

AZIONAMENTI ELETTRICI CON MOTORE A PASSO

INTRODUZIONE

Un motore a passo, o motore passo-passo, converte impulsi elettrici in movimenti angolari discreti.

Uno dei vantaggi più significativi è la sua capacità di essere controllato con precisione in un sistema ad anello aperto. Il controllo ad anello aperto significa che non è necessaria la retroazione della posizione. Questo tipo di controllo elimina la necessità di costosi dispositivi di trasduzione come gli encoder ottici. La posizione del rotore è conosciuta semplicemente tenendo traccia degli impulsi di passo in ingresso. È quindi una delle più versatili ed economiche forme di sistema di posizionamento.

Gli azionamenti con motore a passo sono tipicamente a controllo digitale a catena aperta e quindi più semplici e robusti dei sistemi ad anello chiuso.

Un motore a passo può essere una buona scelta ogni volta che è richiesto un movimento controllato. Possono essere utilizzati con vantaggio in applicazioni di potenza limitata in cui è necessario controllare l'angolo di rotazione, la velocità, la posizione e il sincronismo.

Applicazioni tipiche sono applicazioni ad alta risoluzione, robotica, meccanismi per l'avanzamento della carta, stampanti e plotter, piccole macchine utensili, piccoli azionamenti del settore automotive, ecc..

PREGI E DIFETTI

Vantaggi

- 1) L'angolo di rotazione è proporzionale all'impulso di ingresso;
- 2) può fornire piena coppia da fermo;
- 3) posizionamento preciso e ripetibilità del movimento poiché i buoni motori passo-passo hanno una precisione del 3–5% di un passo e questo errore non è cumulabile da un passo all'altro;
- 4) ottima risposta all'avviamento, arresto, inversione di marcia;
- 5) molto affidabile per merito dell'assenza di spazzole, pertanto la vita del motore dipende semplicemente dalla vita dei cuscinetti;
- 6) la risposta agli impulsi digitali di ingresso fornisce un controllo a catena aperta, rendendo l'azionamento semplice e non costoso;
- 7) è possibile ottenere una rotazione a velocità molto bassa con un carico direttamente accoppiato all'albero;
- 8) è possibile realizzare un'ampia gamma di velocità in quanto la velocità è proporzionale alla frequenza degli impulsi di ingresso.

Svantaggi

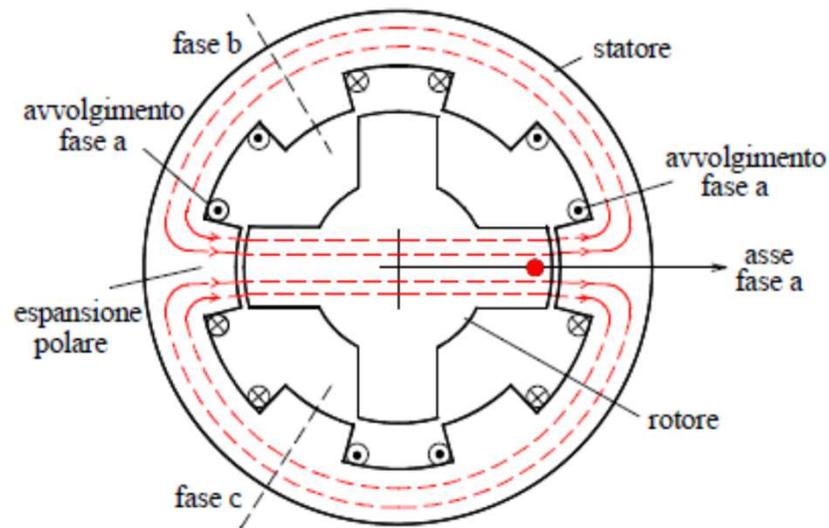
- 1) La rotazione a scatti comporta vibrazioni (soprattutto a basse velocità) che possono addirittura dar origine fenomeni di risonanza se il motore non è correttamente controllato;
- 2) non sono facili da far funzionare a velocità molto elevate.

MOTORI A PASSO A RILUTTANZA VARIABILE

Esistono tre tipologie fondamentali di motori a passo:

- a riluttanza variabile (VR),
- a magneti permanenti (PM),
- ibridi (HB).

I motori a passo a riluttanza variabile esistono da molto tempo. Il rotore è composto da molti denti in materiale ferromagnetico (acciaio dolce). Ciascuna fase di statore è composta da più avvolgimenti, disposti su coppie diametralmente opposte di espansioni polari (coppie polari).



