Motori passo-passo

Caratteristiche, tecniche e circuiti di pilotaggio

I motori elettrici si possono suddividere in varie categorie (vedi **figura 1**), che si differenziano a seconda della tensione di alimentazione e del tipo di pilotaggio: vi sono infatti i motori in continua (a spazzole e brushless), quelli in alternata (sincroni e asincroni), quelli detti "universali" (possono funzionare sia in continua che in alternata) e i motori passo-passo. Ciascun tipo di motore presenta caratteristiche proprie, risponde a ben determinate esigenze applicative e richiede tecniche di pilotaggio e circuiti di controllo specifici.

Fra i vari tipi di motori elettrici, quelli di tipo "passo-passo" occupano un ruolo del tutto particolare, sia per il modo di pilotaggio che per il tipo di impiego.

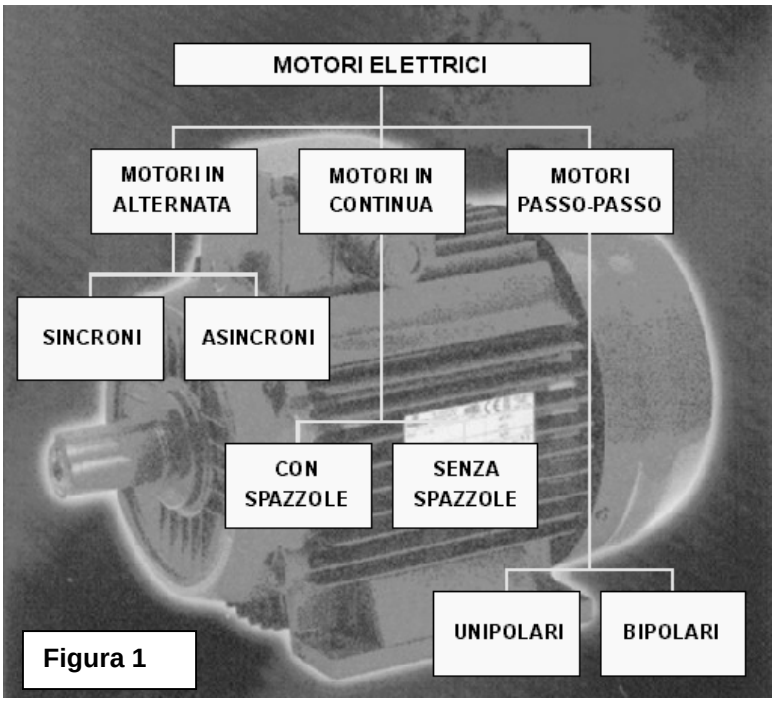


Figura 1

Vengono infatti denominati "a passo" o "passo-passo" i motori che possono essere fatti avanzare a singoli passi e bloccati in una posizione qualunque, in modo da consentire facilmente posizionamenti di grande precisione, utili in una vasta serie di applicazioni quali ad esempio i servomeccanismi nell'automazione industriale, nella robotica, nelle stampanti, nei plotter, nei disk-drive, ecc. Per poter essere pilotati, i motori passo-passo richiedono però sequenze di impulsi particolari, che debbono essere generati da opportuni circuiti elettronici.

Costituzione e funzionamento di un motore passo-passo

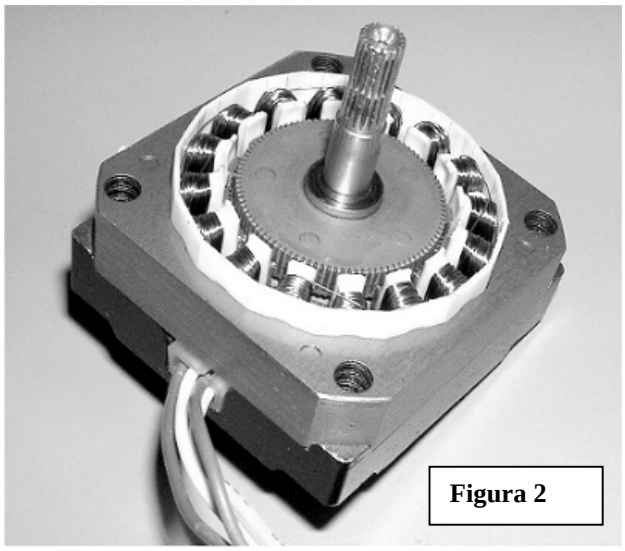


Figura 2

La tipica costituzione di un motore passo-passo prevede l'impiego di un rotore a magnete permanente (e quindi privo di avvolgimenti) dotato di un certo numero di "denti", con lo statore costituito da numerose espansioni polari, alimentate da altrettanti avvolgimenti (vedi **figura 2**).

