

27.1 Descrizione

I motori a corrente continua presentano il vantaggio di poter essere facilmente regolati in velocità per mezzo della variazione della tensione applicata ai morsetti.

D'altra parte la presenza del contatto strisciante fra spazzola e collettore può essere fonte di inconvenienti, che in alcune applicazioni non possono essere accettati.

Fra tali inconvenienti citiamo:

- i radiodisturbi prodotti dallo scintillio, che si propagano nell'ambiente circostante, sia sotto forma di onde elettromagnetiche, sia sotto forma di alte frequenze condotte dai cavi di alimentazione;
- il consumo delle spazzole, che richiede la loro sostituzione periodica. Quest'operazione è spesso scomoda e talvolta impossibile se il motore si trova all'interno di apparecchiature chiuse;
- l'usura del collettore, che peggiora progressivamente la qualità del contatto strisciante. Nelle macchine di grande potenza si prevede una nuova tornitura del collettore dopo alcuni anni di funzionamento, mentre nelle piccole macchine questa operazione non è prevista ed il degrado del collettore coincide con la fine della vita operativa del motore stesso;
- la produzione di polverino, costituito da particelle di polvere di grafite e di rame ossidato, che può creare problemi in apparecchiature sofisticate.

Fig. 27.1
Motori
brushless di
varie dimensioni
(MAE).

Per conservare i vantaggi del motore a corrente continua e per evitare gli inconvenienti dovuti alla presenza delle spazzole, viene utilizzato il motore *brushless* (senza spazzole) (fig. 27.1).

Questo motore è alimentato in corrente continua e viene regolato in velocità per mezzo della variazione della tensione ai suoi morsetti; le sue caratteristiche esterne $C - \omega$ e $C - I$ sono simili a quelle del motore a corrente continua a collettore.

Anche per il funzionamento del motore brushless è necessaria la commutazione, cioè l'inversione della corrente nelle varie bobine; questa funzione viene realizzata per mezzo di componenti elettronici statici che sostituiscono il sistema spazzole-collettore.

In fig. 27.2 è rappresentato schematicamente un motore brushless.

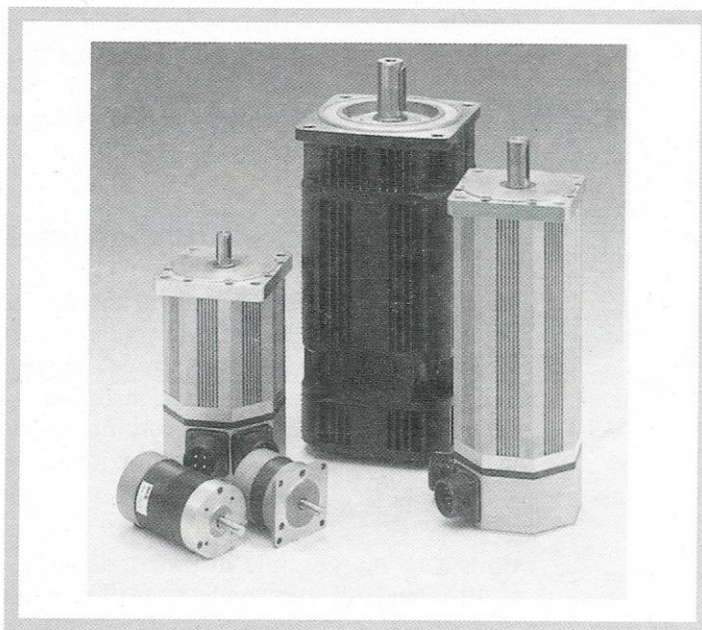
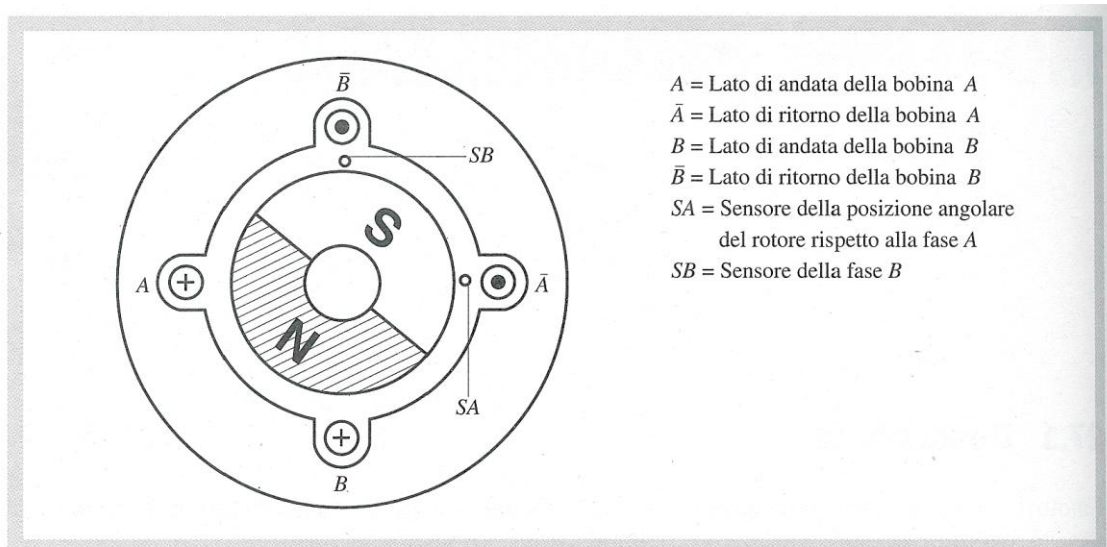