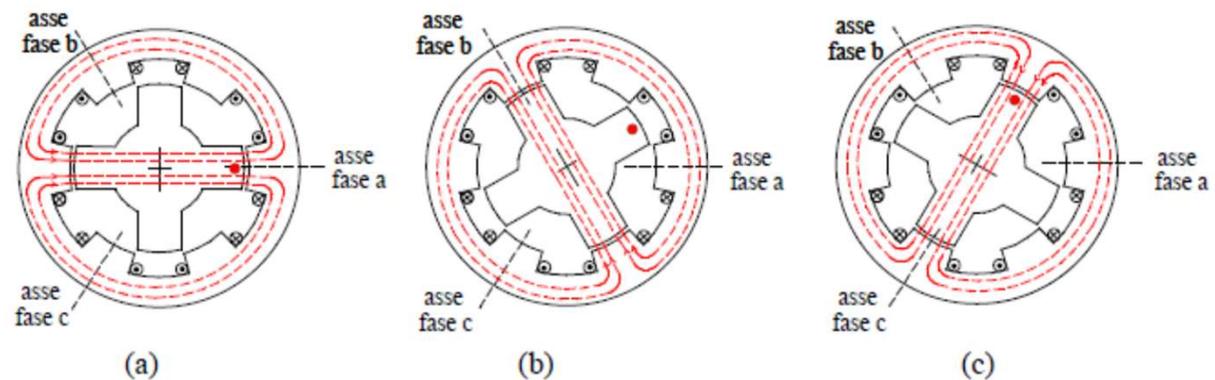
Con riferimento alla figura, si supponga di essere nella condizione indicata, con la fase *a* alimentata con una corrente continua e costante, a vuoto. In condizioni di equilibrio, il rotore si posiziona in modo che una sua coppia di denti si trovi allineata con l'asse della fase alimentata, a cui corrisponde una configurazione di equilibrio stabile a minima riluttanza.

MOTORI A PASSO A RILUTTANZA VARIABILE

Si tolga ora l'alimentazione alla fase a , e si alimenti la fase b . Sul rotore nasce una coppia che lo porta in rotazione in senso antiorario fino a far coincidere la coppia di denti di rotore più vicina alla fase b con l'asse della fase stessa, posizione alla quale corrisponde nuovamente la minima riluttanza del sistema.

La rotazione compiuta dal rotore è detta *angolo di passo* α_p ed il corrispondente *numero di passi/giro* è $N_p = 2\pi/\alpha_p$, che è un importante parametro dei motori a passo, in quanto indicativo della risoluzione angolare ottenibile durante il posizionamento di un carico meccanico direttamente collegato all'albero.

Ripetendo le operazioni per la fase c si ha un ulteriore passo in avanti (in senso antiorario), come rappresentato nella figura.

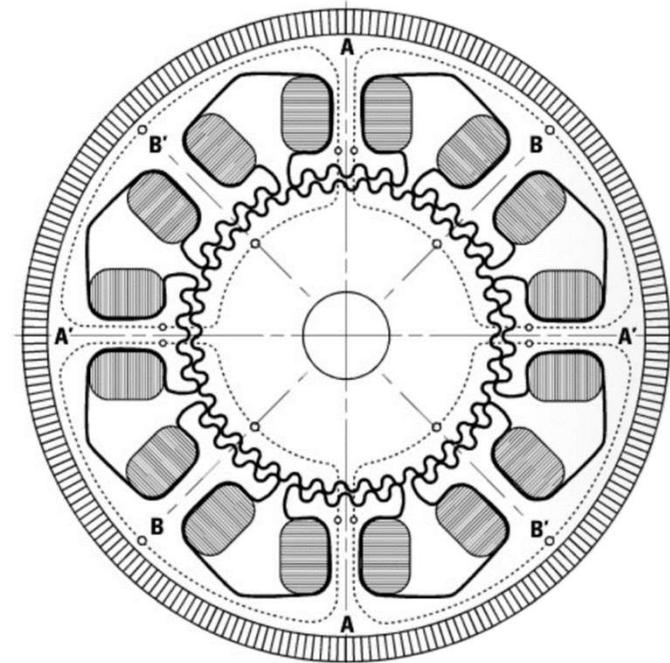


MOTORI A PASSO A RILUTTANZA VARIABILE

Si comprende facilmente che alimentando nuovamente la fase a si ha un ulteriore passo in avanti che porta il rotore in una posizione analoga alla (a) della figura della dia precedente, ma ruotato di un passo di rotore (90° nell'esempio di figura). Pertanto il numero di passi necessari perché il rotore possa effettuare un giro completo è $N_p = D_r \cdot F_s$, dove D_r è il numero di denti di rotore e F_s è il numero di fasi di statore.

Una caratteristica spesso richiesta è quella di avere una elevata risoluzione nel posizionamento e di conseguenza un piccolo angolo di passo.

Questo si può ottenere aumentando il numero di denti di rotore, fino a quando la complessità meccanica non ne intacchi la robustezza o l'economicità della produzione. In alternativa, o in aggiunta, si può aumentare il numero di fasi di statore; in questo caso il limite è costituito dallo spazio a disposizione e dal costo del convertire, che dipende dal numero di componenti a semiconduttore (due per ogni fase).



