè la tendenza che l'intero sistema meccanico, trascinato dall'asse del motore, ha nel resistere ad una accelerazione angolare. Il momento di inerzia del sistema moltiplicata per l'accelerazione angolare voluta fornisce la coppia di accelerazione necessaria e costituisce un ulteriore dato utile alla scelta del motore passo-passo.

PER approfondire...

- *Macchine elettriche II Ed.-Cap. 17 (Motori a commutazione elettronica)-M. Pezzi-Zanichelli Editore;*
- *Datasheet di motori passo passo dai siti web di diversi costruttori (Crouzet, Hurst manufacturing, Johnson Electric, McLennan Servo Supplies, Philips) e fornitori (RS Components);*
- *www.robot-italy.com;*
- *L297 Stepper Motor Controllers (<http://www.st.com>);*
- *AN470 Application Note The L297 Stepper Motor Controller (<http://www.st.com>);*
- *L298 Dual Full-bridge Driver (<http://www.st.com>);*
- *Stepper Motor Driver IC SAA 1027 (RS Components)*
- *SAA 1027 Stepper Motor Drive Circuit (<http://www.datasheetcatalog.com/>)*

PILOTAGGIO IN MICROSTEPPING

Ne precedenti paragrafi si è parlato sia del controllo full-step che di quello half-step. Così come è possibile ottenere un spostamento a mezzo step attraverso il pilotaggio contemporaneo di due fasi, con correnti di uguale valore e versi opportuni, è anche possibile ottenere passi intermedi alimentando in contemporanea due fasi con correnti ridotte di differente valore. In altre parole è possibile ottenere una serie ampia di posizioni intermedie tra due step inviando due correnti di diverso modulo nelle due fasi: il rotore si posizionerà tanto più vicino ad una posizione di equilibrio principale quanto maggiore sarà la corrente nella fase corrispondente e tanto più vicino all'altra quanto maggiore è la corrente nell'altra. Ancora una volta il caso estremo è quello in cui la corrente assume valore massimo in una fase e nullo nell'altra. Ovviamente, come è logico attendersi, anche il circuito di controllo si complica se deve implementare un pilotaggio di tipo microstepping.

CONCLUSIONI

Con questo secondo articolo dedicato ai motori passo-passo si chiude la trattazione sia teorica che pratica dell'argomento. Quanto esposto è sufficiente ad apprendere in maniera semplice ma anche organico e completo cosa siano i motori passo-passo, quali siano le problematiche legate al loro impiego ed in che modo è possibile pilotarli. Sui datasheet degli integrati step controller proposti in questo secondo articolo e sui siti dei costruttori (**Tabella 4**) è tuttavia possibile trovare facilmente ulteriori dettagli e materiale per approfondire l'argomento.