Questi avvolgimenti sono collegati in modo da portare esternamente un numero fisso di fili, che può essere di 4, 5 o 6 conduttori. A questi conduttori (fra di loro non intercambiabili) viene applicata la corretta sequenza di impulsi per l'avanzamento del rotore. I "passi" ottenibili – che dipendono dalle modalità costruttive del motore – possono andare da 40 a 200, a seconda dei modelli.

Al fine di facilitare la comprensione del modo di funzionamento (e quindi di pilotaggio) di questo tipo di motore, immaginiamo di semplificarne la costituzione, schematizzando la sua realizzazione con sole 4 espansioni polari dello statore, come in **figura 3**. Il rotore – essendo un magnete permanente – sarà provvisto di un polo Nord e di un polo Sud.

Gli avvolgimenti A e B sono in serie, in modo che applicando una tensione positiva ad A e negativa a B la corrente può fluire da A a B, polarizzando in tal modo entrambe le espansioni polari; la stessa cosa dicasi per gli avvolgimenti C e D, anch'essi in serie. A, B, C e D vengono dette anche le "fasi" del motore passo-passo.

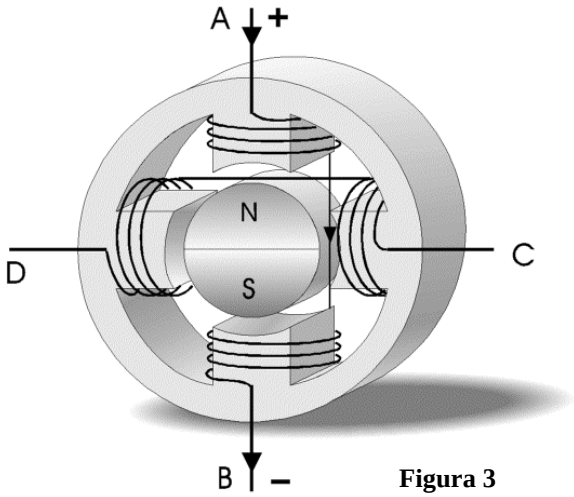


Figura 3

Il pilotaggio a singola fase o "a onda"

Date queste premesse, si immagini di fornire tensione al conduttore A, collegando B a massa e lasciando scollegate le fasi C e D: a causa della magnetizzazione delle espansioni polari connesse alle fasi A e B il magnete permanente del rotore ruoterà, orientandosi in modo da allineare le proprie espansioni polari Nord e Sud nella direzione A-B, come mostrato in figura.

