

ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE STATALE
"P. HENSEMBERGER"
Monza

Indirizzo Elettrotecnica e Automazione

Esame di Maturità 2005 / 06

**AUTOMAZIONE E COMANDO DI UN
MOTORE PASSO-PASSO
CON NUTCHIP**

**Tesina svolta da
Andrea Farina**

Docente responsabile Prof. Rizzaro Giuseppe

1 - INTRODUZIONE

Il motore passo-passo, detto anche *stepper-motor*, è un trasduttore elettromeccanico che converte impulsi elettrici di comando in rotazioni angolari. In altre parole ad ogni impulso di comando, l'albero ruota di un certo angolo, chiamato passo, la cui ampiezza dipende dalla struttura della macchina e dalla modalità di alimentazione .

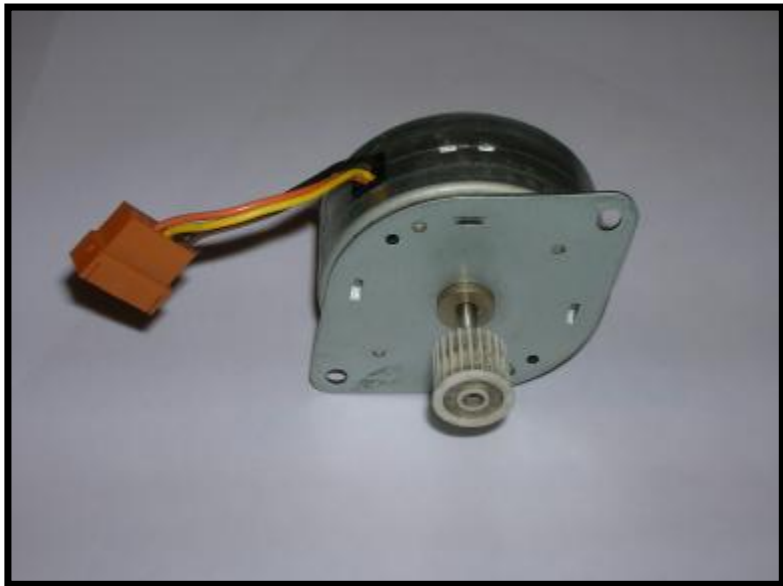
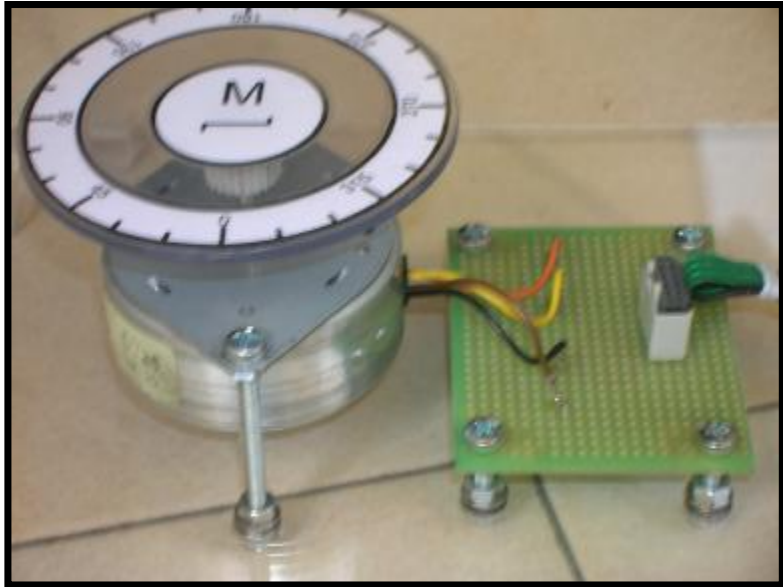
Applicando ad un motore passo-passo impulsi di corrente con frequenza che può variare da pochi Hz fino al massimo di qualche decina di KHz il motore ruoterà a scatti (o passi) continuativi la cui velocità di successione coinciderà esattamente con quella con cui si succedono gli impulsi di corrente applicati. Stando così le cose, risulta del tutto superfluo un controllo tendente a stabilire, ed eventualmente a correggere, la posizione che il rotore via via assumerà nel suo movimento.

I motori passo-passo vengono ampiamente utilizzati nei sistemi di controllo della posizione o della velocità nei sistemi a catena aperta. Essi forniscono infatti un'ottima precisione senza che sia necessario realizzare il controllo della grandezza presente in uscita. Ciò è dovuto al fatto che il valore del passo, cioè l'angolo di cui ruota l'asse per ciascun impulso , non dipende in alcun modo dal valore del carico, ma esclusivamente dalle caratteristiche costruttive del motore .

Attualmente i motori passo-passo vengono impiegati in un gran numero di settori della tecnica che vanno dall'informatica, alla regolazione e al posizionamento in campo industriale, alle apparecchiature medicali, alla strumentazione ed infine al settore degli elettrodomestici per sistemi di temporizzazione (lavatrici) e controllo ecc... .

A causa del loro così vasto impiego, i motori passo-passo vengono presentati dai loro costruttori in una vasta gamma di valori di frequenza di passo che può infatti arrivare fino a 25 KHz (cioè 25.000 passi di angolo al secondo).





2 - PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il rotore e lo statore posseggono molti poli allo scopo di consentire all'albero di ruotare anche a piccoli passi (piccoli angoli di rotazione).

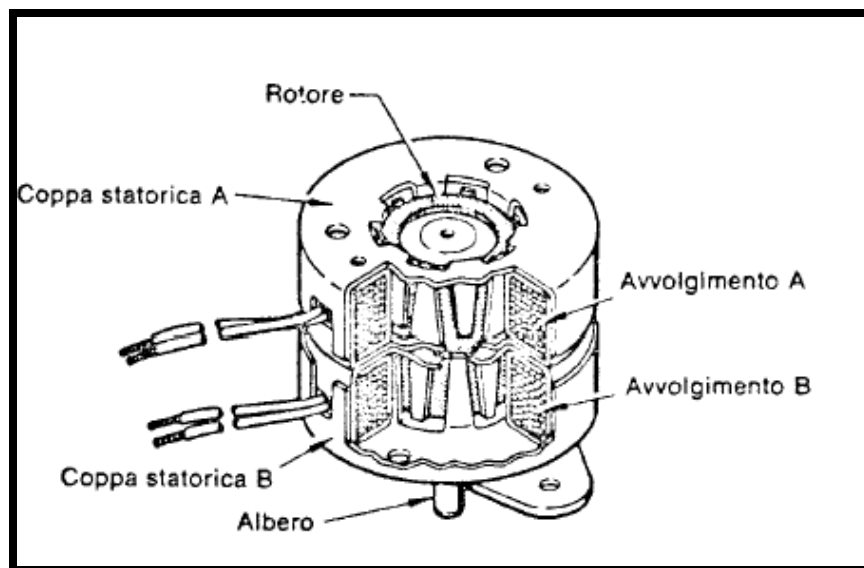
Il campo magnetico prodotto dalle bobine viene reso ruotante mediante commutazione sequenziale delle correnti circolanti negli avvolgimenti dello statore; alla sequenza di commutazione delle correnti dello statore corrisponderà un angolo noto sequenziale a scatto, o a passi del rotore.