Fig. 27.2
Schema di un
motore
brushless.



Notiamo innanzitutto che l'avvolgimento di armatura è sullo statore, perché deve essere connesso ai circuiti di commutazione, posti esternamente al motore.

L'avvolgimento di statore può essere bifase o trifase e viene collegato secondo lo schema unipolare oppure bipolare, analogo a quello utilizzato per i motori step.

I poli magnetici si trovano sul rotore e sono realizzati per mezzo di magneti permanenti.

Nel motore brushless è presente un dispositivo di sensori, SA ed SB , che rileva la posizione angolare del rotore, ed in funzione di questa determina il senso della corrente da inviare in ciascuna bobina. Con il procedere della rotazione, le correnti nelle bobine vengono commutate in modo che la loro interazione con il campo magnetico di rotore produca coppia sempre nello stesso senso.

I motori brushless possono essere realizzati in una grande varietà di tipi, che differiscono tra loro per il numero delle fasi statoriche, il numero dei poli, lo schema di pilotaggio, il tipo di sensori per rilevare la posizione angolare del rotore, ecc.

Nel seguito ci riferiamo ad un motore bifase, a due poli, con circuito di pilotaggio bipolare e rilevamento magnetico della posizione del rotore (figg. 27.2 e 27.3); i concetti analizzati in questo caso potranno essere estesi a motori di qualsiasi tipo.

27.2 Principio di funzionamento

Nella fig. 27.2 è rappresentato il motore brushless bifase, a due poli.

Si riconoscono le due bobine che costituiscono le fasi statoriche A e B a 90° tra loro, i due poli del rotore e i due sensori magnetici SA ed SB che rilevano la rispettiva presenza del polo sud e sono allineati con le fasi.

I sensori magnetici sono costituiti da sonde ad effetto Hall, dispositivi a semiconduttore la cui tensione di uscita è proporzionale al valore istantaneo dell'induzione che li investe

$$V_u = K \cdot B$$

dove K è una costante di proporzionalità.

Il segnale di una sonda di Hall è indipendente dalla velocità del rotore, ed è presente anche a rotore fermo.

Lo schema di fig. 27.3 rappresenta il pilotaggio del motore, con collegamento bipolare; le frecce indicano il senso positivo della corrente.

Quando il sensore di una fase è affacciato al polo sud, vengono posti in conduzione i transistori dispari (corrente positiva nella fase), mentre quando è affacciato al polo nord vengono posti in conduzione i transistori pari (corrente negativa).

Nelle figg. 27.2 e 27.3 entrambi i sensori sono affacciati al polo sud, ed entrambe le correnti sono positive.