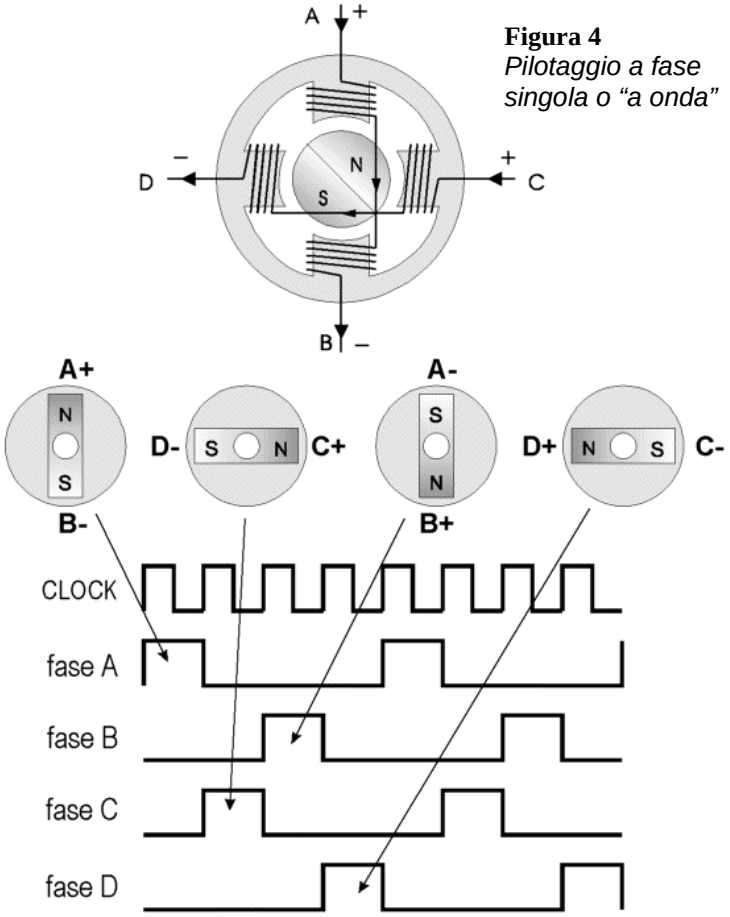


Figura 4
Pilotaggio a fase singola o "a onda"

Se successivamente si toglie tensione alla fase A e la si commuta alla fase C in modo da alimentare il percorso di corrente da C a D, il rotore ruoterà in senso orario di un quarto di giro allineandosi lungo la direzione C-D. Per provocare un ulteriore avanzamento si fornirà tensione alla fase B, poi alla D e così via, provocando una continua rotazione dell'asse del motore.

La sequenza degli impulsi elettrici da fornire è quella evidenziata in **figura 4** (corrispondente a due giri del motore), dove le varie sequenze sono sincronizzate da un clock, il cui periodo determina ovviamente la frequenza di ripetizione degli impulsi, e quindi la velocità di rotazione del motore.

Come si può dedurre dal tipo di pilotaggio, le quattro fasi A, B, C e D non sono fra di loro equivalenti, bensì richiedono una sequenza di pilotaggio ben precisa. Per questo motivo, un erroneo collegamento anche di una sola delle fasi determina l'avanzamento irregolare o addirittura il blocco del motore.

Questo tipo di pilotaggio è detto "a singola fase" o "a onda" (wave drive).

Il pilotaggio a due fasi

Un altro modo di pilotare il motore è quello di alimentare contemporaneamente due fasi, ad esempio A e C: in tal modo il rotore si allinea in una direzione intermedia fra le due espansioni polari dello statore. Lo scopo di questa doppia alimentazione è quello di ottenere una forza di attrazione magnetica più intensa fra statore e rotore, e quindi una maggior coppia meccanica di rotazione per il motore.

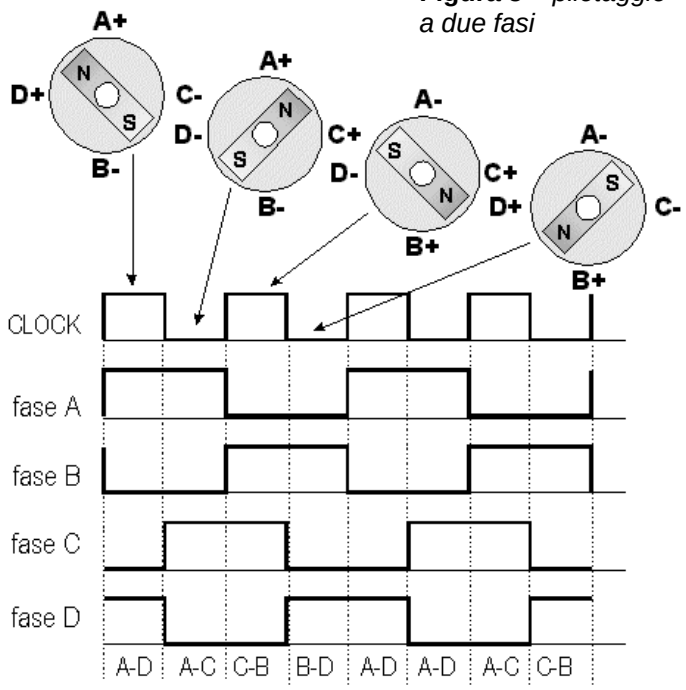


Figura 5 – *pilotaggio a due fasi*

Questa tecnica viene detta per tale motivo "pilotaggio a due fasi" (two phases drive).