MOTORI A RILUTTANZA COMMUTATA

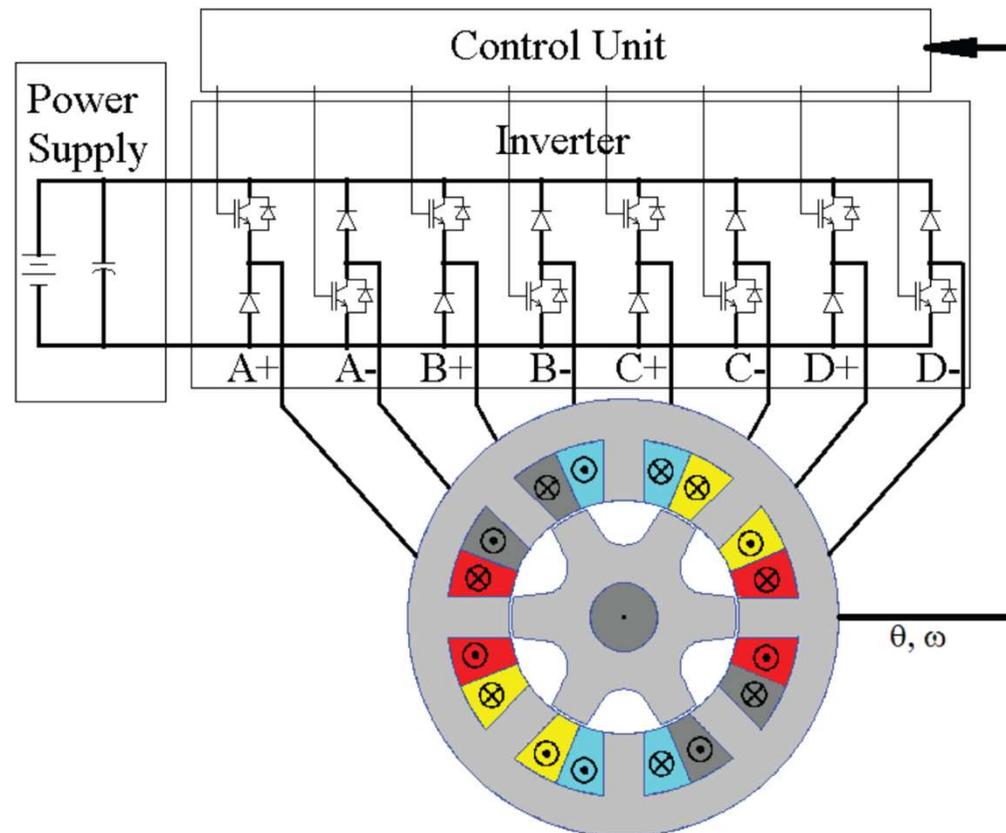
I motori a riluttanza commutata (SRM) sono un sottoinsieme dei motori a passo VR (non c'è però comune accordo su questa classificazione). Le configurazioni più comuni sono 6/4 (6 poli di statore e quattro denti di rotore) e 8/6, mostrata in figura. Il convertitore più comunemente utilizzato è quello con struttura asimmetrica mostrato in figura.

Vantaggi principali:

- semplicità costruttiva,
- robustezza,
- affidabilità,
- basso costo,
- alto rendimento,
- facile asportazione del calore,
- basso momento di inerzia.

Svantaggi principali:

- ondulazione di coppia,
- rumore acustico.



