



# *I motori passo-passo: un tutorial*

[Home page](#) - [Sommario](#) - [Tutorial](#) - [Progetti](#) - [Link](#) - [Non solo elettronica](#) - [Chi sono](#)

---

I motori passo-passo, spesso chiamati anche step o stepper, sono caratterizzati nel panorama dei motori elettrici da una serie di particolarità che ne fanno la scelta (quasi) ideale per tutte quelle applicazioni che richiedono precisione nello spostamento angolare e nella velocità di rotazione, quali la robotica ed i servomeccanismi in genere. In questo tutorial presento le loro caratteristiche principali e le tecniche per utilizzarli.

---

I motori passo-passo: un tutorial - Versione 2.1a - Giugno 2001  
Copyright © 2001, Vincenzo Villa

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.1 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, with no Front-Cover Texts and with no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "[GNU Free Documentation License](#)".

---

I **vantaggi** dei motori passo passo:

- E' possibile realizzare azionamenti di precisione controllati da computer in catena aperta, cioè senza utilizzare sensori di posizione o di velocità. Sono quindi utilizzabili con relativa semplicità e senza richiedere particolare potenza di calcolo.
- Hanno un'elevata robustezza meccanica ed elettrica: infatti non esistono contatti elettrici striscianti e, se necessario, possono essere realizzati anche in esecuzione completamente stagna.
- E' facile far compiere all'albero piccole rotazioni angolari arbitrarie in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.
- La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.

Ovviamente hanno anche **difetti**:

- Richiedono sempre circuiti elettronici per il pilotaggio, in genere di tipo digitale.
- Hanno un funzionamento a scatti e con forti vibrazioni, soprattutto ai bassi regimi e se si adottano le tecniche di pilotaggio più semplici.
- Il loro rendimento energetico è basso e, in genere, la potenza meccanica è piccola.
- Hanno un costo elevato, relativamente ad altri tipi di motore con analoghe prestazioni.
- Difficilmente raggiungono velocità di rotazione elevate.

Solo ultimamente e solo per le applicazioni high-end sono stati sostituiti da motori brushless o da attuatori voice-coil ma le complicazioni costruttive e la difficile reperibilità rendono a volte queste opzioni poco praticabili per l'hobbista.



I motori passo-passo sono motori che, a differenza di tutti gli altri, hanno come scopo quello di mantenere fermo l'albero in una posizione di equilibrio: se alimentati si limitano infatti a bloccarsi in una ben precisa posizione angolare.

Solo indirettamente è possibile ottenerne la rotazione: occorre inviare al motore una serie di impulsi di corrente, secondo un'opportuna sequenza, in modo tale da far spostare, per scatti successivi, la posizione di equilibrio.

E' così possibile far ruotare l'albero nella posizione e alla velocità voluta semplicemente contando gli impulsi ed impostando la loro frequenza, visto che le posizioni di equilibrio dell'albero sono determinate meccanicamente con estrema precisione.

## La costruzione elettromeccanica

I motori passo-passo si dividono tradizionalmente in tre grandi gruppi: motori a magnete permanente, motori a riluttanza variabile e motori ibridi; questi ultimi sono i migliori. In realtà la quasi totalità di quelli oggi reperibili (sia sul mercato dell'usato che tra i materiali nuovi) sono proprio del terzo tipo, per cui mi limiterò a descrivere brevemente la struttura di questi ultimi.

Occorre dire che, dal punto di vista dell'utilizzatore hobbistico, non esistono praticamente differenze d'uso tra i tre tipi, soprattutto tenendo conto che si è nell'impossibilità pratica di reperire tutte le caratteristiche elettromeccaniche dei motori che già si possiedono. Cambiano invece le prestazioni ma per chi recupera materiale di scarto questo è un problema secondario.

Un motore ibrido è costituito da un rotore e da uno statore; nella fotografia seguente riporto un esemplare non particolarmente recente ma in cui si vede chiaramente la struttura.



Il rotore appare come una coppia di ruote dentate affiancate e solidali all'albero (i "denti" sono chiamati coppette) costituite da un nucleo magnetico (le due ruote sono permanentemente magnetizzate, una come NORD, l'altra come SUD) e le coppette in materiale ferromagnetico. Il numero di denti è variabile ma 50 è in assoluto il più frequente. Tra le due ruote è presente uno sfasamento esattamente pari ad  $1/2$  del passo dei denti: il dente di una delle due sezioni corrisponde quindi alla valle dell'altra. Nel rotore non sono presenti fili elettrici e quindi manca completamente ogni connessione elettrica tra la parte in movimento e quella fissa. In genere il rotore è montato su cuscinetti a sfera, anche nei modelli economici.

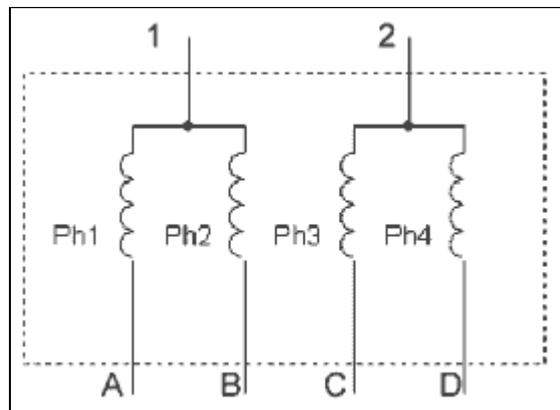
Lo statore appare come il classico insieme di avvolgimenti ed il circuito magnetico è costituito da 4 o, più frequentemente, 8 "espansioni polari" (otto in quello mostrato fotografia). All'interno dello statore sono presenti piccoli denti che si affacciano esattamente a quelli del rotore. O meglio, sono esattamente affacciati al rotore solo il gruppo di denti appartenenti ad una espansione polare e a quella opposta; le altre coppie sono sfalsate rispettivamente di  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  del passo dei denti. Avvolti intorno ai poli magnetici dello statore ci sono i fili che, opportunamente percorsi da corrente, generano il campo magnetico.

All'esterno sono evidentemente presenti le alimentazioni dei vari avvolgimenti; in pratica le fasi possono

essere avvolte secondo due schemi:

- Sono presenti due soli avvolgimenti (avvolti su più espansioni polari) e quindi all'esterno arrivano due sole coppie di fili: in questo caso si parla di motori bipolari in quanto la corrente dovrà percorrere le fasi nei due versi al fine di creare gli opportuni campi magnetici.
- Sono presenti quattro avvolgimenti avvolti a coppie, in antiparallelo, sulle espansioni polari; all'esterno arrivano almeno cinque fili (spesso sono infatti presenti delle connessioni interne al motore tra le varie fasi). Si parla in questo caso di motori unipolari in quanto la corrente nella singola fase ha sempre lo stesso verso. E' possibile creare due campi magnetici opposti semplicemente scegliendo in quale dei fili debba passare la corrente.

Una tipologia particolare di motore passo-passo è utilizzabile sia in configurazione unipolare che bipolare: si tratta di quelli a 6 fili. Nella figura seguente questo tipo di motore l'ho schematizzato con i quattro induttori racchiusi nel rettangolo tratteggiato, senza indicare esplicitamente anche la resistenza equivalente, comunque presente.



I due avvolgimenti Ph1 e Ph2 sono avvolti sullo stesso nucleo in modo tale che la corrente entrante dal terminale 1 crea due campi magnetici opposti a seconda che il terminale di uscita sia A oppure B. In questo caso abbiamo uno schema equivalente ad un motore unipolare.