Con questa tecnica, per fare avanzare il motore in senso orario è necessario fornire sequenze di impulsi del tipo A-C, poi C-B, in seguito B-D e infine D-A, in modo da provocare la completa rotazione dell'asse, ma sempre con il polo Nord del rotore allineato in una posizione intermedia fra due fasi. In **figura 5** è mostrata la sequenza degli impulsi richiesti con le rispettive posizioni assunte dal rotore.

Con entrambe le tecniche è comunque necessario garantire la corretta sequenza degli impulsi, senza omettere alcuna sequenza, pena l'avanzamento irregolare del motore. E' altresì ovvio che l'inversione del senso di rotazione del motore viene ottenuto inviando al motore sequenze di impulsi invertite, ovvero come se fossero "lette da destra a sinistra" rispetto a quelle ora descritte.

L'avanzamento a mezzo passo

Si può osservare che è possibile altresì alternare le due sequenze: ad esempio si può alimentare prima A, poi la coppia A-C, poi C, poi la coppia B-C, poi B, e così via. Che cosa si ottiene? Semplice, il rotore si allinea dapprima verso A, poi in posizione intermedia fra A e C, poi verso C, poi in posizione intermedia fra C e B, poi verso B, e così via. Lo scopo? Quello di far compiere al rotore movimenti "a mezzo passo", e quindi attuare posizionamenti più precisi, anche se con una complicazione della sequenza degli impulsi (vedi **figura 6**).

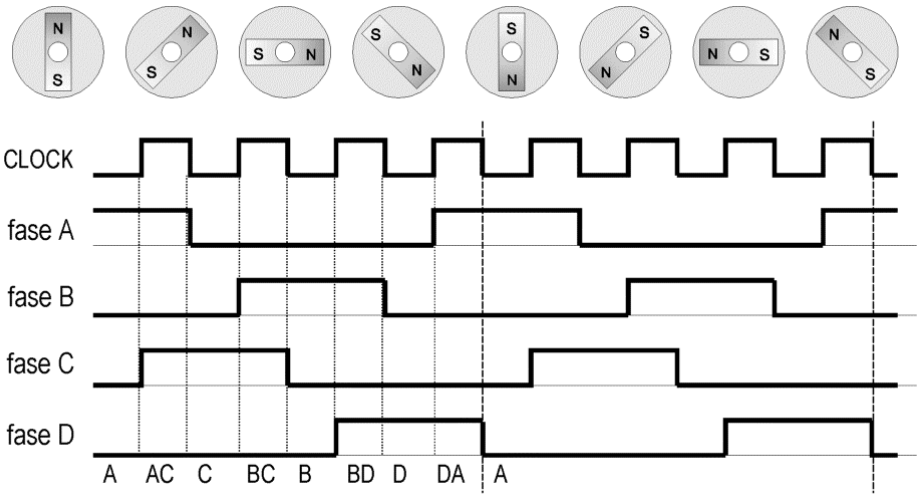


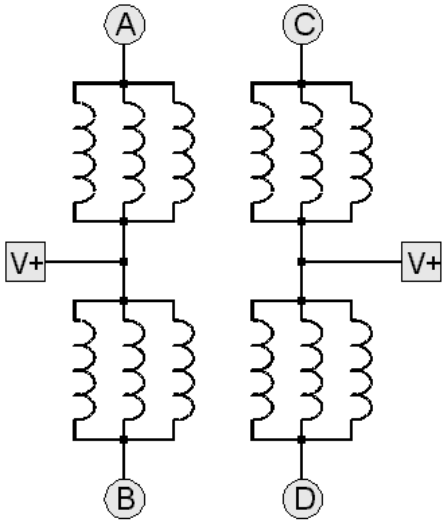
Fig. 6 – *Il pilotaggio a mezzo passo alterna le due sequenze tipiche del pilotaggio a onda e a due fasi*

Abbiamo visto che per un motore ideale a 4 espansioni polari è possibile compiere passi di un quarto di giro (90 gradi) oppure – attuando un controllo a mezzo passo – di un ottavo di giro, ovvero 45 gradi. In un motore reale il numero di espansioni polari è maggiore, ma sempre multiplo di quattro, in modo da utilizzare esternamente solo 4 fili. Per tale motivo gli avvolgimenti sono connessi in parallelo quattro a quattro (il primo con il quinto, il secondo con il sesto, e così via).