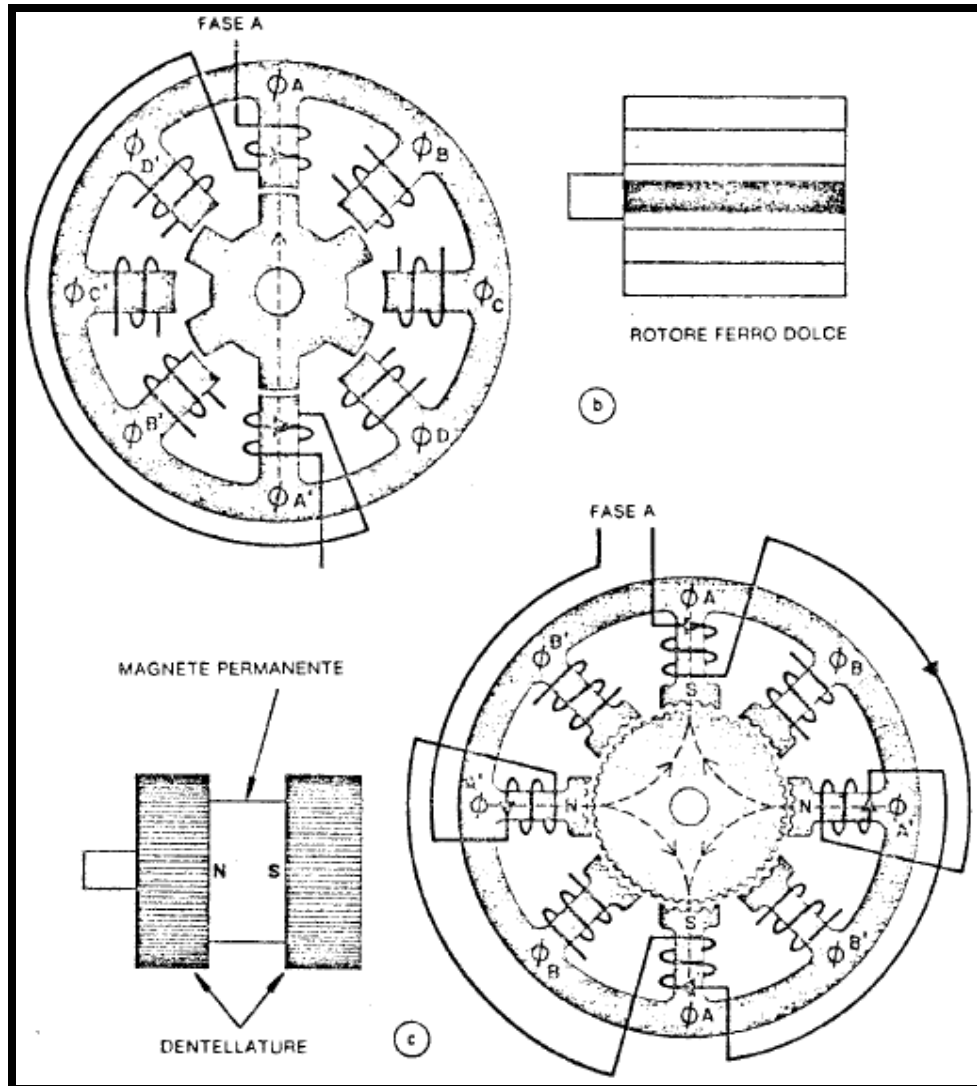
L'angolo del passo nei motori di questo tipo dipenderà pertanto dalla regolazione tra il numero dei poli presenti sullo statore e il numero dei poli magnetici presenti sul rotore.

Siccome quest'ultimo non è altro che un magnete cilindrico, i poli saranno fissi e di numero limitato. Si potrebbe aumentare il loro numero aumentando il diametro del magnete permanente del rotore ma in questo caso aumenterebbe notevolmente anche l'inerzia del rotore, per cui il motore non avrebbe una risposta pronta all'impulso.

Utilizzando motori con rotore a magnete permanente si riescono ad ottenere angoli di passo al massimo di $3,75^\circ$.

Lo statore del motore è composto da due o più poli e ognuno ha un avvolgimento che crea l'opportuno campo magnetico al passaggio della corrente. Invertendo il senso della corrente nell'avvolgimento, il "nord" ed il "sud" si invertiranno.



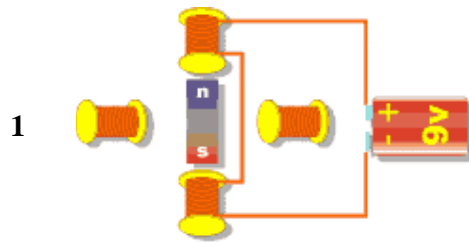


Struttura e principio di funzionamento dei principali tipi di motore passo passo
 a = con rotore a magnete permanente
 b = a riluttanza variabile
 c = ibridi

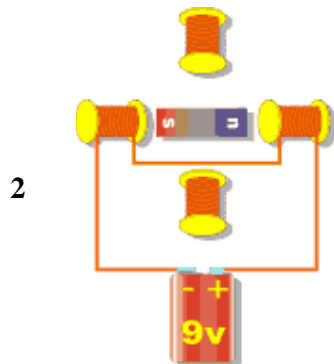
I motori passo passo (*stepper motor*) funzionano facendo ruotare un magnete, attirandolo da un passo all'altro con delle elettrocalamite opportunamente disposte. A differenza degli altri tipi di motore, in questo tipo di motore non ci sono contatti striscianti: per ottenere il movimento dobbiamo alternare dall'esterno il passaggio della corrente nei suoi avvolgimenti.

Nel farlo, dobbiamo rispettare una sequenza ben precisa infatti se essa non è quella giusta, il motore vibrerà e ronzerà, ma non girerà.