Se invece la corrente entra da A ed esce da B si crea un campo magnetico opposto al caso in cui la corrente entra da B ed esce da A; in questo caso, dal terminale 1 non passa corrente ed abbiamo un funzionamento come motore bipolare (ed infatti sono usati solo 4 fili: i terminali 1 e 2 non devono essere connessi).

La stessa cosa succede per Ph3 e Ph4.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per i rari motori a 8 fili.

Per distinguere i due tipi di motore, per i quali sono richieste tecniche di pilotaggio molto diverse, basta ovviamente contare i fili uscenti: se sono 4 abbiamo un motore bipolare, se sono 5 un unipolare, se sono 6 o 8 possiamo scegliere il tipo di pilotaggio più opportuno.

Il numero di differenti posizioni di equilibrio presenti in una rotazione completa dell'albero è in genere indicato come passi per giro e dipende del numero dei denti del rotore e dai poli dello statore, non dal numero di fili uscenti o dal numero delle fasi. Questo numero è spesso stampata sul contenitore. In alternativa, a motore non alimentato, è possibile far ruotare lentamente e con molta delicatezza il rotore e contare il numero di "click" necessari per compiere un giro, possibilmente aiutandosi con una tacca di riferimento sull'albero per individuare la fine di un giro. Valori normali sono 16 (solo i motori più vecchi), 100, 200 "click" per giro, numeri che hanno tutti la proprietà di essere divisibile per quattro.

Con "intenti didattici" molti testi presentano disegni che erroneamente legano il numero di passi al numero delle fasi, creando non poche confusioni a chi inizia. In realtà le fasi sono sempre due o quattro, indipendentemente dal numero degli step per giro.

## *L'elettronica di pilotaggio*

Come ho già detto, per il funzionamento del motore passo-passo è necessario applicare in opportuna sequenza e verso impulsi di corrente attraverso l'uso di interruttori elettronici.

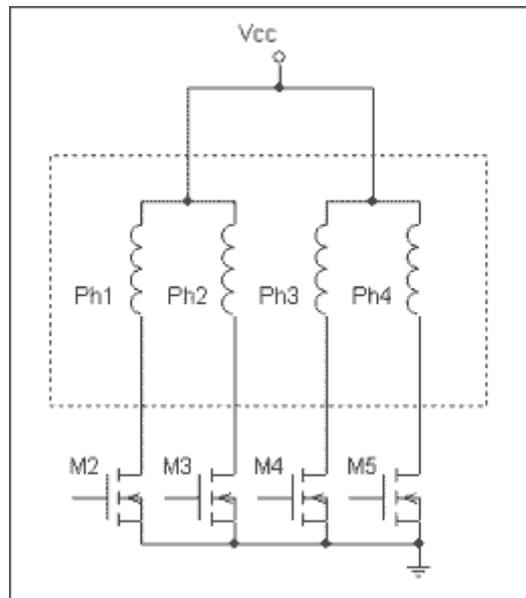
Per ciascuno dei tipi di motore (unipolare o bipolare) esiste uno specifico schema di funzionamento.

## Il pilotaggio dei motori unipolari

I motori unipolari sono piuttosto facili da pilotare, perlomeno se sono richieste basse prestazioni, in quanto è sufficiente usare quattro interruttori opportunamente connessi in modo da far passare la corrente nelle fasi secondo l'ordine corretto.

Il fatto di avere quattro avvolgimenti lo rende però un motore con uno scarso rapporto peso/potenza ed in definitiva adatto solo per le applicazioni più semplici.

Come ho già detto le fasi sono in parte internamente collegate e ciò fa sì che i fili uscenti in genere non sono 8 (due per fase) ma 5 o 6.



Qui sopra ho rappresentato lo schema del collegamento elettrico di un motore unipolare; nel caso rappresentato ho usato un motore a 6 fili ma se fossero solo cinque, semplicemente significa che la connessione che nello schema ho fatto esternamente in corrispondenza della tensione di alimentazione è interna al motore. Se fossero otto significa che esce una coppia di fili per ciascuna fase e che quindi tutti i collegamenti devono essere effettuati esternamente.

Senza alimentazione il motore ruota liberamente anche se, provando a far girare l'albero a mano, si sente un certo funzionamento a scatti.

Facendo passare corrente in una sola delle fasi il motore rimane bloccato in una posizione di equilibrio: in questo modo il motore offre una notevole coppia che si oppone a qualunque spostamento. La rotazione è ottenuta cambiando in opportuna sequenza la fase (o le fasi) a cui la corrente è applicata; la corrente che deve attraversare una fase è costante sia in modulo che in verso e viene indicata come corrente nominale. In genere è indicata sul contenitore del motore (in alternativa possiamo trovare la resistenza degli avvolgimenti e la tensione di alimentazione).

La sequenza con cui la corrente è applicata alle fasi può essere di vari tipi diversi:

**Wavemode:** è il sistema base di funzionamento; con esso la corrente è applicata ad una sola delle fasi alla volta, secondo la tabella seguente (Ph indica ciascuna delle quattro fasi, I indica la corrente nominale in ciascuna fase, 0 indica l'assenza di corrente).

Spesso la fase in cui scorre corrente è indicata come "energizzata".

Passo	Ph1	Ph3	Ph2	Ph4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Questo metodo è a volte chiamato anche One-phase-on full step per evidenziare il fatto che una sola fase alla volta è energizzata e che la distanza tra passi successivi è pari a quanto indicato sui dati di targa del motore.

Da notare che, nelle tabelle, le fasi non sono elencate in ordine numerico: la cosa ha però solo un interesse speculativo in quanto difficilmente si conosce la corrispondenza tra numero della fase e fili effettivamente uscenti.

Per ottenere la rotazione del motore è necessario scorrere le righe della tabella, cambiando la fase in cui la corrente scorre.

E' necessario tener presente che la tabella deve essere vista come circolare: dopo l'ultima riga, ritroviamo infatti la prima.

**Two phase-on:** la corrente è applicata contemporaneamente a due fasi. In questo modo il rotore è trattenuto in posizioni di equilibrio intermedie a quelle tipiche del funzionamento wavemode.

La coppia disponibile è circa 1,4 volte maggiore di quella ottenuta con una sola fase attiva alla volta: le due forze applicate contemporaneamente possono essere infatti viste come tra loro perpendicolari e, per chi ricorda qualcosa di trigonometria, non è difficile comprendere da dove nasce quel "radice di due".

Il consumo di corrente e quindi il riscaldamento raddoppiano. Questo fatto potrebbe creare problemi in alcuni motori non adatti a questo tipo di pilotaggio.

Passo	Ph1	Ph3	Ph2	Ph4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

**Half-step:** è in pratica l'alternarsi delle configurazioni dei due metodi appena visti e si basa sulla constatazione che tra le posizioni di equilibrio dello due sequenze precedentemente viste è presente uno sfasamento di esattamente mezzo passo.

Passo	Ph1	Ph3	Ph2	Ph4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Il vantaggio è che raddoppia il numero di passi disponibile per un certo motore. Lo svantaggio è una discreta irregolarità nella coppia (che per ogni passo cambia da 1 a 1.4 o viceversa) e nel consumo di potenza (che, sempre per ogni passo, cambia da 1 a 2), ambedue mediamente intermedi rispetto agli altri due metodi.

Questo metodo è spesso indicato come half-step senza controllo di coppia per sottolineare come la coppia meccanica sia variabile.