Grazie a questo accorgimento le sequenze di impulsi evidenziati nelle figure 4, 5 e 6 rimangono invariate anche per motori da decine o centinaia di passi. E' ovvio che all'aumentare del numero di passi si ridurrà progressivamente l'angolo di rotazione per ogni passo, che solitamente va da 1.8 ai 9 gradi. Per questi motori, quindi, per poter compiere un giro completo sarà necessario ripetere più volte le combinazioni sopra descritte.

Motori unipolari e bipolari

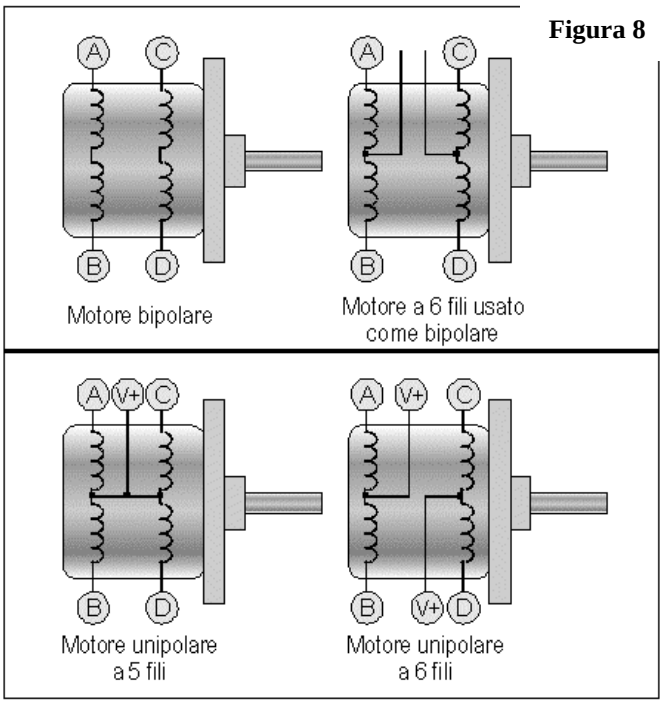
Alcuni motori presenti in commercio presentano però più di quattro fili. Perché mai? La risposta è da ricercare nella modalità di avvolgimento dei conduttori fra le varie espansioni polari dello statore, ciò che condiziona anche le possibilità di pilotaggio. Infatti, il motore che abbiamo finora analizzato è quello di tipo "bipolare", così denominato poiché permette di invertire le polarità degli avvolgimenti e quindi di far fluire la corrente in entrambe le direzioni.



Alcuni motori sono invece avvolti in modo da possedere una configurazione interna quale quella di **figura 7**, ottenuta rendendo disponibile esternamente il punto centrale del filo di passaggio fra le due fasi opposte dello statore (A e B da un lato, C e D dall'altro) in modo da disporre di un totale di 6 fili, di cui quattro sono le normali fasi, e due "prese centrali". Alcuni tipi di motori dispongono di soli 5 fili, dove 4 sono le fasi A, B, C e D e il quinto è dato dall'unione delle due prese centrali V+.

Con questa configurazione si offre una possibilità in più, ovvero se si desidera utilizzare il motore come se fosse di tipo bipolare, allora è sufficiente ignorare il due fili aggiuntivi e lasciarli sconnessi. Se invece i fili (o il filo) V+ viene collegato ad una tensione di alimentazione, allora si trasforma il motore in "unipolare", ovvero si fa sì che la corrente negli avvolgimenti fluisca solo dal terminale V+ ad una delle fasi, senza la possibilità di invertire il verso della corrente. A che serve tutto ciò? Semplice: una soluzione di questo tipo permette di semplificare il circuito di pilotaggio, riducendone il costo.

Figura 8



In **figura 8** sono rappresentate schematicamente le connessioni per i due tipi di motori: unipolari e bipolari.