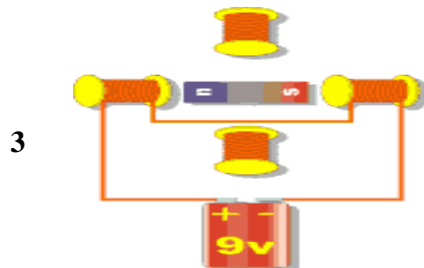
Per semplicità faremo riferimento a un motore caratterizzato da 4 passi/giro, cioè esso è costruito con 4 elettromagneti, disposti a croce: al centro una calamita è libera di ruotare.



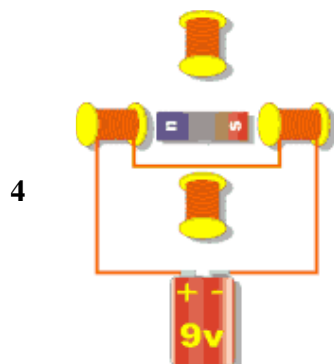
Nel primo passo alimentiamo i due elettromagneti in verticale. I due magneti sono in serie, il solenoide in alto affaccia il polo S alla calamita mentre il solenoide in basso mostra il proprio polo N. Poli opposti si attraggono, perciò la calamita si porterà con il polo N in alto ed il S in basso.



Al passo successivo, alimentiamo i due magneti posti in orizzontale. Anche questi solenoidi sono collegati in serie. La calamita "vedrà" il polo S a destra ed il N a sinistra, e si porterà in questa posizione compiendo un quarto di giro in senso orario. Non ruota dalla parte opposta perchè poli uguali si respingono.



Al terzo passo colleghiamo ancora l'avvolgimento verticale, ma invertendo la polarità della batteria: la corrente circola in senso inverso, il polo S è ora in basso e quello N in alto. La calamita ruota di un altro quarto di giro in senso orario, attirata dai poli opposti. La situazione è simmetrica rispetto al primo passo.

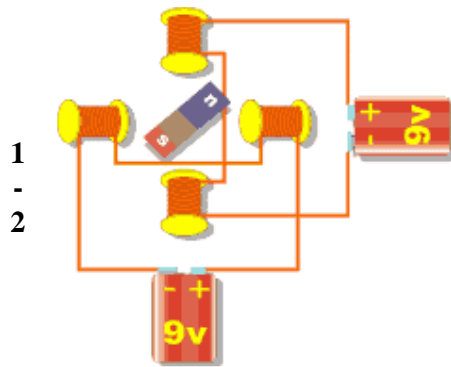


Nell'ultimo passo si alimentano di nuovo i solenodi in orizzontale, con polarità rovesciata rispetto al secondo passo. La calamita ruota di un ulteriore quarto di giro, per avvicinare il proprio polo N al polo S che ora si trova a sinistra, ed il proprio polo S al polo N che ora è a destra.

La sequenza prosegue ricominciando dal passo 1: così facendo la calamita tornerà alla posizione iniziale e avrà compiuto un giro intero.

C'è un'altra sequenza idonea a fare ruotare un motore passo-passo: la cosiddetta half step (mezzo passo). Si ottiene dalla sequenza precedente, in cui fra ogni passo ed il successivo si aggiunge un passo creato unendo gli altri due.

Ad esempio, fra il primo ed il secondo passo si inserisce:



Passo 1 e mezzo:

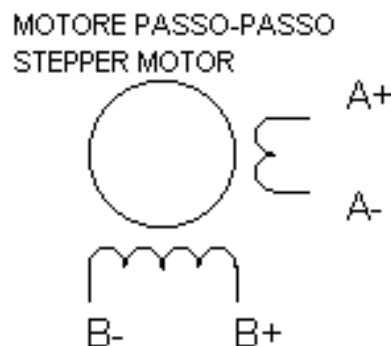
In questo passo si collegano gli avvolgimenti sia del primo passo, sia del secondo. La calamita ruota di un ottavo di giro, per avvicinare portare il proprio polo N in una posizione intermedia fra i due poli S che ora si trovano in sia alto e sia a destra.

La sequenza half step è quindi composta da 8 passi anziché 4.

Per variare la velocità di uno stepper basta variare il tempo in cui si rimane nel passo. Per fermarsi, invece, ci sono due modi:

- si può lasciare l'alimentazione inserita, in tal caso il motore si bloccherà saldamente nella posizione assunta
- si può scollegare l'alimentazione, in tal caso il motore sarà libero di girare.

Il simbolo del motore passo-passo ricorda l'esempio: i terminali A+A- alimentano i solenoidi verticali, mentre B+B- alimentano quelli orizzontali.



Questi motori si chiamano bipolari perché hanno 4 fili.

- Con un tester possiamo separare l'avvolgimento A da quello B verificando la continuità elettrica
- Non è importante sapere quale filo sia il separare l'avvolgimento A da quello B verificando la continuità elettrica. + e quale il -, invertendoli il motore funziona ugualmente anche se gira al contrario.

3 – PREGI e DIFETTI

I pregi dei motori passo passo:

- Ø Non necessitano di alcuna manutenzione periodica in quanto privi di spazzole. La vita di un motore di questo tipo dipende dal consumo delle bronzine che permettono la rotazione dell'asse.
- Ø Sono precisi, infatti essi realizzano posizionamenti con errori che possono variare tra il 3% e il 5% del valore del passo; tale errore non si accumula passo dopo passo, ma costituisce l'errore complessivo.
- Ø Possono essere pilotati da forme d'onda impulsive, cosa che rende molto semplice l'interfaccia con un computer ; sono necessari infatti pochi componenti esterni per realizzare le corrette forme d'onda di pilotaggio .
- Ø La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.
- Ø 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.
- Ø Hanno un'elevata robustezza meccanica ed elettrica: infatti non esistono contatti elettrici striscianti e, se necessario, possono essere realizzati anche in esecuzione completamente stagna.
- Ø E' facile far compiere all'albero piccole rotazioni angolari arbitrarie in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.

Ovviamente hanno anche difetti

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

4 – PARAMETRI PRINCIPALI

I parametri forniti dal costruttore che consentono di conoscere le prestazioni del motore passo-passo sono sia di tipo elettrico, sia di tipo meccanico.