In alternativa è possibile adottare tecniche capaci di rendere omogenea la coppia ma, per i motori unipolari, questa non è una scelta conveniente a causa della complessità del circuito da realizzare in rapporto agli effetti utili; è invece una via praticabile per i motori bipolari e quindi ne parlerò solo nel paragrafo successivo.

Le sequenze indicate nelle precedenti tre tabelle sono relative alla rotazione del motore in un verso: applicando continuamente la sequenze 1-2-3-4-1-2... si ottiene la rotazione dell'albero in un verso; per invertire il senso di rotazione basta invertire l'ordine con il quale sono lette le righe delle tabelle: 4-3-2-1-4... (non va quindi cambiato il verso delle correnti, che rimane invariato).

Da notare che non esiste nessuna corrispondenza tra il numero delle righe delle tabelle sopra riportate ed il numero di posizioni angolari che il motore assume: in genere è necessario "scorrere" molte volte la tabella per ottenere la rotazione dell'albero di un giro. Per esempio in un motore con quattro fasi e 200 passi/giro è necessario applicare per 200 volte (400 volte per l'half-step) gli impulsi di corrente per ottenere la rotazione di un giro dell'albero: in pratica occorre scorrere 50 volte la tabella.

Purtroppo, malgrado qualche tentativo di standardizzazione, esiste una forte anarchia nell'assegnazione dei colori ai vari fili che escono da un motore passo-passo: l'unica soluzione è quella di misurare la resistenza degli avvolgimenti (le fasi sono tra loro identiche e presentano quindi esattamente la stessa resistenza, in genere da pochi a poche decine di ohm) e quindi collegare i fili all'elettronica di pilotaggio in base a quest'unica informazione: pur essendo tante le combinazioni possibili, metà di queste funzionano correttamente (o meglio: nel 25% dei casi il motore ruota in un verso, in un altro 25% nel verso opposto, nel 50% dei casi non ruota ma vibra con piccoli movimenti angolari). Nel caso di errore di connessione basta invertire i collegamenti di una sola coppia di fili.

Il circuito necessario per il pilotaggio è piuttosto semplice: sopra ho già riportato uno schema di principio in cui sono usati come interruttori quattro MOS. Attenzione però: non utilizzarlo in quanto, così come è, danneggerebbe i transistor, come di seguito spiegato.

## Il pilotaggio dei motori bipolari

I motori bipolari sono caratterizzati dall'aver solo quattro fili di connessione. Una categoria particolare è costituita dai motori unipolari a sei fili: è infatti sufficiente in questi motori non collegare la coppia di fili comuni tra due fasi per ottenere un motore bipolare, anche se in genere con caratteristiche peggiori di quelli che "nascono bipolari".

Per questi motori il pilotaggio è più complesso che per quelli unipolari: infatti la corrente deve attraversare gli avvolgimenti nei due versi e questo rende piuttosto complesso il circuito di pilotaggio. Il vantaggio deriva dal fatto che, essendo le fasi due anziché quattro, a parità di potenza del motore, il peso e la dimensione sono minori in quanto è necessario usare una minor quantità di rame. Inoltre, usando appositi schemi, è possibile ottenere circuiti di pilotaggio più efficienti in termini di consumo energetico e velocità di rotazione ottenibile.

Infine si rende possibile introdurre nuove modalità di pilotaggio senza appesantire in modo sostanziale le difficoltà di progettazione dell'elettronica di potenza.

Anche nel pilotaggio bipolare sono possibili diverse modalità:

**WaveMode:** una sola fase alla volta è attiva. Da notare che le condizioni di funzionamento per ciascuna fase sono tre: corrente in un verso, corrente nell'altro verso, assenza di corrente (situazioni indicate rispettivamente con I, -I e 0 nella tabella).

Passo	Ph1	Ph2
1	I	0
2	0	I
3	-I	0
4	0	-I

**Two phase-on:** la corrente è sempre presente nelle due fasi ma cambia verso. Ho già descritto nel paragrafo dedicato ai motori unipolari gli effetti sulla coppia (che aumenta di 1.4 volte) e la corrente assorbita (che raddoppia).

Passo	Ph1	Ph2
1	I	I
2	-I	I
3	-I	-I
4	I	-I

**Half-step senza controllo di coppia:** è l'insieme dei due metodi precedenti, con l'effetto principale di ottenere il raddoppio del numero dei passi. Ho già descritto gli effetti sulla coppia e la corrente assorbita.

Passo	Ph1	Ph2
1	I	0
2	I	I
3	0	I
4	-I	I
5	-I	0
6	-I	-I
7	0	-I
8	I	-I

**Half-step con controllo di coppia:** parlando della tecnica di pilotaggio a mezzo passo ho accennato al fatto che, quando la corrente scorre in due fasi contemporaneamente la coppia è maggiore di quando la fase energizzata è una sola. Il problema è risolvibile riducendo la corrente che passa nelle due fasi ad un valore tale che la coppia rimanga costante. Chi ha voglia di pensarci un po' su, scoprirà che tale corrente va ridotta a 0,707 volte quella nominale.

La tabella che ne nasce è quella che riporto di seguito, dove I rappresenta la corrente nominale.

Passo	Ph1	Ph2
1	I	0
2	0,707*I	0,707*I
3	0	I
4	-0,707*I	0,707*I
5	-I	0
6	-0,707*I	0,707*I

7	0	-1
8	0,707*I	0,707*I

Se si vuole adottare questo schema di pilotaggio occorre aggiungere alla difficoltà di invertire il verso della corrente anche quella di doverne regolare il modulo. Usando le stesse tecniche normalmente necessarie per pilotare con efficienza un motore bipolare e descritte in seguito, questo problema non è insormontabile. Sarebbe invece un grosso problema per i motori unipolari, in quanto usati soprattutto quando l'obiettivo principale è la semplificazione dell'elettronica, anche a scapito delle prestazioni.

Da notare infine che permane il problema dell'irregolarità di assorbimento di corrente ma gli effetti negativi di questo fenomeno sono in genere poco rilevanti e comunque minori che nel caso di non controllo della coppia (la corrente varia da 1 a 1.4 anziché da 1 a 2).

**Il microstepping:** un'evoluzione del metodo di pilotaggio half-step con controllo di coppia è basato sulla considerazione che, così come posso ottenere un passo intermedio alimentando in contemporanea due fasi, posso ottenere una serie ampia a piacere di posizioni intermedie inviando due correnti di diverso modulo nelle due fasi adiacenti: il rotore si posizionerà tanto più vicino ad una posizione di equilibri tanto maggiore sarà la corrente nella fase corrispondente rispetto a quella dell'altra.

In pratica le correnti assumono un andamento che tende ad approssimare quello sinusoidale, con uno sfasamento di 90° tra le due fasi. Ciò fa assomigliare il funzionamento del motore passo-passo a quello di un motore sincro a due fasi, che in effetti è suo stretto parente.

Di seguito la tabella necessaria per quadruplicare il numero di passi, ampliabile a piacere semplicemente tenendo presente che la corrente assume il valore massimo in una fase quando nell'altra è zero e che la somma dei quadrati dei coefficienti delle due correnti deve sempre essere uno (in pratica una senoide ed una cosenoide...).