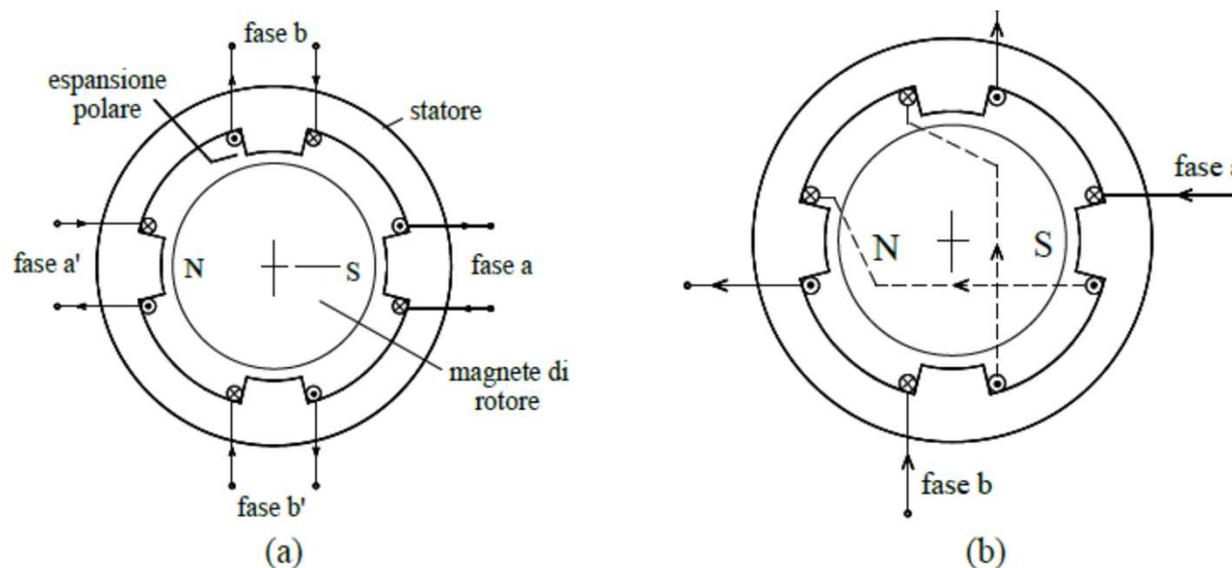
MOTORI A RILUTTANZA COMMUTATA

Rispetto ai motori a passo VR, gli SRM sono progettati per applicazioni differenti e con differenti requisiti di prestazione. I motori a passo VR sono progettati per il controllo di posizione in catena aperta (dove sono importanti la risoluzione e la certezza del passo) e il controllo di velocità in applicazioni di bassa potenza, dove il rendimento non è un requisito importante. Al contrario, gli SRM sono caratterizzati da angoli di passo più elevati e vengono utilizzati in azionamenti a velocità variabile per i quali sia richiesto un funzionamento efficiente in un ampio intervallo di velocità e coppia e dove la densità di potenza e il rendimento sono prioritari. Inoltre richiedono il rilevamento della posizione del rotore.

Nello statore degli SRM non c'è mai sovrapposizione delle bobine tra fasi successive, cioè le fasi sono sempre indipendenti e quindi, in caso di guasto di una o più fasi, il motore può continuare a funzionare a prestazioni ridotte. L'ondulazione di coppia è un problema tipico degli SRM. Mentre nei motori a passo VR il problema viene affrontato aumentando il numero di fasi, negli SRM si può aumentare il numero di poli sia nello statore che nel rotore, ma questo riduce la coppia media da essi prodotta e quindi si deve cercare un compromesso fra i due requisiti, cioè coppia elevata e ondulazione ridotta.

MOTORI A PASSO A MAGNETI PERMANENTI

Nei motori a passo a magneti permanenti (PM) il rotore non è più caratterizzato da denti, ma su di esso sono montati magneti permanenti. Quando una fase è percorsa da corrente, i suoi conduttori risentono di una forza che tende a disporre il piano delle spire perpendicolarmente al campo magnetico prodotto dal rotore; per il principio di azione e reazione, si muoverà naturalmente il rotore, ruotando fino ad allineare il suo asse con quello della fase alimentata. Con riferimento ad esempio alla figura (a), alimentando in successione le fasi *a b a' b'* si ottiene una rotazione in senso antiorario con passi di 90° .



MOTORI A PASSO A MAGNETI PERMANENTI

Per aumentare le amperspire coinvolte nella produzione di coppia è possibile anche una configurazione con gli avvolgimenti collegati in serie a coppie, come illustrato nella figura (b). In tal caso vi sono solo due fasi, ma il convertitore che le alimenta deve essere in grado di imporre correnti di ambo i versi, soluzione che comporta generalmente un aggravio dei costi. Nell'esempio di figura la risoluzione nel posizionamento è piuttosto grossolana. Raddoppiando sia le fasi di statore che le coppie polari di rotore si ottiene un motore con angolo di passo di 45° . Aumentando ancora le fasi di statore e le coppie polari di rotore si può ridurre ulteriormente l'angolo di passo. Esistono però limiti fisici sia al numero di denti di statore che, soprattutto, al numero di coppie polari, per cui si può concludere che a parità di complessità tecnologica e di produzione la risoluzione dei motori PM rispetto ai motori VR è sicuramente peggiore. Inoltre, la coppia prodotta è limitata dalla massima induzione al traferro, a sua volta legata alla induzione residua dei magneti impiegati nel rotore (generalmente, per contenere i costi, si utilizzano normali ferriti, che non presentano né induzioni né campi coercitivi particolarmente elevati).