I parametri elettrici sono:

- Ø **La tensione massima di alimentazione** (*rated voltage*)
- Ø **La massima corrente di fase** (*rated phase current voltage*)³
- Ø **La resistenza e la reattanza di fase**, che consentono di determinare il valore della costante di tempo elettrica del motore

I parametri meccanici sono:

- Ø **L'angolo di passo** (*step angle*): è questo l'angolo di cui si sposta il rotore quando, non soggetto ad alcun carico, viene eccitato con un impulso. E' possibile definirlo anche come numero di passi per rotazione. Il valore dell'angolo può essere compreso tra $0,72^\circ$ e 90° .
- Ø **Precisione del passo**: è l'errore commesso nel posizionarsi rispetto al valore nominale, dovuto ad imperfezioni di costruzione: è dato in percentuale dell'angolo di passo. Valori possibili sono compresi tra 5% e 30%. Non è un errore cumulativo.
- Ø **Il numero di passi per giro** (*step for revolution*)
- Ø **La tolleranza del passo** (*step angle accuracy*) che definisce la precisione con la quale viene compiuto un passo. In generale tale parametro è espresso in percentuale rispetto al valore di passo
- Ø **Coppia statica (o di ritenuta o ancora di mantenimento)** (*holding torque*): è la massima coppia all'albero di macchina quando lo statore è alimentato a corrente nominale, che non provochi la rotazione di passo.
- Ø **Coppia residua** (*detent torque*): è la massima coppia presente all'albero quando nessuna fase di statore è alimentata (nel motore a riluttanza variabile la coppia residua è nulla).
- Ø **Coppia sincrona** (*pull out torque*): è la massima coppia resistente che può essere applicata al motore che ruota con una determinata velocità, senza che si determini la perdita del passo.
- Ø **Coppia sincronizzante** (*pull in torque*): è il valore massimo della coppia di carico con la quale il motore può essere avviato, mantenuto a regime e fermato.

Per determinare i valori di queste coppie e individuare quindi le condizioni di corretto funzionamento del motore risultano molto utili le curve delle prestazioni meccaniche fornite dal costruttore.

5 - CLASSIFICAZIONE

Esistono in commercio diversi tipi diversi di motori passo-passo. Essi possono essere raggruppati in famiglie o classificati in funzione di tre diversi parametri :

1. il numero delle fasi presenti nello statore.
2. il tipo di tecnologia per la realizzazione del rotore ;
3. il senso di circolazione della corrente negli avvolgimenti di ciascuna delle fasi statoriche .

In funzione del numero delle fasi i motori passo passo possono essere classificati in motori monofase e polifase.

I motori passo-passo polifase

I tipi attualmente impiegati sono i motori a magnete permanente, quelli a riluttanza variabile e quelli di tipo ibrido.

Ø Motori passo-passo a magnete permanente (pm):

Questo è un motore nel quale la struttura rotorica è costituita da materiale del magnete permanente magnetizzato radialmente.

La struttura statorica è composta da un pacco di lamierini e presenta vari poli salienti; nei motori con molti poli magnetizzati sul rotore la struttura statorica viene semplificata per ridurre il costo e l'ingombro. Il numero di passi interi per giro realizzabile con questo tipo di motore è usualmente abbastanza basso: da 8 a 48.

Ø Motori passo-passo a riluttanza variabile (vr):

Questo è un motore nel quale la struttura rotorica, è generalmente costituita da un cilindro di ferro scanalato; lo statore è invece costituito da un pacco di lamierini a poli dentati.

Il principio di funzionamento di questo motore differisce da quello descritto in precedenza infatti, a seguito dell'alimentazione degli avvolgimenti delle fasi, la struttura rotorica si porta in una posizione a riluttanza minima.

E' importante osservare che per l'assenza di una magnetizzazione proprio della struttura rotorica, il motore a riluttanza variabile necessita di almeno 3 fasi per poter funzionare correttamente; il rotore può muoversi indifferentemente in senso orario, antiorario oppure non spostarsi affatto. Il comportamento di un tale motore risulta pertanto irregolare.

Per questo tipo di motore il numero di passi interi per giro è compreso nel campo 12-72.

Ø Motori passo-passo ibrido (hy)

Il motore ibrido unisce alcune caratteristiche del motore a riluttanza variabile e di quello a magnete permanente; sfruttando un rotore costituito da nuclei di ferro dentati circondato da un magnete permanente e uno statore composto da lamierini a poli dentati riesce ad ottenere un elevato numero di passi per giro tipicamente da 100 a 400.

Tra i tre tipi i migliori sono i motori ibridi e per tale motivo la quasi totalità di quelli oggi reperibili sono proprio di questo tipo; per cui mi limiterò a descrivere brevemente la struttura di questi ultimi.

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.

Motori passo-passo monofase

In questi tipi di motore un avvolgimento ed un'alimentazione non sono in grado di imporre al motore un senso di rotazione preferenziale ma solo una posizione di equilibrio; per realizzare un moto rotatorio è necessario introdurre una dissimetria di tipo statico o dinamico. Per fare ciò sono utilizzati:

- Poli o denti asimmetrici sullo statore: è una tecnica impiegata frequentemente per motori del tipo magnete permanente.
- Zone di circuito magnetico saturabile: metodo che prevede l'associazione di zone saturabili e di trasferri asimmetrici per migliorare la regolarità della coppia motrice.
- Impiego di un magnete ausiliario: consente di ottenere uno sfasamento voluto fra le posizioni di equilibrio del motore.
- Impiego di una struttura dentata ausiliaria: altro modo di ottenere lo sfasamento tra le posizioni di equilibrio con una struttura statorica dotata di denti ausiliari posizionati in modo asimmetrico.
- Impiego di spire in corto circuito: impiego di fili in corto circuito avvolti intorno ai poli dello statore.

Ø Motori unipolari e bipolari

I vari motori passo-passo sono ulteriormente classificabili in motori bipolari e motori unipolari a seconda che la corrente negli avvolgimenti statorici scorra nei due versi od in un verso soltanto.

L'orientamento del campo magnetico statorico all'interno del motore dipende dal verso delle correnti di fase che lo generano. Pertanto, in un motore con una struttura rotorica magnetizzata, a seconda del verso della corrente negli avvolgimenti statorici, si configurano delle posizioni di equilibrio distinte. Un'eccezione è rappresentata dal motore a riluttanza variabile dove l'inversione della corrente in una fase non produce nessun cambiamento sulle posizioni di equilibrio.

I motori bipolari sono i più utilizzati perché più semplici dal punto di vista costruttivo e garantiscono, a parità di dimensioni e numero di fasi, prestazioni maggiori.

6 - 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 collegate internamente e ciò fa sì che i fili uscenti in genere non sono 8 (due per fase) ma 5 o 6.

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

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

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.

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

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	I	0	0	0
2	I	I	0	0
3	0	I	0	0
4	0	I	I	0
5	0	0	I	0
6	0	0	I	I
7	0	0	0	I
8	I	0	0	I

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.

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.

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

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.