Passo	Ph1	Ph2
1	1	0
2	0.924*I	0.383*I
3	0.707*I	0.707*I
4	0.383*I	0.924*I
5	0	1
6	-0.383*I	0.924*I
7	-0.707*I	0.707*I
8	-0.924*I	0.383*I
9	-1	0
10	-0.924*I	-0.383*I
11	-0.707*I	-0.707*I
12	-0.383*I	-0.924*I
13	0	-1
14	0.383*I	-0.924*I
15	0.707*I	-0.707*I
16	0.924*I	-0.383*I

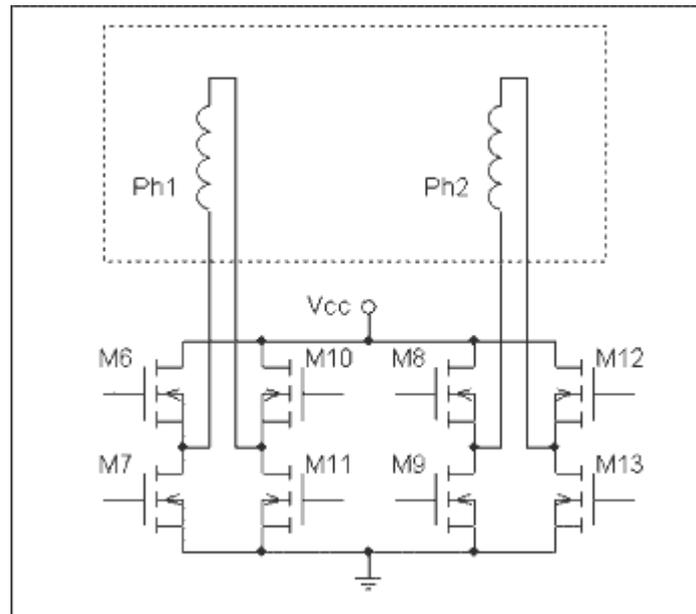
Per regolare la corrente serve una notevole dose di "intelligenza" all'elettronica di pilotaggio in quanto è necessario inviare invece di una semplice onda quadra un segnale sinusoidale variabile in fase e frequenza: in pratica applicazioni concrete possono essere fatte solo con un processore dedicato oppure,

recentemente, con appositi circuiti integrati.

Il vantaggio, accanto al possibile enorme aumento del numero di posizioni dell'albero (cosa peraltro più teorica che pratica in quanto occorrerebbe realizzare una meccanica molto precisa e quindi costosa), consiste nell'eliminazione praticamente totale del funzionamento a scatti, uno dei difetti più importanti di questo tipo di motore nelle applicazioni di precisione.

Anche in un motore bipolare, per invertire il senso di rotazione è necessario invertire l'ordine di applicazione della sequenza scorrendo la tabella da basso in alto.

Il circuito di pilotaggio è più complesso di quello unipolare in quanto è necessario fornire anche l'inversione del verso della corrente, normalmente attraverso il cosiddetto "ponte ad H": non solo servono il doppio dei transistor di potenza ma metà di questi hanno l'emettitore o il source non connesso a massa, con qualche complicazione nell'adattamento delle tensioni di pilotaggio.



Facendo riferimento allo schema sopra riportato, per far passare corrente in una fase devono essere attivate contemporaneamente le coppie di transistor in diagonale (per esempio M6 ed M11 per il passaggio della corrente in un verso, M7 e M10 per il passaggio nell'altro verso).

Occorre evitare nel modo più assoluto la contemporanea conduzione dei transistor sullo stesso lato (per esempio M6 e M7): infatti si creerebbe un cortocircuito con possibile distruzione dei transistor o dell'alimentatore.

Anche in questo caso lo schema è solo di principio.

Ovviamente ulteriori complicazioni insorgono se si vuole utilizzare la tecnica di pilotaggio microstepping o a mezzo passo con controllo di coppia in quanto occorrerebbe perlomeno prevedere una resistenza per la misura della corrente.

Anche per questi motori l'individuazione dei fili corrispondenti alle varie fasi va fatta con l'ausilio di un tester e provando quindi, a caso, una delle combinazioni compatibili con le resistenze misurate.

## La logica di pilotaggio

Osservando le tabelle riportate si vede come, per far ruotare un motore passo-passo, sia necessario generare un'opportuna sequenza di segnali logici. Questo può essere ottenuto in vari modi:

- Attraverso un circuito integrato specializzato. In genere è il sistema più utilizzato. Per il controllo sono in teoria necessari due soli segnali: uno per la direzione (indicato con le sigle CW e CCW, cioè orario ed antiorario, corrispondenti allo scorrimento della tabella dall'alto in basso o viceversa) ed un clock che, per ciascun impulso, fa ruotare il motore di un passo nella direzione voluta, cioè scorre

una riga della tabella. In genere sono disponibili altri pin ausiliari: scelta del funzionamento wave-mode, dual-phase o half-step, spegnimento di tutte le fasi, varie uscite di controllo utili per verificare lo stato del motore (eccessiva temperatura, cortocircuito, bassa tensione di alimentazione...).

Classici integrati di questo tipo, ancora ampiamente utilizzati anche se tecnicamente superati, sono SAA1027 per motori unipolari e L297 per motori bipolari.

- Attraverso circuiti digitali generici. Una scelta raramente opportuna, a meno di avere necessità particolarmente semplici (ad esempio serve la rotazione in un solo verso) oppure di disporre di integrati digitali programmabili.
- Attraverso il pilotaggio diretto da parte di un processore. Utile per risparmiare sul numero dei componenti, anche a scapito dell'efficienza computazionale.

Sul mercato sono disponibili anche schede molto complesse per la gestione dei motori passo-passo, con cui basta semplicemente impostare i parametri di un intero profilo, scrivendo comandi in alcuni registri oppure attraverso un linguaggio di programmazione ad alto livello. Ma difficilmente sono accessibili all'hobbista.

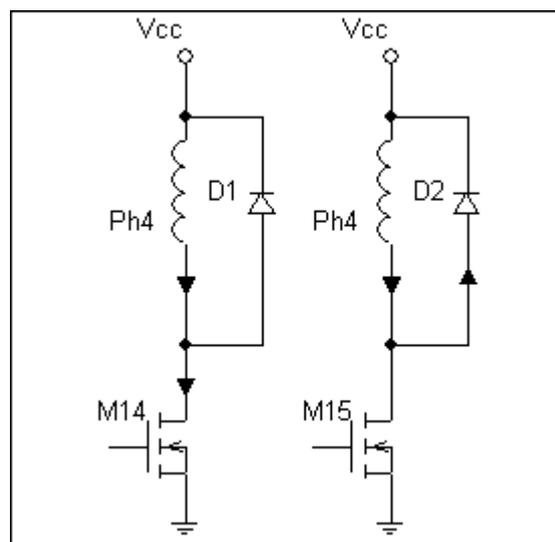
## Il diodo di ricircolo

Come ho detto più sopra i circuiti di pilotaggio che ho disegnato sono solo di principio: infatti quando si pilotano carichi induttivi è sempre necessario inserire il cosiddetto "diodo di ricircolo", pena la repentina distruzione del transistor di potenza a causa delle tensioni elevate generate da motore.

Vediamo di spiegarne il motivo.

Ciascun avvolgimento del motore passo-passo è sostanzialmente in induttore, cioè un oggetto che tende a mantenere costante la corrente che in esso scorre. Quando un transistor si apre, la corrente istantaneamente dovrebbe andare a zero; l'induttore tende però ad impedire questa repentina diminuzione e per fare questo tende a far salire la tensione sul collettore del transistor (immaginate il transistor che, improvvisamente, sia diventato una resistenza molto elevata in cui l'induttore tenta di far passare una corrente elevata: per la legge di ohm, la tensione deve salire). La tensione arriva facilmente a centinaia di volt, danneggiando il transistor stesso. Tale tensione è spesso chiamata "di fly-back".