MOTORI A PASSO A MAGNETI PERMANENTI

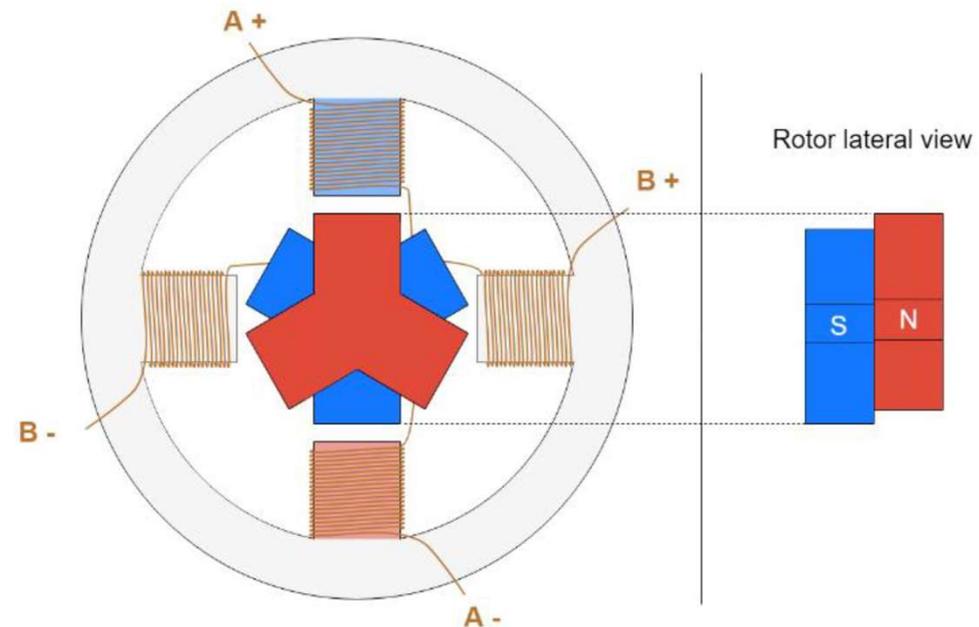
Un vantaggio dei motori a passo PM è che vi sono per il rotore posizioni di equilibrio pari al numero di passi/giro anche in caso di assenza di eccitazione delle fasi di statore. La coppia in assenza di eccitazione è detta *coppia di tenuta* (detent torque) e solitamente varia tra il 5% ed il 20% della coppia che si esplica quando le fasi sono alimentate. In alcune applicazioni, ove questa caratteristica viene sfruttata, si sagomano opportunamente i denti per accentuare l'anisotropia di statore e massimizzare la coppia di tenuta; in altri casi essa introduce solo un indesiderato fenomeno di *puntamento* (cogging torque) e si cerca di minimizzarla, sempre agendo sulla conformazione dei denti di statore.

Al termine dell'esecuzione di ogni singolo passo, il rotore si attesta nella posizione di equilibrio dopo un transitorio i cui parametri caratteristici (sovraelongazione e smorzamento) dipendono dalle caratteristiche del motore e del convertitore che lo alimenta. Nei motori a passo PM la presenza del magnete ha per effetto secondario un aumento dello smorzamento, che consente posizionamenti più rapidi rispetto a quelli dei motori VR.

MOTORI A PASSO IBRIDI

Il rotore dei motori a passo ibridi (HB) è un ibrido fra i VR e i PM e presenta i vantaggi sia dei VR che dei PM, cioè valori elevati di risoluzione, velocità e coppia. La costruzione è però più complessa e pertanto i costi sono maggiori.

Il rotore è costituito da due elementi affiancati con i denti sfalsati. La figura mostra un semplice esempio della struttura di questo motore. Quando la bobina A è alimentata, un dente dell'elemento con polarità N si allinea con l'espansione di statore con polarità S. I motori reali hanno una struttura più complessa, con molti più denti, che consente di ottenere un piccolo angolo di passo, fino a 0.9° .



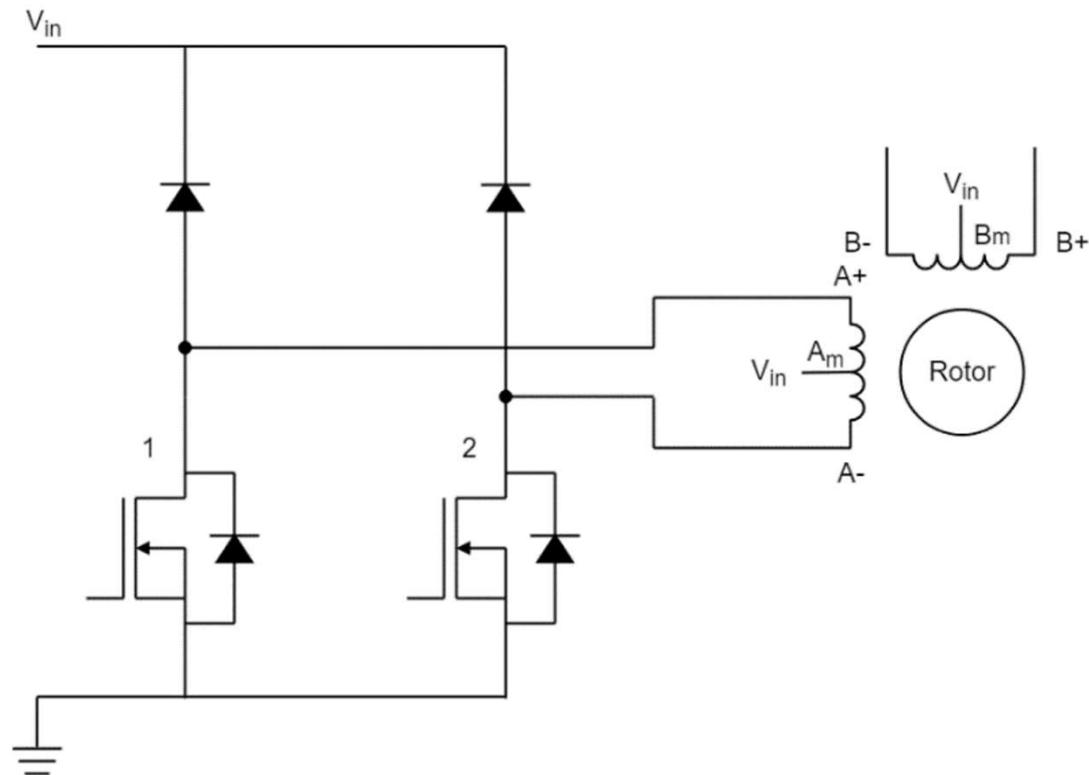
STATORE DEI MOTORI A PASSO

Lo statore dei motori a passo può essere avvolto secondo due schemi: 1) unipolare, 2) bipolare.