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

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

7 – 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. Questa può essere ottenuta in vari modi:

- Ø Attraverso un circuito integrato specializzato: in genere è il sistema più utilizzato.
- Ø 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.
- Ø Attraverso il pilotaggio diretto da parte di un processore: utile per risparmiare sul numero dei componenti
- Ø 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.

8 - DRIVER PER IL PILOTAGGIO

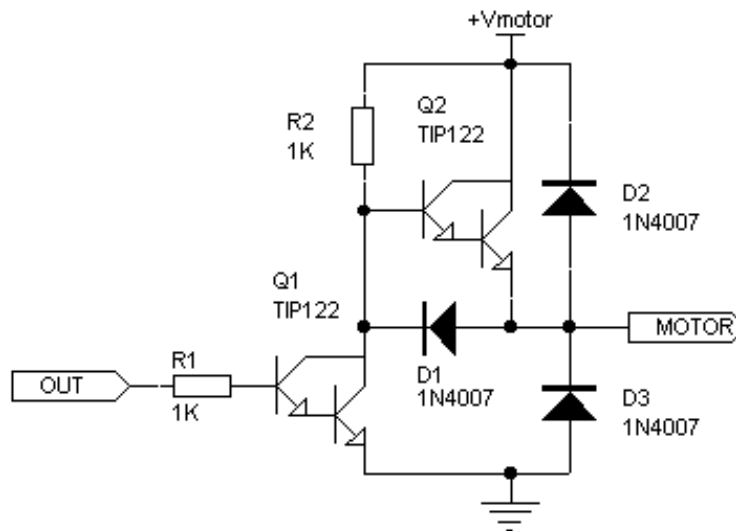


NUTCHIP è il nome di una famiglia di chip universali per piccoli. Sono differenti perché usano le tavole della verità al posto di un linguaggio di programmazione. Infatti basta riempire la tabella che compare a video, per determinare le combinazioni di ingressi e uscite da ottenere. Quindi si trasferisce la matrice al chip tramite la porta seriale del computer.

Un Nutchip e qualche componente esterno è tutto ciò che serve per realizzare migliaia di circuiti diversi. Come si è detto precedentemente i Nutchip utilizzano particolari tabelle della verità dette macchine a stati al posto di un linguaggio di programmazione.

1	RESET	VCC	20
2	RX	OUT4	19
3	TX	OUT3	18
4	XTAL2	OUT2	17
5	XTAL1	OUT1	16
6	REMOTE	HOLD	15
7	ST0	STOP	14
8	IN1	AREF	13
9	IN2	IN4	12
10	GND	IN3	11

Per pilotare un motore passo passo dobbiamo utilizzare uno stadio di potenza (driver) capace di erogare la corrente richiesta dagli avvolgimenti. Serve uno stadio per ogni filo del motore (4 stadi in tutto). Ogni stadio è pilotato da un'uscita del NUTCHIP.



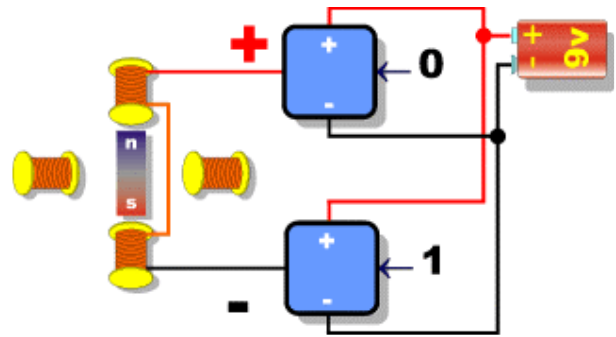
Uno stadio driver è composto da due transistor darlington Q1 e Q2. Il simbolo del darlington è quello di una coppia di transistor.

- se l'uscita del NUTCHIP (OUT) vale 0, il driver collega il filo del motore al polo positivo
- se l'uscita del NUTCHIP (OUT) vale 1, il driver collega il filo del motore al polo negativo (GND)

" $+V_{\text{motor}}$ " è la tensione di alimentazione positiva del motore (tipicamente 5, 9 o 12 volt), indipendente dai +5V che alimentano il NUTCHIP. La massa è in parallelo con la GND del NUTCHIP.

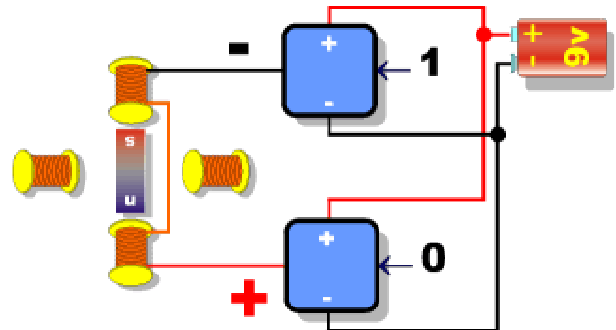
Vediamo cosa succede quando utilizziamo due driver per pilotare l'avvolgimento verticale. Per portarci nel primo passo della sequenza il NUTCHIP dà:

- uno 0 al driver in alto, che collega il polo positivo al motore e
- un 1 al driver in basso, che collega il polo negativo al motore.



Per invertire la polarità al motore, come richiesto dal terzo passo della sequenza, il NUTCHIP darà:

- un 1 al driver in alto, che collega il polo negativo al motore e
- uno 0 al driver in basso, che collega il polo positivo al motore.

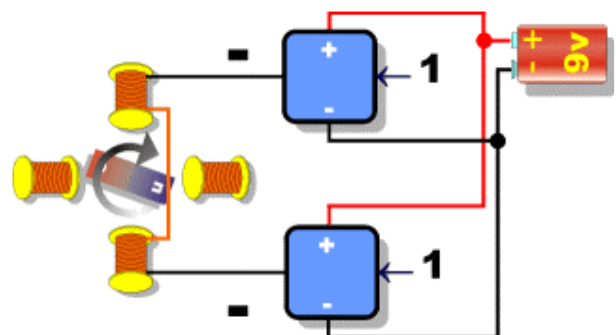


Per lasciare i solenoidi verticali inattivi (come nel passo 2 e 4), il NUTCHIP fornisce ai driver una coppia di 1.