Per evitare questo fenomeno distruttivo viene inserito in parallelo alla bobina del motore un diodo che fornisce alla corrente una via alternativa a quella del transistor nel momento in cui questo si apre.



Il catodo va connesso alla tensione di alimentazione: in pratica la corrente va "in salita". Nello schema è rappresentata a sinistra la situazione in cui il transistor è in conduzione (la corrente attraversa l'avvolgimento del motore ed il transistor; nel diodo non passa corrente in quanto polarizzato inversamente). A destra invece l'andamento della corrente subito dopo l'apertura del transistor: la stessa corrente che prima attraversava il transistor ora passa nel diodo.

Ovviamente quest'ultima situazione si esaurisce abbastanza rapidamente, mancando generatori in grado di mantenere nel tempo il passaggio di corrente.

I diodi da utilizzare devono avere due caratteristiche fondamentali:

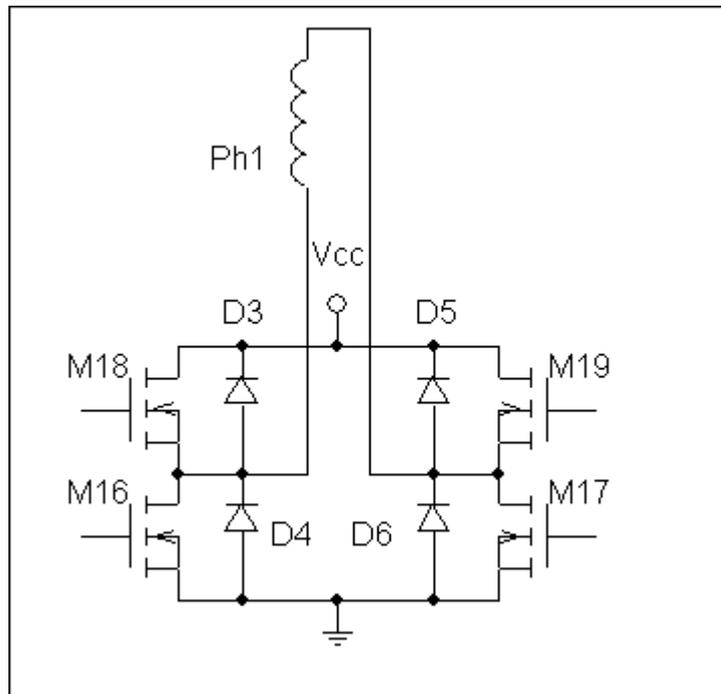
- Essere veloci, cioè essere capaci di passare in poco tempo dalla condizione di non passaggio di corrente a quella di conduzione e viceversa. In genere sono richiesti tempi di intervento dell'ordine dei 100 ns o anche meno. Per questo motivo non sono adatti per esempio i comuni 1N4001, troppo lenti.
- Essere capaci di gestire correnti elevate in quanto al momento dello spegnimento tutta la corrente del motore passa nei diodi, ed in genere si tratta di ampere. Per questo motivo non sono adatti per esempio i comuni 1N4148, che sopportano correnti dell'ordine dei 100 mA.

Per l'hobbista non è sempre facile recuperare diodi adatti ma, nel caso, meglio un 1N4001 che nulla.

Una soluzione alternativa consiste nell'utilizzo di diodi zener tra collettore ed emettitore del transistor, con l'anodo connesso a massa: pur essendo migliore da molti punti di vista (maggiore velocità di intervento, migliore dissipazione di potenza), questa soluzione richiede dispositivi capaci di gestire elevate correnti alla tensione di alimentazione del motore.

Con un motore medio da 1A per fase e 12 V di alimentazione occorrono per esempio quattro zener da 15V ( $> 12V$ ) capaci di gestire picchi di potenza da 15W ( $> 1 * 15$ ).

In realtà questo ragionamento è piuttosto conservativo: il diodo deve solo permettere la dissipazione dell'energia magnetica immagazzinata nelle fasi mentre io ho fatto il ragionamento sulla potenza/corrente di picco. Considerazioni di buon senso possono ridurre tale valore alla metà o anche meno se il motore viene fatto girare lentamente; occorre però che il diodo o lo zener possa sopportare il picco di corrente per il tempo necessario alla scarica.



I diodi di ricircolo sono necessari anche nella connessione con ponte ad H, come rappresentato qui sopra. Essi devono permettere il passaggio di corrente "in salita" quando tutti gli interruttori sono aperti.

A volte, utilizzando un ponte ad H, i diodi non sono presenti come componenti discreti ma viene utilizzato il diodo del substrato sempre presente tra collettore ed emettitore (o tra drain e source per i MOS): questa scelta deve essere valutata con grande attenzione in quanto molto spesso tale diodo è troppo lento e quindi inefficace. Se occorre progettare il ponte ad H, potrebbe essere utile verificare questa caratteristica sui fogli tecnici degli switch scelti (quando questa possibilità è prevista è in genere riportata con evidenza).

Un problema legato all'uso dei diodi di ricircolo deriva dal fatto che la corrente che attraversa i diodi "ritorna" (mi si scusi il termine) verso la sorgente di alimentazione, causando a volte un aumento anche considerevole della tensione. In genere l'alimentazione è costituita da un ponte seguito da un

condensatore di filtro: è opportuno che tale C, generosamente dimensionato abbia una tensione di lavoro almeno doppia di quella fornita dal ponte. In genere non è consigliabile usare, neppure per prova, alimentatori stabilizzati, troppo facili da distruggere in questo modo, anche quando protetti.

## Il problema della massima velocità di rotazione

Come già accennato ciascun avvolgimento è sostanzialmente equivalente dal punto di vista elettrico ad un induttore in serie ad un resistore.

Il problema sorge dal fatto che in un motore passo-passo in rotazione la corrente deve passare continuamente da un valore zero al valore nominale; se il motore deve ruotare velocemente, queste commutazioni devono ovviamente essere rapide. Purtroppo la velocità di commutazione è limitata dalla costante di tempo (indicata dalla lettera greca Tau) del circuito R-L costituito dall'avvolgimento stesso.

Due parole di teoria della carica e scarica degli induttori: un induttore tende a mantenere costante la corrente che scorre in esso. Applicando una tensione a gradino ad un induttore la corrente aumenta secondo una curva esponenziale la cui durata dipende dalla costante di tempo tau:

$$\tau = \frac{L_a}{R_a}$$

dove  $L_a$  è l'induttanza (in henry) ed  $R_a$  la resistenza (in ohm) equivalente dell'avvolgimento. In genere non è possibile agire su  $L_a$  per diminuire tale tempo in quanto dipende da come il motore è costruito.