Oltre ai motori passo-passo del tipo ora visto (ovvero a magnete permanente) esistono anche altri tipi di motori a passo. Uno di questi è quello detto "a riluttanza variabile", che impiega un rotore in lega ferromagnetica "dolce" (ovvero a piccola isteresi) i cui "denti" si polarizzano solo in corrispondenza al passaggio in vicinanza delle espansioni polari dello statore, ciò che necessita di un traferro molto ridotto (inferiore al decimo di millimetro). In questo tipo di motore il numero dei denti rotorici è

differente da quello delle fasi statoriche, in modo da far sì che quando un dente e una fase sono allineati, i due adiacenti non lo siano. Questi motori, realizzati in ferro-silicio laminato, permettono di ottenere coppie elevate, azionamenti ad elevata velocità ed un elevato numero di passi.

I circuiti di controllo

Al fine di fornire alle quattro fasi A, B, C, D del motore passo-passo la corretta sequenza di impulsi è necessario utilizzare circuiti logici pilotati da un generatore di clock, eventualmente variabile al fine di controllarne la velocità. E' possibile sfruttare un generatore di clock basato ad esempio su di un oscillatore astabile a 555 seguito da un divisore e da una rete logica che ricavi i segnali necessari. Questi segnali non potranno però essere utilizzati direttamente per il pilotaggio del motore, ma richiederanno un'amplificazione della corrente ed un'eventuale innalzamento della tensione, a seconda del tipo di motore utilizzato. Lo schema a blocchi generico è quello mostrato in **figura 9**.

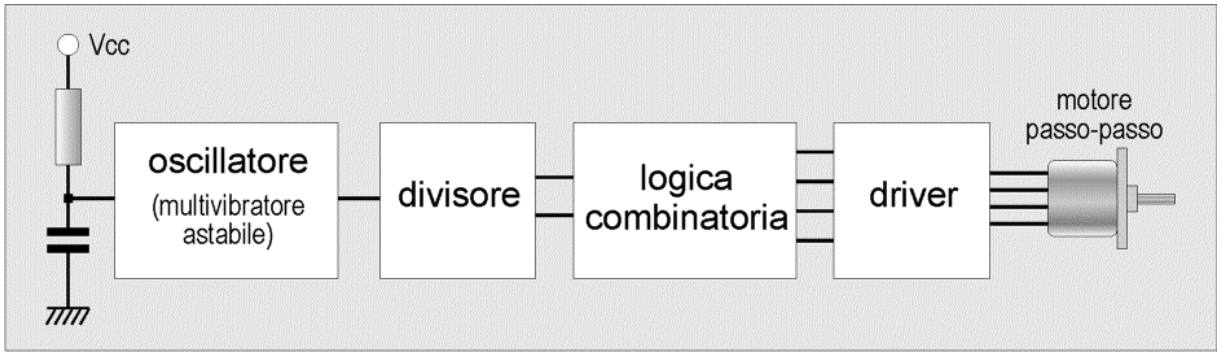


Fig. 9 *– Schema a blocchi del circuito di pilotaggio di un motore passo-passo*

E' ovvio comunque che è possibile realizzare tutte le necessarie funzioni richieste per la generazione dei segnali tramite un microcontroller, il quale necessita solo del driver di potenza per il pilotaggio del motore. In commercio sono comunque disponibili circuiti di controllo specifici, che richiedono solo pochi componenti esterni ed eventualmente il solo driver di potenza.

Nella scelta o nella progettazione dei vari tipi possibili di circuiti di pilotaggio, l'unica variabile che è necessario predeterminare è il tipo di motore da controllare, che condiziona la tipologia del driver di potenza. Infatti, a seconda che il motore prescelto sia unipolare o bipolare, il circuito driver deve essere adeguato. Nel caso di motore unipolare, il driver deve unicamente assorbire corrente da ciascuna fase verso massa, mentre se il motore è bipolare, il driver deve sia assorbire che erogare corrente, proprio per invertire il senso della corrente. I corrispondenti schemi di principio sono quelli riportati in **figura 10**.