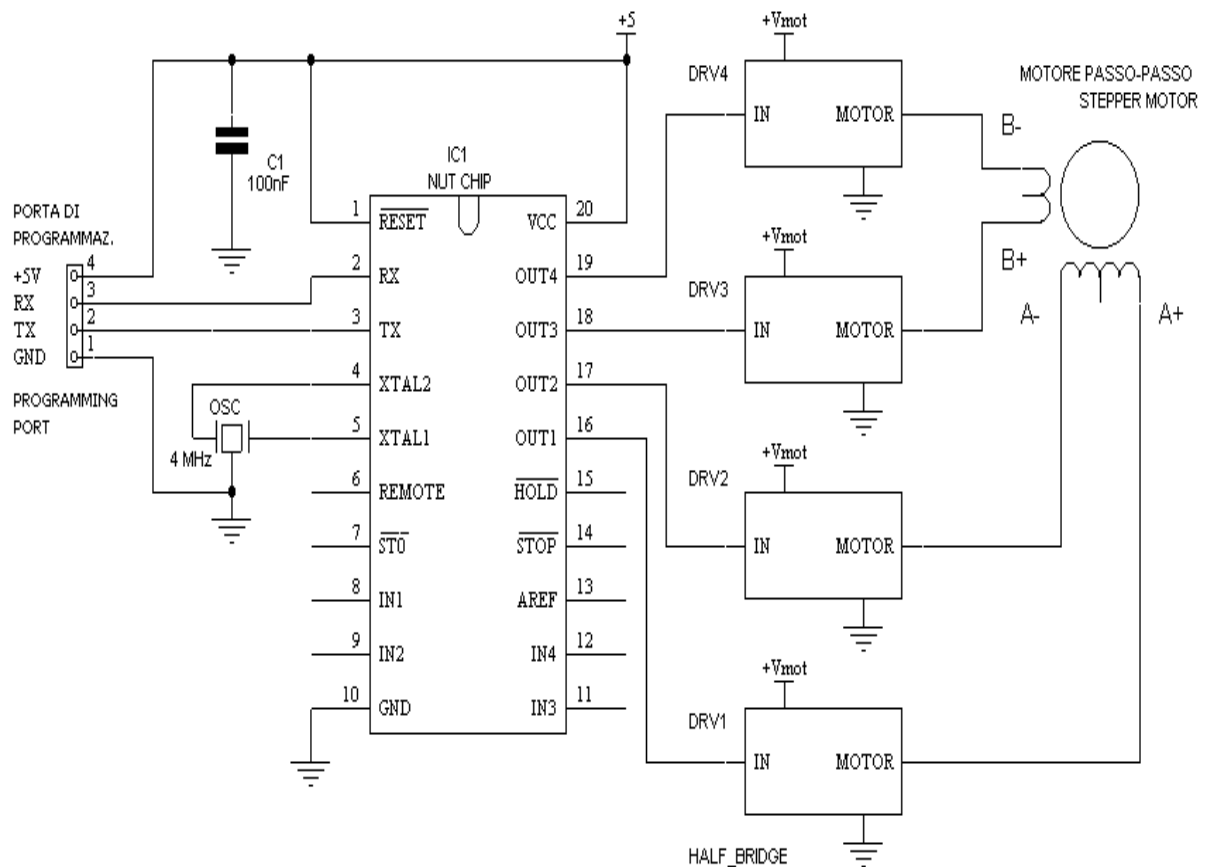
- sia il driver in alto che quello in basso collegano il motore al polo negativo. Siccome entrambi i fili sono allo stesso potenziale, la corrente non circola ed il magnete è libero di muoversi.

Si ottiene lo stesso risultato anche pilotando i driver con una coppia di 0.

In tal caso, entrambi i fili del motore si portano al polo positivo, ma essendo ancora entrambi allo stesso potenziale, la corrente non circola lo stesso.



Schema elettrico



Per semplicità, in questo schema ogni stadio driver è disegnato come un blocchetto. Se il vostro motore è a 5 volt, potete collegare la +Vmot alla +5V senza problemi. Altrimenti vi serve un secondo alimentatore per fornire la tensione positiva al motore (il polo positivo va collegato al negativo che alimenta il NUT).

Serve una buona dose di pazienza per montare tutti gli 8 transistor darlington e i 12 diodi necessari. Inoltre bisogna scoprire quali sono i fili A e B del motore passo passo.

- Se il vostro motore ha 4 fili, identificate (con un ohmetro) le due coppie collegate fra loro.
- Se ha 5 fili non potete usarlo con questo circuito.
- Se ha 6 fili è probabile che sia un motore con prese centrali (come quello disegnato nello schema). Lasciate le prese centrali scollegate. La presa centrale è quella che, con l'ohmetro, dà metà resistenza rispetto agli altri fili collegati.

Potete limitarvi a separare i fili in due coppie usando l'ohmetro. Il circuito infatti funziona ugualmente:

- scambiando entrambi gli A con entrambi i B
- invertendo A+ con A-
- invertendo B+ con B-

In tutti questi casi il motore girerà ugualmente, anche se al contrario. Se invece commettete altri errori (ad esempio, scambiate A+ con B+) il motore non girerà.

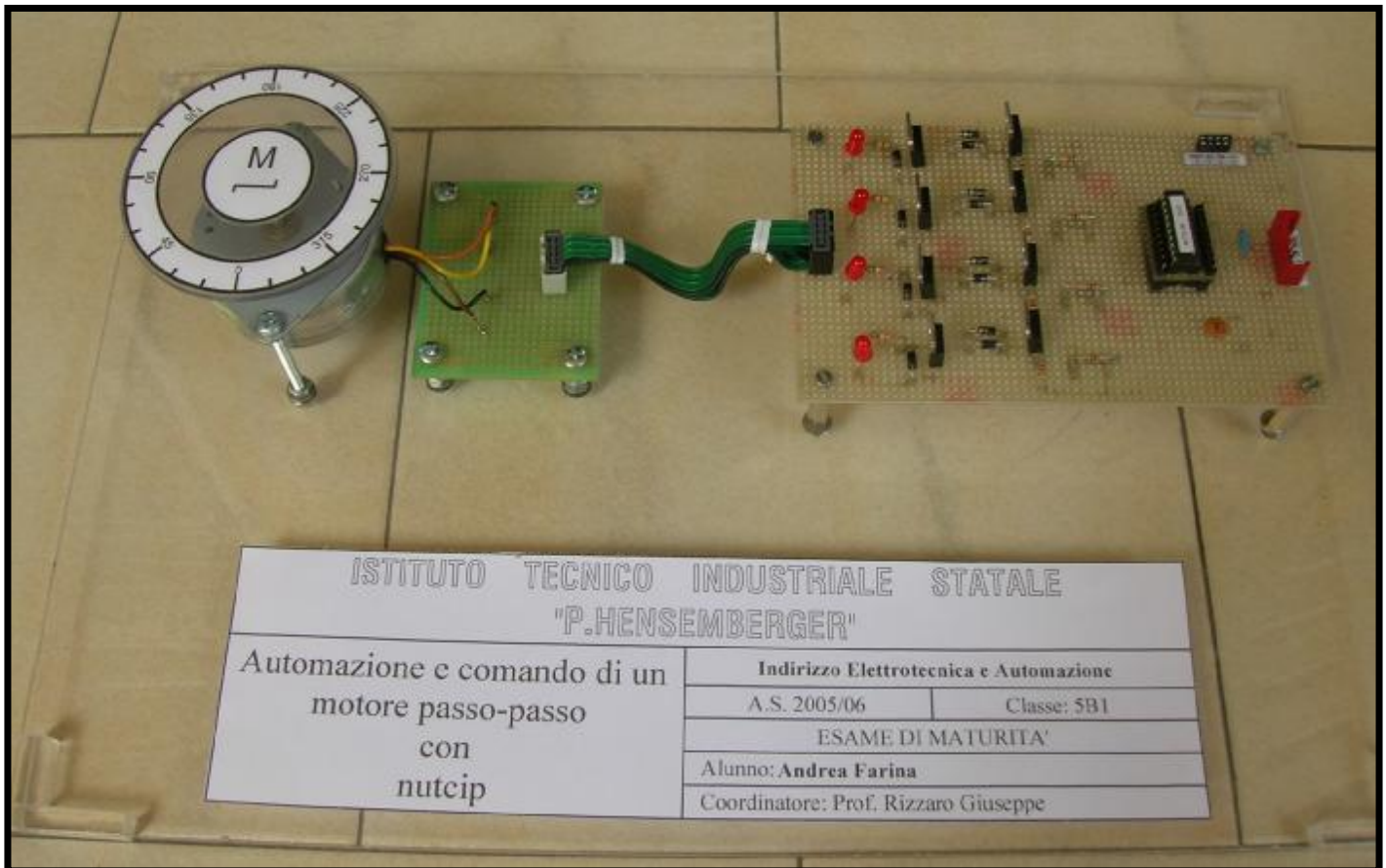
Tavola degli stati, pilotaggio a 4 passi