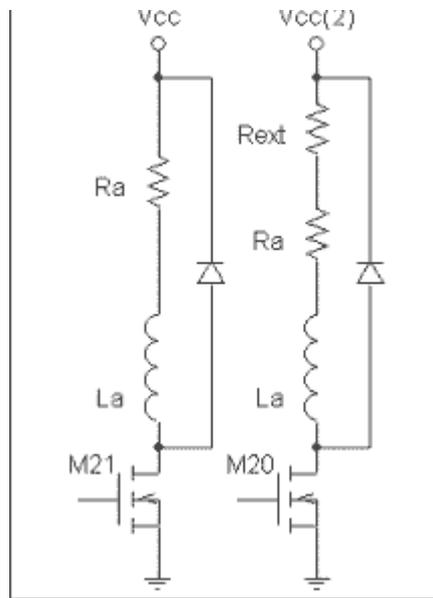
Come per tutti i motori elettrici, la coppia meccanica disponibile è proporzionale alla corrente che attraversa gli avvolgimenti. Questo significa che durante la carica dell'induttore che costituisce una fase (cioè ogni volta che ci si sposta lungo le righe delle tabelle sopra presentate) non tutta la coppia teorica del motore è subito disponibile. O anche che, quando la corrente deve andare a zero, in realtà ci va lentamente, tentando di "frenare" il motore.

Un effetto è che quando la velocità di rotazione del motore aumenta l'assorbimento di corrente e la coppia meccanica disponibile diminuiscono. Ciò limita la massima velocità di rotazione a valori piuttosto piccoli, soprattutto nei motori ad elevato numero di passi/giro.

Esistono diverse tecniche per ridurre il tempo di commutazione e quindi aumentare la velocità di rotazione: aumentare la resistenza, usare il pilotaggio chopper oppure usare una doppia tensione di alimentazione. Delle tre tecniche la prima è la più usata per i motori unipolari ed è piuttosto semplice da realizzare anche se inefficiente dal punto di vista energetico; la seconda soluzione è spesso adottata per i motori bipolari e risulta semplice da realizzare solo a condizione di usare integrati specializzati.

### Aumentare la resistenza

Osservando la relazione sopra riportata si vede come, per diminuire la Tau, basti aumentare la  $R_a$ : la resistenza da utilizzare nella formula del tempo di carica è quella dell'avvolgimento sommata ad una eventuale resistenza esterna da porre in serie all'avvolgimento stesso.



Si considerino infatti i due schemi di pilotaggio riportati nella figura (la differenza è l'inserimento della resistenza  $R_{ext}$ , esterna al motore), confrontando i diagrammi temporali qualitativi delle relative correnti qui sotto riportati.



Nella prima delle due situazioni rappresentate è presente solo l'induttanza  $L_a$  e la resistenza  $R_a$  equivalenti dell'avvolgimento, parametri non modificabili senza costruire un nuovo motore; il tempo necessario perché la corrente arrivi al suo massimo dipende dalla già citata formula:

$$\tau = \frac{L_a}{R_a}$$

Nella figura il tempo necessario è qualitativamente rappresentato in verde; la linea nera rappresenta l'andamento "ideale", cioè il caso in cui, appena il transistor va in conduzione, subito la corrente sale al suo valore massimo. Da notare che la perdita di coppia è legata alla differenza dell'area compresa tra le due curve.

Nel caso in cui venga aggiunta in serie all'avvolgimento una resistenza esterna, il tempo di carica dipende da:

$$\tau = \frac{L_a}{(R_a + R_{ext})}$$

tempo evidentemente minore. Nella figura è rappresentato in rosso l'andamento della corrente nel caso in cui  $R_a = R_{ext}$ : si noti il dimezzamento del tempo necessario per far aumentare la corrente.

Esiste un difetto di questo metodo: per ottenere la stessa corrente sia nel caso di assenza che di presenza del resistenza esterna, devo avere tensioni di alimentazioni diverse. Per esempio, se intendo usare una  $R_{ext}$  pari alla  $R_a$ , devo raddoppiare la tensione di alimentazione, raddoppiando quindi la potenza elettrica da fornire. La potenza in eccesso viene dissipata come calore dai resistori esterni che devono quindi essere opportunamente dimensionati.

Nei grafici ho riportato anche quanto avviene durante la fase di annullamento della corrente: anche in questo caso il tempo deve essere il più breve possibile. Da notare anche la disposizione del diodo di ricircolo nel caso in cui sia presente la Rext: in questo modo la resistenza provvede anche alla dissipazione della potenza accumulata nella fase, rendendo più rapido il passaggio allo stato off.

## Il funzionamento con doppia alimentazione

Questo metodo, applicato ormai raramente con i motori passo-passo, consiste nell'usare due diverse tensioni di alimentazione: una più elevata, da usare nella prima fase al fine di accelerare la salita della corrente (fase di boost), una minore e sufficiente al mantenimento della corrente a regime. Il sistema è piuttosto complesso dal punto di vista dell'elettronica di pilotaggio ed il fatto di richiedere due diverse alimentazioni lo rende poco pratico. Inoltre al momento dello spegnimento, la corrente diminuisce lentamente, con impatti negativi sulle prestazioni.

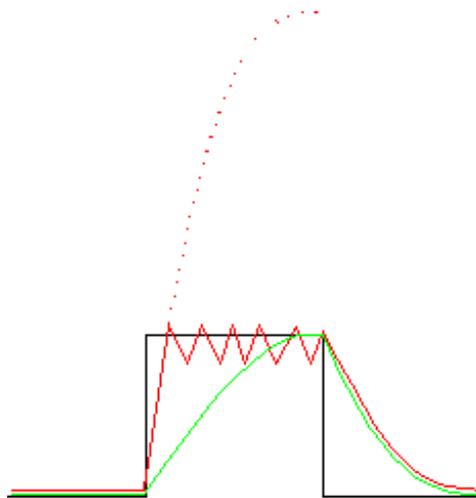
## La regolazione PWM della corrente

Questo metodo di regolazione della corrente è quello più utilizzato per i motori bipolari per le migliori caratteristiche sia a livello di prestazioni che di consumo energetico; la difficoltà nella costruzione dei dispositivi di pilotaggio è superabile anche grazie all'adozione di appositi circuiti integrati che spesso integrano sia la parte di potenza che quella di regolazione della corrente.

Spesso, soprattutto alle frequenze più basse, il metodo è chiamato anche chopper.

L'idea su cui si basa è quella di utilizzare un'alimentazione molto più elevata di quella richiesta dal motore; quando la corrente raggiunge il valore nominale, il transistor viene aperto e quindi la corrente comincia a diminuire, passando attraverso il diodo di ricircolo; dopo un piccolo tempo il transistor viene di nuovo chiuso, la corrente comincia di nuovo ad aumentare ancora fino al raggiungimento della corrente nominale, e così via. Se l'alternarsi delle fasi di apertura/chiusura del transistor sono molto più veloci della velocità con cui le fasi sono eccitate, il valor medio della corrente è praticamente uguale alla corrente nominale.

Il pilotaggio PWM ha due vantaggi: il tempo di salita della corrente è molto elevato (visto che è elevata la tensione di alimentazione) e, durante le fasi di spegnimento del transistor non si ha consumo di corrente.



Nel disegno, l'andamento delle correnti: in nero il comportamento ideale, in verde l'andamento con un semplice transistor (con l'alimentazione adeguata al raggiungimento della corrente nominale), in rosso la corrente con la regolazione PWM (con una tensione di alimentazione tre volte maggiore), in rosso ma tratteggiato l'andamento della corrente nel caso in cui non fosse spento il transistor al raggiungimento della corrente nominale (ovviamente tale corrente sarebbe eccessiva e distruttiva per il motore e il transistor).

Da notare che, utilizzando un pilotaggio PWM con un motore unipolare (caso rappresentato) il tempo di scarica rimane elevato in quanto dipende dalla  $R_a$  e dalla  $L_a$  del motore. Nel funzionamento bipolare, nel quale si richiede non lo spegnimento della fase ma l'inversione del verso della corrente, il sistema è meglio utilizzato in quanto applicabile anche durante questa fase grazie alla presenza del ponte ad H: per

questo motivo il pilotaggio PWM è in assoluto il sistema preferito per questo tipo di motori step.