L'interazione tra le correnti nelle cave e l'induzione del rotore produce forze tangenziali dirette tutte in senso antiorario (fig. 27.4a).

Il modulo della forza generata da ciascuna cava è pari al ben noto prodotto

$$F = n \cdot I_b \cdot B \cdot l$$

dove n è il numero dei conduttori di una cava, pari al numero di spire di una bobina, I_b è la corrente nella bobina, B è l'induzione al traferro prodotta dal magnete permanente di rotore ed l è la lunghezza attiva del conduttore.

La coppia generata dal motore è pari al prodotto di F per il numero delle cave Z e per il raggio del rotore

$$C = Z \cdot F \cdot r = Z \cdot n \cdot I_b \cdot B \cdot l \cdot r = N_c \cdot I_b \cdot B \cdot l \cdot r$$

dove $N_c = Z \cdot n$ è il numero dei conduttori attivi.

Misurando la corrente in ampere, l'induzione in tesla e le lunghezze in metri, si ricava la coppia in $N \cdot m$.

La corrente I_b di una bobina è data dal rapporto tra la corrente totale I assorbita dal motore ed il numero delle fasi Q

$$I_b = \frac{I}{Q}$$

Sostituendo nell'espressione della coppia otteniamo

$$C = \frac{N_c \cdot B \cdot l \cdot r}{Q} \cdot I = K_T \cdot I$$

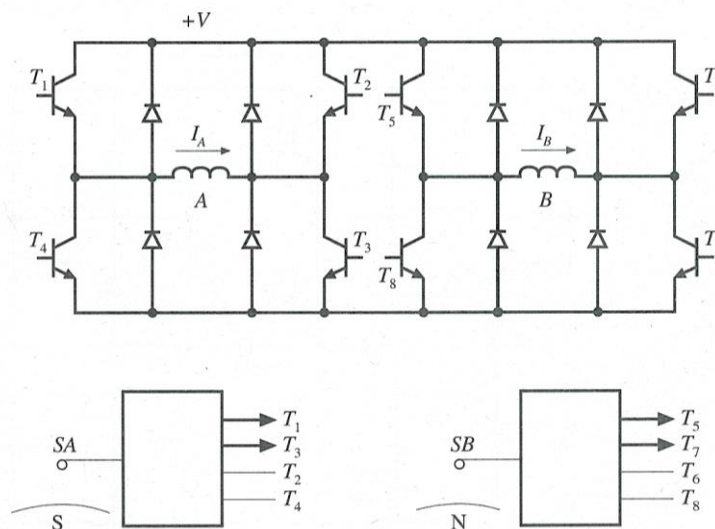


Fig. 27.3
Circuito di pilotaggio bipolare del motore brushless bifase.