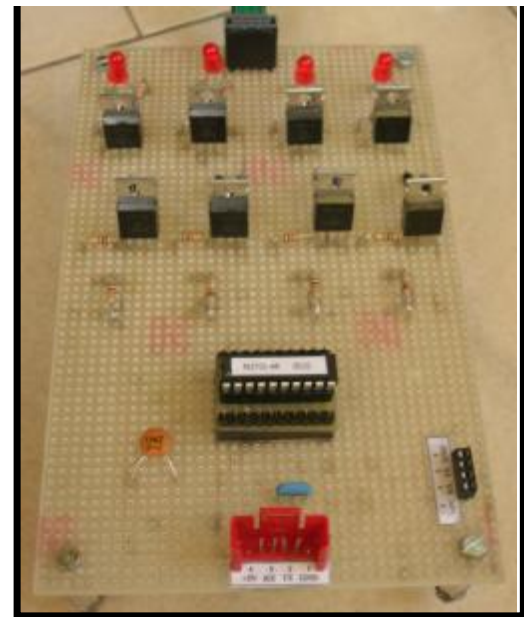
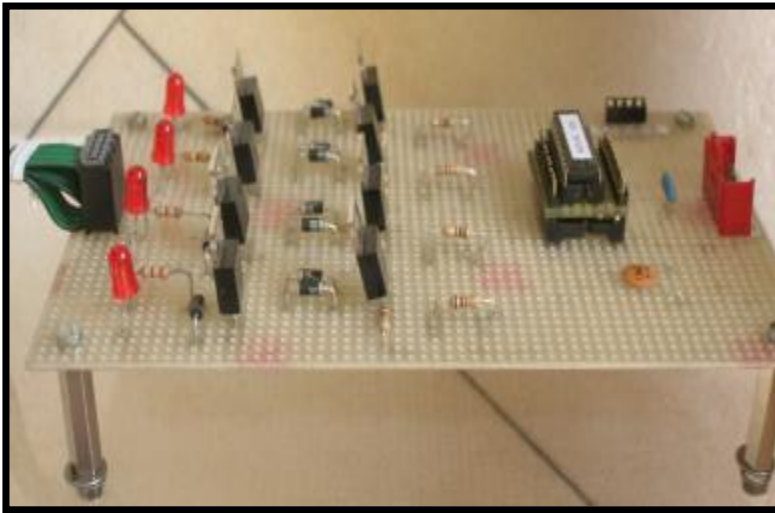
Se la spiegazione del circuito è stata lunga, la tavola degli stati che aziona un motore passo passo è sorprendentemente semplice: basta generare quattro stati, uno per ogni passo della sequenza illustrata sopra. Il file relativo è stepper.nut. Lo stato 1 genera il passo 1, lo stato 2 il passo 2 e così via. Il timeout fa cambiare automaticamente stato, saltando al passo successivo. Il tempo che si imposta come timeout determina la velocità del motore.

stato	cpu: #1...	no: #1...	tercio	no: 1
st00	1 0 0 0	timecu: 20 mS	st01	
st01	1 0 1 0	timecu: 20 mS	st02	
st02	0 1 0 0	timecu: 20 mS	st03	
st03	0 1 0 1	timecu: 20 mS	st00	

Tavola della verità per azionare uno stepper motor

Realizzazione pratica del progetto





IL PROBLEMA DELLA MASSIMA VELOCITA'

Ciascun avvolgimento di un motore passo-passo è equivalente dal punto di vista elettrico ad un induttore in serie ad un resistore.

Il problema sorge dal fatto che, in questo tipo di macchina, durante la 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 che rappresenta l'avvolgimento stesso.

Dalla teoria è noto che 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 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.

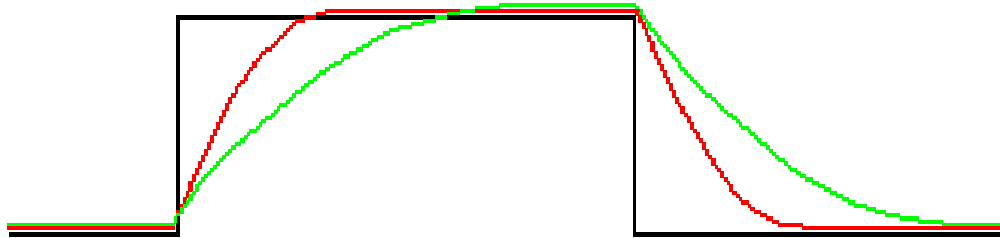
Un effetto è che quando la velocità di rotazione del motore aumenta l'assorbimento di corrente e la coppia meccanica disponibile diminuiscono. Ciò limita la massima velocità di rotazione a valori piuttosto piccoli, soprattutto nei motori ad elevato numero di passi/giro.