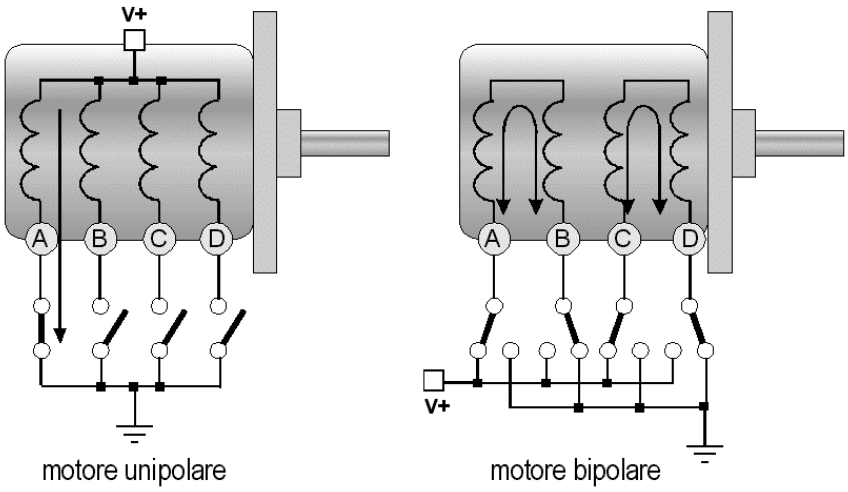
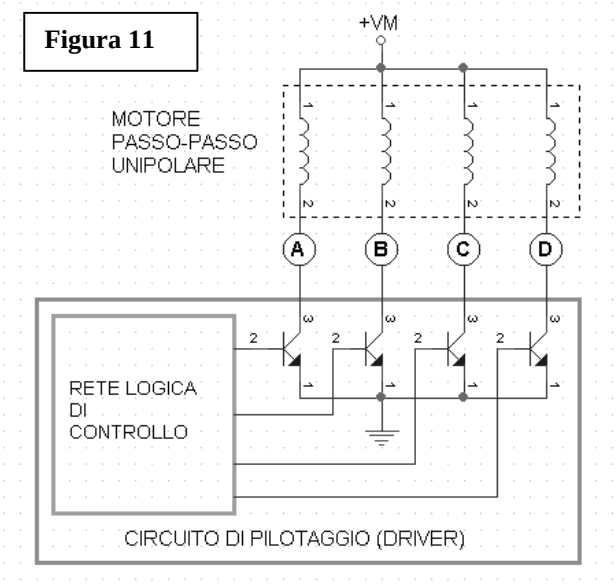


Fig. 10 *– Nel caso del motore unipolare i transistor (indicati come interruttori e deviatori) polarizzano una fase alla volta, mentre per il motore bipolare commutano simultaneamente in modo da invertire il verso della corrente*



Chiarito il principio di funzionamento, non è difficile dedurre gli schemi reali dello stadio driver, che nel caso del pilotaggio di un motore passo-passo di tipo unipolare si presenta come in **figura 11**, dove i transistor bipolari possono all'occorrenza essere sostituiti da Mosfet o Igbt, anche se in realtà non esistono problemi di velocità di commutazione, in quanto la velocità massima di rotazione del motore è limitata, e quindi la massima frequenza di commutazione dei transistor rimane alla portata di qualunque tipo di transistor.

Va precisato che lo schema di figura 11 è di principio, in quanto si rende necessario proteggere ciascun transistor dai picchi di tensione indotti dalle commutazioni sugli avvolgimenti del motore, che provoca – ad ogni spegnimento della corrente – una f.e.m. indotta che si somma alla VM. Per tale motivo in antiparallelo ad ogni avvolgimento va collegato un diodo (possibilmente veloce) di "ricircolo" della corrente, con l'obiettivo di sopprimere l'inversione di polarità su ciascun avvolgimento.

Per quanto riguarda i motori bipolari, i quattro deviatori di figura 10 vengono realizzati con otto transistor, sfruttando la tipica configurazione "a ponte ad H", riportata in **figura 12**. Si noti che in questo schema sono riportati i componenti necessari al pilotaggio delle sole fasi A e B, mentre lo schema completo deve comprendere anche un'analoga configurazione per le altre due fasi C e D, per cui diviene decisamente più complesso che nel caso unipolare.

Come si può osservare analizzando la figura 12, questo schema è progettato in modo che il circuito di controllo fornisce un'onda quadra nelle cui fasi a livello alto vengono mandati in conduzione i transistor T1 e T4, in modo che la corrente possa fluire attraverso l'avvolgimento A-B del motore da sinistra a destra. Durante le fasi a livello basso vengono bloccati T1 e T2 ed entrano in conduzione T3 e T4, in modo da invertire la corrente nell'avvolgimento.