Schema unipolare

Un conduttore è connesso al punto centrale della bobina, come mostrato in figura. Il conduttore centrale (A_m) è connesso alla tensione di ingresso V_{in} . A seconda che sia attivo il transistor 1 o il 2, la corrente fluisce da A_m ad $A+$ oppure da A_m ad $A-$, permettendo l'inversione della direzione del campo magnetico.

Sono necessari solo due transistor, ma lo svantaggio è che viene utilizzato solo metà del rame per volta, il che significa che, a parità di corrente, l'intensità del campo magnetico è metà rispetto al caso in cui venisse utilizzato tutto il rame contemporaneamente.

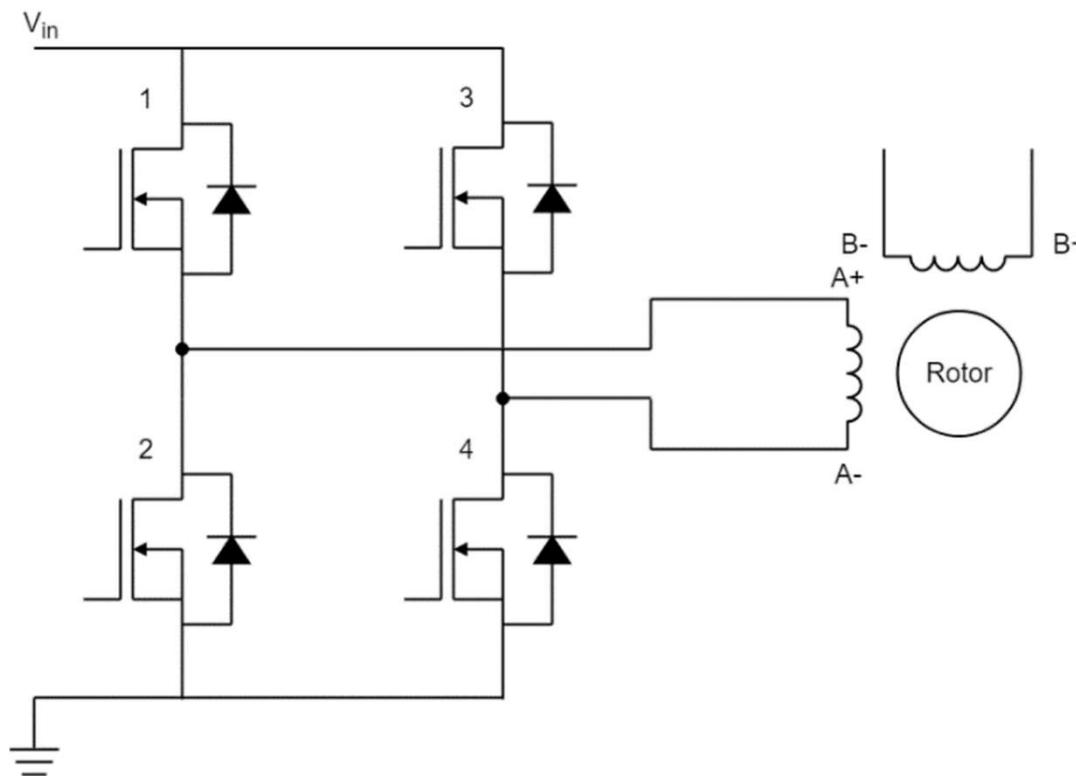


STATORE DEI MOTORI A PASSO

Schema bipolare

Ogni bobina ha solo due conduttori disponibili e per controllare la direzione della corrente è necessario utilizzare un ponte ad H, come mostrato nella figura. Se sono attivi i transistor 1 e 4 la corrente fluisce da A+ ad A-; viceversa, se sono attivi i transistor 2 e 3 la corrente fluisce da A- ad A+ generando un campo magnetico in direzione opposta.

Questa soluzione richiede un circuito di alimentazione e controllo più oneroso, ma consente al motore di erogare la massima coppia a parità di rame utilizzato.