Esistono diverse tecniche per ridurre il tempo di commutazione e quindi aumentare la velocità di rotazione: aumentare la resistenza, oppure usare una doppia tensione di alimentazione. Delle due tecniche la prima è la più usata per i motori passo-passo ed è piuttosto semplice da realizzare anche se inefficiente dal punto di vista energetico.

Aumentare la resistenza

Osservando la relazione sopra riportata si vede come, per diminuire la Tau, basti aumentare la Ra: 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.

- 1) caso → è presente solo La e Ra
- 2) caso → è presente La e Ra + Rext



Nella prima delle due situazioni è presente solo l'induttanza La e la resistenza Ra 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".

Nel secondo caso dove viene aggiunta in serie all'avvolgimento una resistenza esterna, il tempo di carica dipende da:

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

Il 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.

Il funzionamento con doppia alimentazione

Questo metodo, applicato ormai raramente con i motori passo-passo, consiste nell'usare due diverse tensioni di alimentazioni: una più elevata, da usare nella prima fase al fine di accelerare la salita della corrente, 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

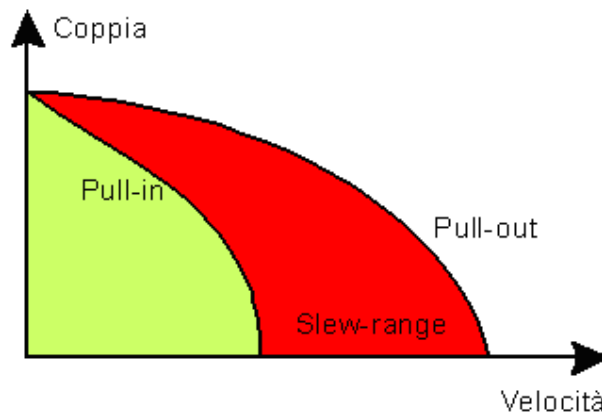
alimentazione lo rende poco pratico. Inoltre al momento dello spegnimento, la corrente diminuisce lentamente, con impatti negativi sulle prestazioni.

10 – I CAMBI DI VELOCITA'

Il motore passo-passo soffre di diversi problemi nel momento in cui viene effettuato il cambio di velocità. 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".

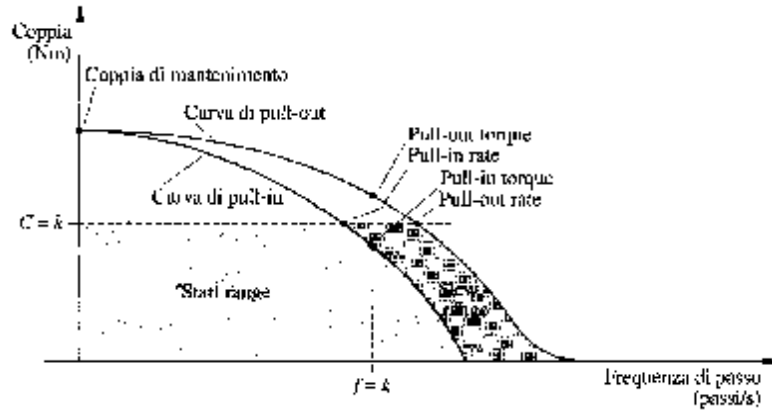
Questo comportamento è descritto dal seguente grafico con il legame tra coppia e velocità.



- Ø PULL-IN: 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.
- Ø PULL-OUT: 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.
- Ø PULL-OUT: La curva di pull-out indica qual'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).

FIGURA 10
 Curve delle prestazioni
 meccaniche di un motore
 passo-passo; le curve
 pongono in relazione la
 coppia resa sull'asse con
 la frequenza della forma
 d'onda di comando.

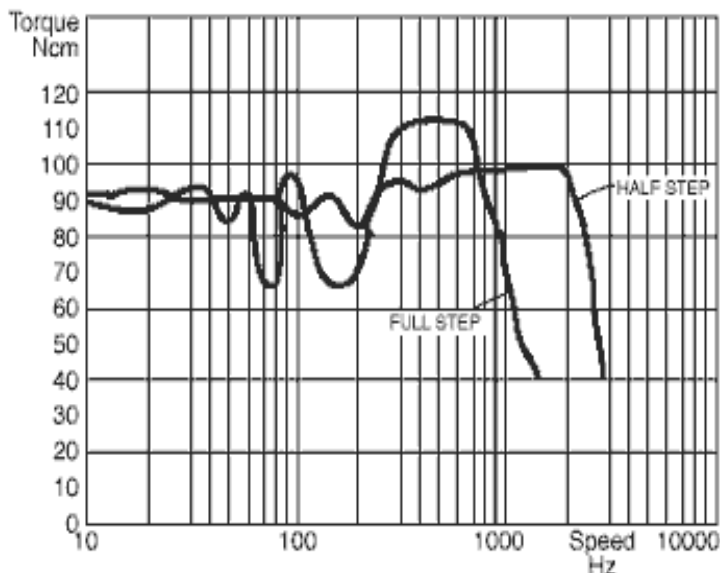


Inoltre da quanto detto risulta evidente che, all'avviamento, i valori della coppia e di frequenza di passo del motore devono essere nella zona delimitata dalla curva pull-in (start-range), mentre in rotazioni tali valori possono trovarsi nella zona compresa tra le due curve (slew-range). In nessun caso essi si possono trovare all'esterno della curva di pull-out: se ciò accade il motore perde i passi e non risulta quindi in sincronismo con la frequenza di passo della forma d'onda di comando. Per questo motivo, all'atto dell'avviamento del motore passo-passo si usano particolari sequenze di impulsi di comando fino a che la velocità non raggiunge il valore di regime.

Tracciando sulle curve di prestazione una parallela all'asse delle frequenze (per coppia costante $C=k$), intersechiamo le due curve in due punti. Un'intersezione con la curva di pull-in individua la massima frequenza di passo all'avviamento per quella data coppia, detta pull-in rate. Un'intersezione con la curva di pull-out individua invece la massima frequenza di passo in movimento per quella data coppia, detta pull-out rate.

Tracciando una parallela all'asse delle coppie (per frequenza costante $f=k$) individuiamo, per quella data frequenza di passo, la coppia sincronizzante o pull-in torque e la coppia sincrona (detta anche pull-out torque)

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 subisca 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 imprevedibile: 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:

-
- Ø 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.
- Ø 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.

Le due tecniche sono messe in ordine di capacità di ridurre il problema ma anche di difficoltà di realizzazione.