Si ricordi che – al pari della figura 11 – anche lo schema di figura 12 è da intendersi di principio, in quanto in realtà occorrono dei driver traslatori, che siano in grado di pilotare sia i transistor di pull-up (T1 e T3, il cui segnale di base va riferito al potenziale delle fasi A e B del motore) sia quelli di pull-down (T2 e T4, il cui segnale di pilotaggio va riferito a massa). Non solo, ma occorre anche garantire che i transistor dello stesso ramo (T1 e T2 da un lato e T3 e T4 dall'altro) non si trovino a condurre simultaneamente, al fine di non provocare il corto fra VM e massa. Sebbene possa sembrare che ciò non possa avvenire, si ricordi che la "coda" della corrente di ciascun transistor può sovrapporsi all'inizio della conduzione di quello adiacente.

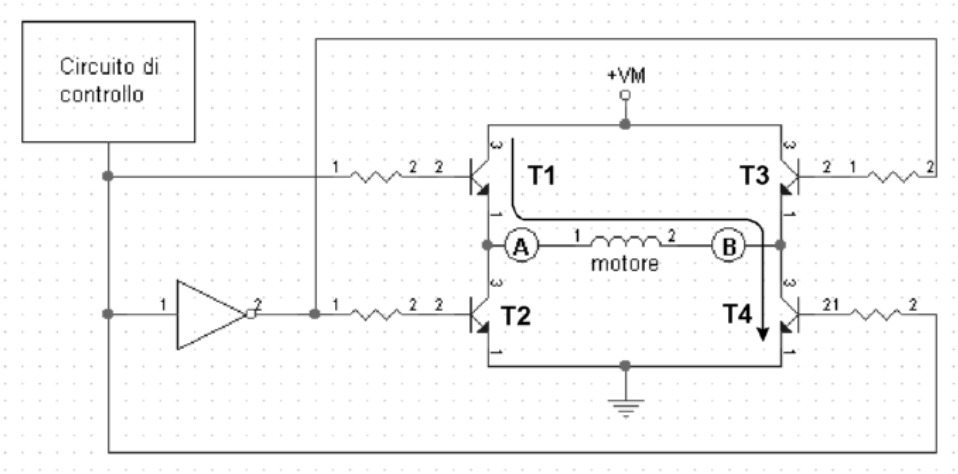


Fig. 12 – *E' qui riportato lo schema di principio per il pilotaggio di due delle quattro fasi di un motore passo-passo di tipo bipolare*

Si noti che per questi circuiti non è possibile pensare all'impiego di diodi di ricircolo, in quanto la polarità della corrente attraverso gli avvolgimenti del motore cambia verso ad ogni commutazione.

Per quanto riguarda correnti e tensioni, vi sono motori passo-passo che possono essere alimentati con valori di VM che vanno dai 5 ai 24 Volt, mentre le correnti variano a seconda della potenza del motore, e vanno tipicamente dai 250 mA fino ai 4 A.

In commercio esistono circuiti integrati dedicati in grado di attuare il controllo di motori passo-passo di tipo unipolare, bipolare oppure entrambi, con la possibilità di effettuare anche avanzamenti a mezzo passo. Recentemente, sono stati presentati circuiti di pilotaggio definiti "microstepping", in quanto permettono di fornire ad un motore passo-passo sequenze di impulsi tali da imprimere al rotore movimenti al di sotto del mezzo passo, ovvero a quarto o addirittura ad ottavo di passo. Questo viene ottenuto regolando opportunamente il valore della corrente in ciascuna fase, in modo da polarizzare (e quindi magnetizzare) solo parzialmente alcune delle espansioni polari dello statore, e quindi allineare i denti del rotore in più posizioni intermedie.

In molti di questi circuiti vengono altresì attuate tecniche sofisticate, come ad esempio la regolazione switching degli impulsi di pilotaggio (in modo da ridurre la potenza dissipata), la modulazione della tensione di alimentazione del motore (in modo da rendere più veloci le fasi di salita e discesa della corrente in ciascuna fase), la disponibilità di reti di "snubber" integrate (per migliorare la protezione dei transistor interni ed estenderne l'area operativa di sicurezza), ed altre ancora.

Questi circuiti possono essere pilotati da circuiti logici classici oppure tramite bus da parte di processori o controller.