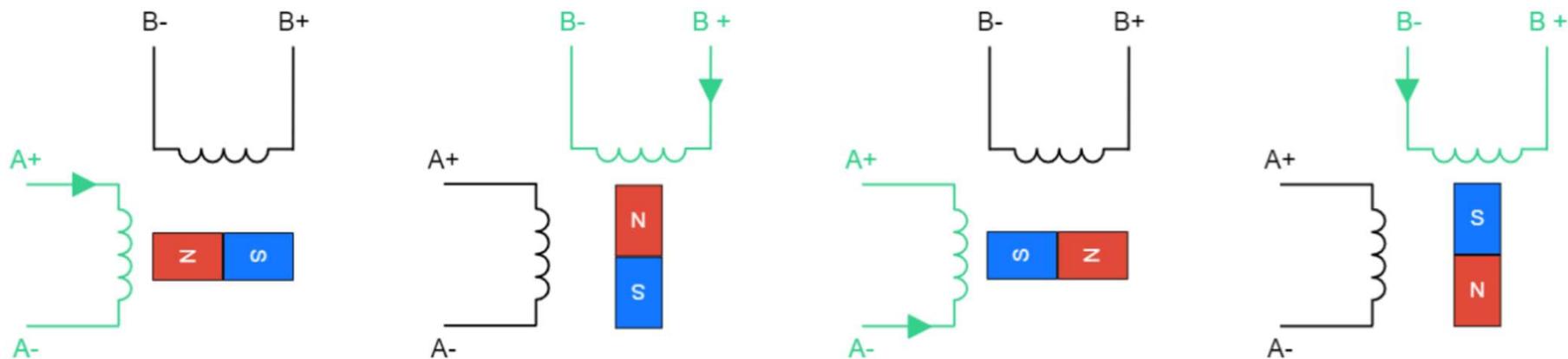


METODI DI ALIMENTAZIONE

Ci sono quattro modi possibili di alimentazione del motore: 1) eccitazione a singola fase ('one-phase-on' o 'wave mode'), 2) eccitazione a doppia fase ('two-phase-on' o 'full-step mode'), 3) eccitazione alternata a singola e a doppia fase ('half-step mode'), 4) eccitazione con controllo della corrente ('microstepping mode').

Eccitazione a singola fase

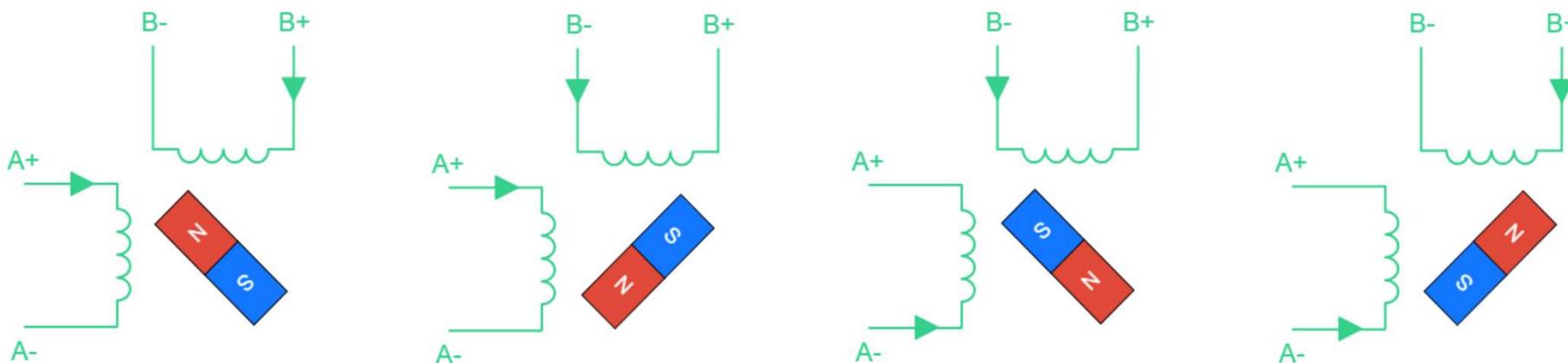
È il metodo più semplice perché viene alimentata una singola fase per volta, come esemplificato nello schema di figura, dove il rotore ruota a passi di 90°.