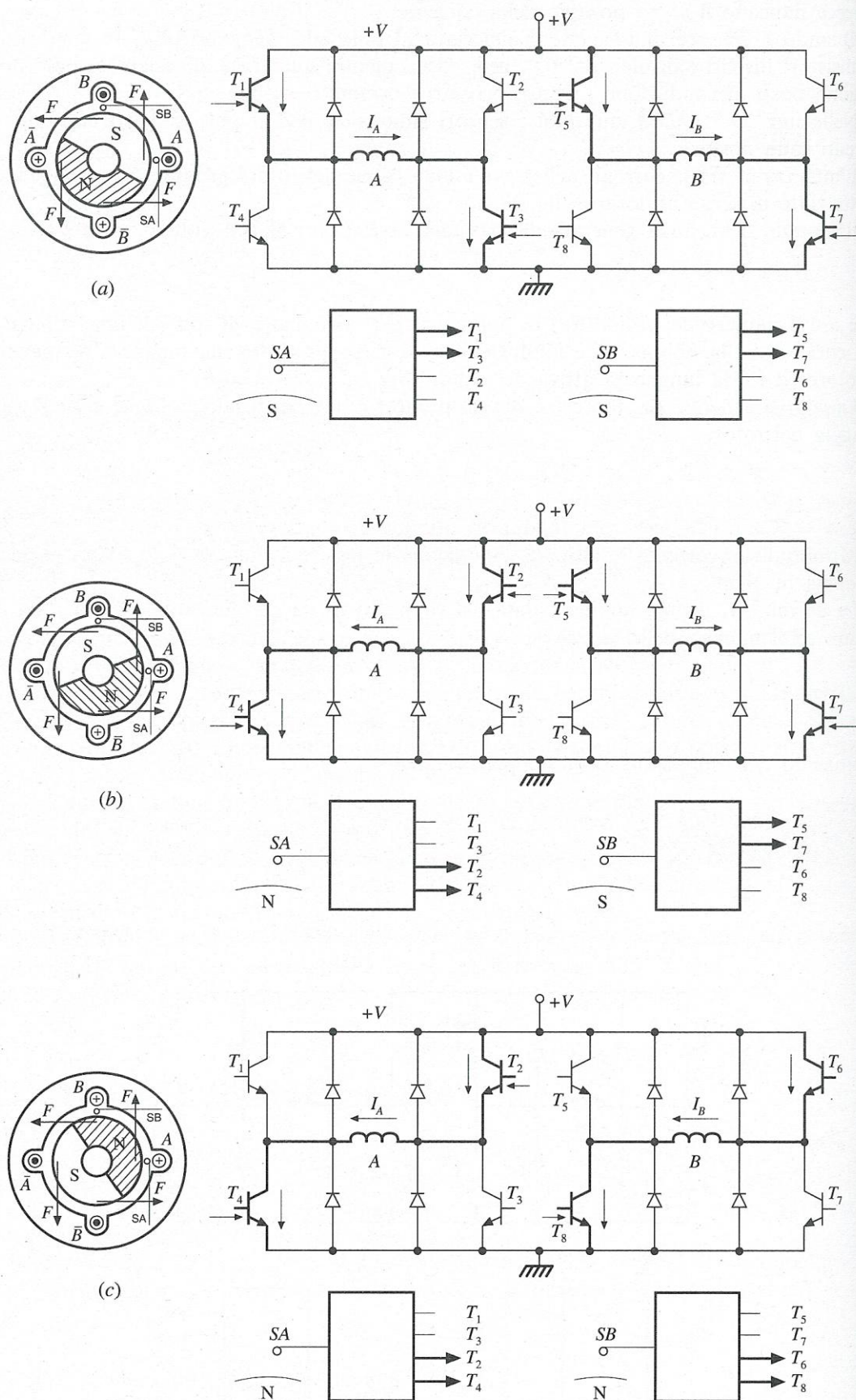


Fig. 27.4
Commutazioni
del motore
brushless in
funzione delle
successive
posizioni.

Il parametro

$$K_T = \frac{N_c \cdot B \cdot l \cdot r}{Q}$$

è la costante di coppia del motore, che si misura in Nm/A.

Per effetto della coppia C il rotore si pone in movimento in senso antiorario, finché, dopo aver percorso un certo angolo, il senso dei poli magnetici sotto i conduttori della fase A si inverte (fig. 27.4b).