Come già detto il circuito di pilotaggio è piuttosto complesso: serve infatti una resistenza o un altro dispositivo per misurare la corrente, un comparatore di precisione con opportuni filtri, un oscillatore per generare la frequenza del PWM (oltre ovviamente ai transistor di potenza, che devono essere veloci per ridurre le perdite); in genere si ricorre a circuiti integrati specifici. A titolo di esempio cito la classica coppia L296-L297 della STMicroelectronics, piuttosto vecchia ma ancora in produzione.

Uno svantaggio di questo tipo di pilotaggio è legato al fatto che la corrente subisce veloci cambiamenti: ciò potrebbe causare notevoli perdite a causa dell'isteresi magnetica e conseguente surriscaldamento del motore. In realtà il problema si pone solo per i motori bipolari di vecchia generazione; è comunque opportuno non superare qualche decina di kHz per la frequenza del segnale PWM, anche se si usano transistor molto veloci.

Una piccola osservazione: in questo capitolo ho considerato l'induttanza dell'avvolgimento come una costante. In realtà l'induttanza varia in maniera sostanziale sia in funzione della corrente sia, soprattutto, in funzione della posizione angolare dell'albero. Ovviamente il discorso complessivo non cambia ma occorre tenere presente questo fatto qualora si vogliano fare misure troppo "accurate" dei parametri elettrici di un motore a riposo, misure poi evidentemente non capaci di descrivere adeguatamente i comportamenti osservati durante il funzionamento reale.

## *I cambi di velocità*

Il motore passo-passo soffre di diversi problemi nel momento in cui viene effettuato il cambio di velocità, a causa del suo principio di funzionamento che lo fa assomigliare ad un motore sincrono.

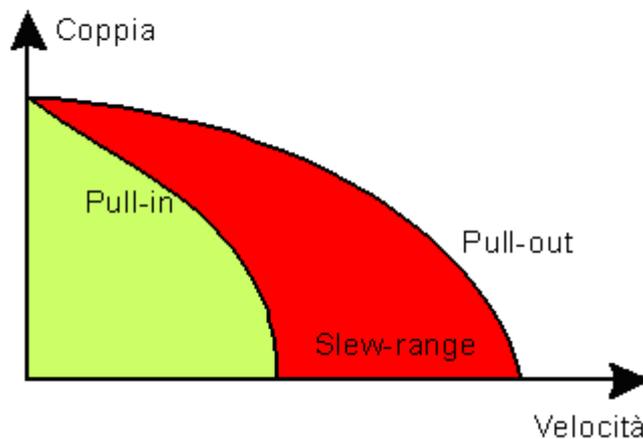
Infatti tutti i dispositivi meccanici, a causa dell'inerzia, non possono subire accelerazioni troppo brusche.

Un classico motore elettrico reagisce alla richiesta di improvviso aumento di velocità con un momentaneo aumento dell'assorbimento di corrente ed un graduale e relativamente lento aumento di velocità. Nel momento in cui improvvisamente cambia la frequenza in ingresso al dispositivo di pilotaggio del motore passo-passo, lo stepper tenta di adeguarsi (quasi) istantaneamente alla nuova velocità: se la coppia disponibile è sufficiente vi è una brusca accelerazione, praticamente istantanea; se la coppia non basta a vincere l'inerzia e gli attriti, semplicemente il motore si ferma e, senza un intervento esterno, non è più in grado di ripartire: si dice che il motore "ha perso il passo".

Questo comportamento deriva dal fatto che la velocità del motore è rigidamente controllata dall'elettronica e che la corrente assorbita è fissa e praticamente indipendente dalla coppia meccanica resistente.

Una simile reazione vi è anche nel caso di applicazione di una improvvisa coppia resistente al motore già in moto. Un motore DC, per esempio, semplicemente rallenta per adeguarsi alla nuova situazione ed aumenta l'assorbimento di corrente. Uno stepper invece non può rallentare: se la coppia resistente è relativamente piccola, la velocità non cambia assolutamente; se la coppia è troppo grande, il motore perde il passo e si ferma.

Questo comportamento è descritto dal seguente grafico con il legame tra coppia e velocità.



- Una curva identifica l'area, disegnata in verde, entro cui il motore può subire cambi di velocità e inversioni di marcia senza precauzioni particolari: è sufficiente cambiare la frequenza con cui sono applicate le correnti alle fasi. E' in genere indicata come curva di pull-in
- La zona indicata in rosso e chiamata slew-range può essere attraversata solo a condizione di evitare bruschi cambiamenti di velocità. Il cambiamento di frequenza deve quindi essere continuo e tanto più lento quanto più ci si allontana dalla curva di pull-in.
- La curva di pull-out indica quale è la massima coppia resistente che può essere applicata al motore in rotazione ad una data velocità costante senza causare il blocco. In pratica rappresenta le massime prestazioni del motore.

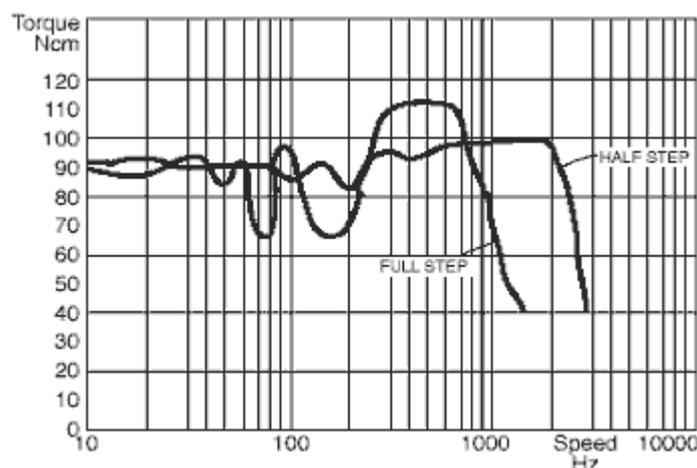
Il grafico rappresentato dipende non solo dal motore ma anche dai dispositivi meccanici ad esso collegati (un aumento del momento di inerzia del carico causa un restringimento dell'area di pull-in) e dal tipo di pilotaggio (un migliore gestione delle correnti aumenta entrambe le curve, soprattutto alle velocità più elevate).

Nella pratica la documentazione relativa a tali curve non è sempre disponibile per lo specifico motore in uso ma possono servire come riferimento nel progetto del software di controllo del motore: per esempio è opportuno accelerare il motore con una rampa al fine di portarlo alle velocità più elevate.

In applicazioni critiche è possibile utilizzare un sensore di velocità per riconoscere l'eventuale blocco del motore ma più spesso si preferisce ignorare il problema ed, eventualmente, abbondare un poco nel dimensionamento del motore.

## La risonanza

Nel grafico precedente il legame tra coppia e velocità è rappresentato da una curva sostanzialmente regolare. Nella realtà tale curva è invece molto frastagliata: il grafico seguente è relativo ad un particolare modello commerciale ed illustra l'andamento della curva di pull-out in assenza di carico e con un pilotaggio a passo intero e a mezzo passo.



Si noti come, soprattutto nel funzionamento a passo intero, la coppia subisce marcate diminuzioni in corrispondenza di frequenze medio-basse; in particolare possono essere presenti alcuni punti in cui la coppia subisce una diminuzione tale che il motore, spontaneamente, si ferma.