METODI DI ALIMENTAZIONE

Eccitazione a doppia fase

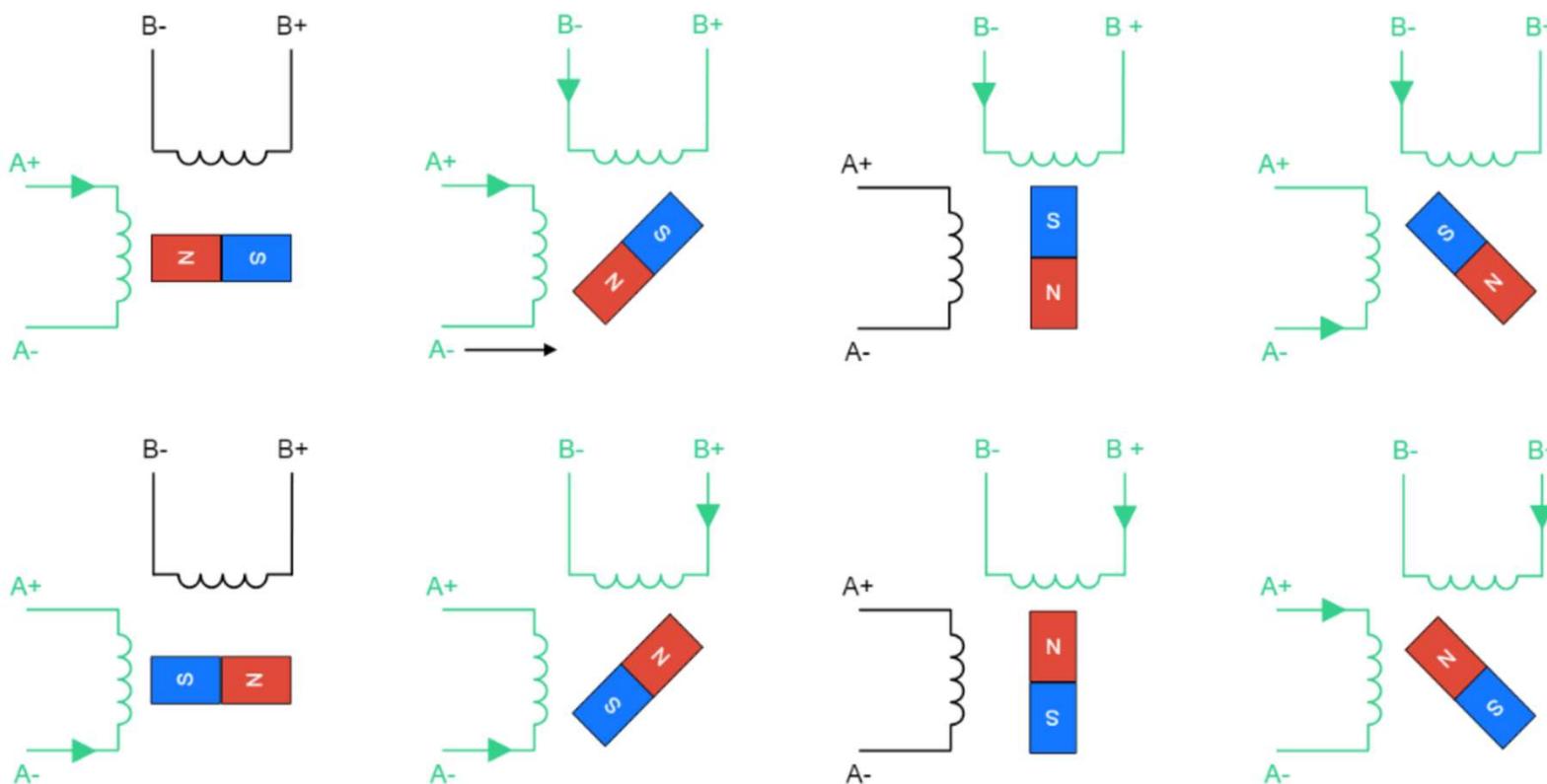
Questo metodo prevede l'alimentazione contemporanea di due fasi, come esemplificato nello schema di figura. Anche in questo caso il rotore ruota a passi di 90° , ma il motore è in grado di produrre una coppia di valore più elevato perché nel motore fluisce più corrente. Una differenza ancora più importante rispetto all'eccitazione a singola fase sta nel fatto che le oscillazioni di assestamento durante i transitori sono molto più smorzate. Due fasi sono sempre eccitate e connesse alla stessa sorgente di alimentazione, quindi si forma un anello chiuso, nel quale si induce una f.e.m. per effetto delle variazioni di induttanza dovute all'oscillazione del rotore. Tale f.e.m. provoca una corrente di circolazione che tende ad opporsi alla causa che la genera, smorzando l'oscillazione meccanica.



METODI DI ALIMENTAZIONE

Eccitazione alternata a singola e a doppia fase

Il metodo è una combinazione dei due precedenti e consente di dimezzare l'angolo di passo. Il metodo è esemplificato nella figura, dove l'angolo è ridotto a 45° . L'inconveniente è che la coppia prodotta dal motore è affetta da una maggiore ondulazione, dato che è più elevata quando entrambe le fasi sono alimentate e inferiore quando è alimentata una sola fase.



METODI DI ALIMENTAZIONE

Eccitazione con controllo della corrente

Questo metodo può essere visto come un miglioramento del metodo precedente, perché consente di ridurre ulteriormente l'angolo di passo e teoricamente eliminare l'ondulazione di coppia. Questo viene ottenuto controllando l'intensità della corrente che fluisce in ciascuna fase. L'utilizzo di questo metodo richiede un sistema più complesso rispetto ai precedenti.

Il metodo è ben esemplificato nella figura, dove l'angolo di passo viene ridotto a 22.5° . Con questo metodo si può andare anche oltre, ottenendo una risoluzione di posizione molto elevata, ma a costo di un sistema più complesso per controllare il motore. Inoltre la coppia generata ad ogni passo è inferiore.