Queste velocità vengono chiamate frequenze di risonanza anche se alcuni autori ritengono il termine errato, forse perché vogliono sottolineare il fatto che non si tratta di un fenomeno elettrico ma meccanico.

Purtroppo tali punti non sono facilmente prevedibili in quanto dipendono dal motore, dal tipo di pilotaggio e dal carico; inoltre si presentano in modo del tutto imprevisto: è per esempio possibile avere motori che funzionano perfettamente per qualunque velocità da 0 a 60 e da 70 a 1000 giri al minuto ma che a 65 giri al minuto si bloccano...

In genere un sintomo dell'avvicinarsi della risonanza è il rumore forte ed irregolare che il motore emette, chiaramente diverso dal fischio piuttosto continuo che emette in condizioni di normale funzionamento.

Tra le tecniche per evitare questo rischio:

- Usare le tecniche di pilotaggio microstepping, a mezzo passo con controllo di coppia oppure a mezzo passo senza controllo di coppia. Le tre tecniche sono messe in ordine di capacità di ridurre il problema ma anche di difficoltà di realizzazione.
- Usare un carico con elevato momento di inerzia in quanto ciò spesso esclude rischi di stallo anche se rende più piccola l'area di pull-in. In effetti ho osservato il blocco spontaneo del motore a causa della risonanza solo in motori senza carico: collegando un dispositivo meccanico l'effetto si riduce ed in genere scompare, almeno nella sua manifestazione più evidente di blocco totale.
- Evitare di passare per le velocità in cui si ha risonanza, se sono noti. Trattandosi di punti decisamente isolati in genere ciò non crea difficoltà particolari se non la preventiva individuazione.

## Glossario

Quest'ultimo paragrafo raccoglie alcuni termini spesso usati per descrivere i motori passo-passo.

- **Step angle** (angolo di passo): distanza angolare tra due passi vicini. Valori normali sono  $1.8^\circ$  e  $3.6^\circ$ .
- **Step per revolution** (passi per giro): il numero di passi necessari per una completa rivoluzione, valore ovviamente strettamente dipendente all'angolo di passo. Valori normali sono 100 passi/giro (equivalenti ad un angolo di  $3.6^\circ$ ) e 200 passi/giro ( $1.8^\circ$ ). Questo valore è in genere stampigliato in chiaro sul motore (o in alternativa troverete l'angolo di passo). Nel caso non ci sia, potete provare a contare gli scatti che si sentono ruotando a mano il motore non alimentato. Da notare che tale valore si riferisce al pilotaggio a passo intero.
- **Corrente nominale**: è la corrente che attraversa ciascuna fase nelle condizioni normali di funzionamento. In genere è stampigliata sul contenitore del motore, in alternativa alla tensione nominale. Occorre evitare correnti maggiori in quanto è facile arrivare alla saturazione dei materiali magnetici oppure al surriscaldamento degli avvolgimenti. Valori normali, relativi ai motori che normalmente si trovano nelle vecchie stampanti, vanno da 0.5A a 2A o poco più.
- **Tensione nominale**: è la tensione che, collegata direttamente ad una delle fasi, produce la corrente nominale. Questa non è necessariamente la tensione di alimentazione in quanto questa dipende dal metodo di pilotaggio. Valori normali: da meno di 5V a 24V.
- **Resistenza della bobina**: è il legame tra tensione e corrente, in situazioni stazionarie. A volte è stampata ma è comunque semplicemente misurabile con un multimetro.
- **Induttanza della bobina**: raramente si conosce questo valore. Inoltre non è molto significativo in quanto dipende fortemente dalla posizione angolare del rotore. Per questo stesso motivo è pressoché inutile misurarla con elevata precisione usando un ponte RLC o tecniche analoghe.
- **Residual torque** (coppia residua o anche detent torque): la coppia che si oppone alla rotazione dell'albero di un motore non alimentato. E' questa che permette di contare i passi ruotando a mano l'albero.
- **Holding torque** (coppia di tenuta): la coppia che, con motore alimentato, si oppone alla rotazione. In genere è piuttosto elevata e, anche per motori di piccole dimensioni, è praticamente impossibile ruotare l'albero senza utilizzare una qualche leva. Da notare che la massima coppia di tenuta la si ottiene ruotando l'albero di 1/2 di passo: superato tale angolo, la posizione dell'albero scatta al

passo successivo. A volte è disponibile un grafico che, in condizioni statiche, mostra il legame tra coppia applicata e spostamento angolare (a volte indicato come deviation).

- **Pull-in torque:** è la coppia massima che, applicata al motore, ne permette la partenza ad una data velocità.
- **Pull-out torque:** è la coppia massima che, con il motore in moto ad una data velocità, può essere applicata senza far perdere il passo.
- **Pull-in rate** (o anche pull-in speed): è la massima velocità a cui il motore può partire, applicando una data coppia.
- **Pull-out rate** (o anche pull-out speed): è la massima velocità a cui il motore può arrivare data una certa coppia resistente. Tale velocità deve essere raggiunta con piccoli incrementi di velocità.
- **Overshot:** è l'oscillazione meccanica che il motore compie intorno alla sua posizione di equilibrio subito dopo uno spostamento. Dipende dal motore, dal pilotaggio e dal carico. Qualche volta, se eccessivo, crea problemi alla meccanica, in particolare l'usura degli ingranaggi.
- **Positional accuracy:** indica la precisione meccanica di posizionamento angolare, misurata in percentuale rispetto all'angolo di passo. Valori normali sono intorno al 5% (cioè 0.09° per un motore da 200 passi/giro). Tale errore non è cumulativo, cioè dopo un numero arbitrario di passi, rimane in valore assoluto invariato.
- **Frequenza di risonanza:** è la velocità di rotazione, o meglio le velocità, dato che sono più di una, in cui il motore eroga una coppia molto bassa, arrivando addirittura a fermarsi spontaneamente.

## Risorse in rete

Diversi produttori di circuiti integrati sono specializzati nella produzione di circuiti integrati per il pilotaggio dei motori passo-passo e pubblicano interessanti note applicative. Posso citare, a solo titolo di esempio

- <http://www.national.com/>
- <http://www.apexmicrotech.com/>
- <http://www.st.com/>
- <http://www.allegromicro.com/>

Sul mio sito <http://www.vincenzov.net/> sono presenti alcuni semplici circuiti applicativi:

- [Pilotaggio di motori bipolari](#) con gli integrati L297-L298
- [Pilotaggio micro-step di motori bipolari](#) con integrato LMD18245

## GNU Free Documentation License

La licenza [GNU FDL](http://www.gnu.org/), disponibile sul sito <http://www.gnu.org/> anche in [versione italiana](#), è parte integrante di questo documento e ne contiene i termini di utilizzo.

Questo tutorial è liberamente disponibile sul sito <http://www.vincenzov.net/>.

Tutti i nomi di ditte e prodotti citati sono proprietà dei legittimi proprietari.

## History

1.0	Febbraio 1999	Prima versione del tutorial.
1.1	Settembre 1999	Modifiche minori ad alcune sezioni e corretti alcuni errori
2.0	Giugno 2001	Prima versione GNU FDL del tutorial.
2.1	Giugno 2001	Nuova descrizione del microstepping

Le versioni con variazioni limitate alla sola correzione di errori di battitura e simili sono identificate dall'aggiunta di una lettera e non sono riportate.