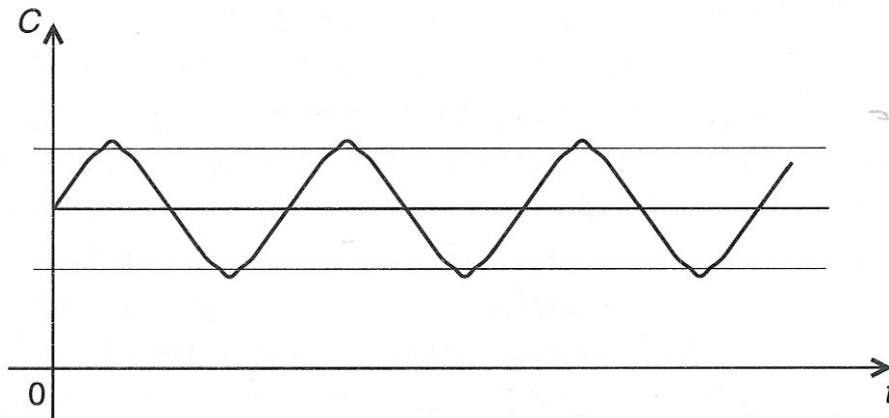
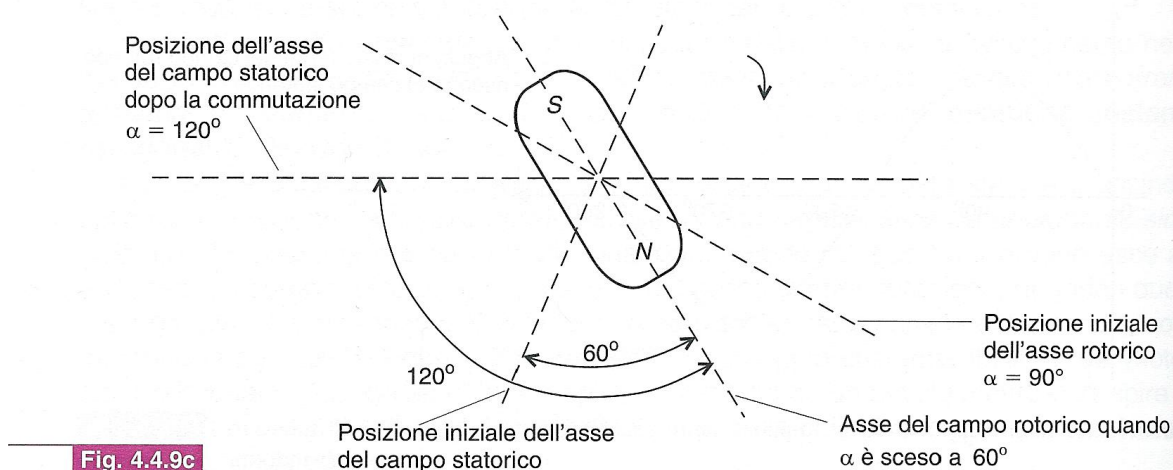
Affinché la fase A continui a produrre coppia nello stesso senso è necessario capovolgere la corrente I_A ; a tale scopo provvede il sensore SA , che rilevando il polo nord disattiva i transistori dispari ed attiva quelli pari.

In fig. 27.4c la rotazione porta il polo nord in corrispondenza del sensore SB , che commuta la fase B .

Grazie al processo descritto, il pilotaggio commuta progressivamente le fasi in modo che le correnti, interagendo con l'induzione di rotore, producano sempre coppia nello stesso senso.

Per il **pilotaggio** del motore brushless il commutatore elettronico impiega *due tecniche fondamentali*, che definiscono due diversi motori: i *trapezoidali* e i *sinusoidali*.

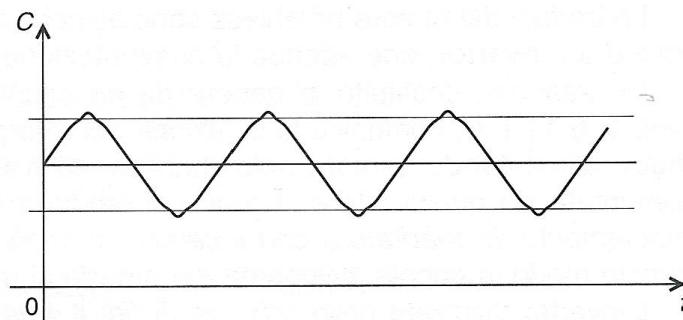
La differenza più rilevante fra le due categorie di motori si può sintetizzare dicendo che *il motore trapezoidale è realmente un servomotore a c.c.*, mentre *il motore sinusoidale è sostanzialmente un motore sincrono trifase, funzionante in c.a.* (tanto che spesso viene denominato anche *servomotore senza spazzole in c.a.*).



Ondulazione della coppia in uscita dal motore brushless.

Fig. 4.4.9d

Motore trapezoidale (*D.C. brushless motor*). Il motore trapezoidale prende il nome dalla forma della f.e.m. che nel pilotaggio con tecnica trapezoidale viene applicata agli avvolgimenti statorici: l'andamento trapezoidale ha lo scopo di eliminare l'ondulazione di coppia che si crea con la forma d'onda sinusoidale della f.e.m. indotta.

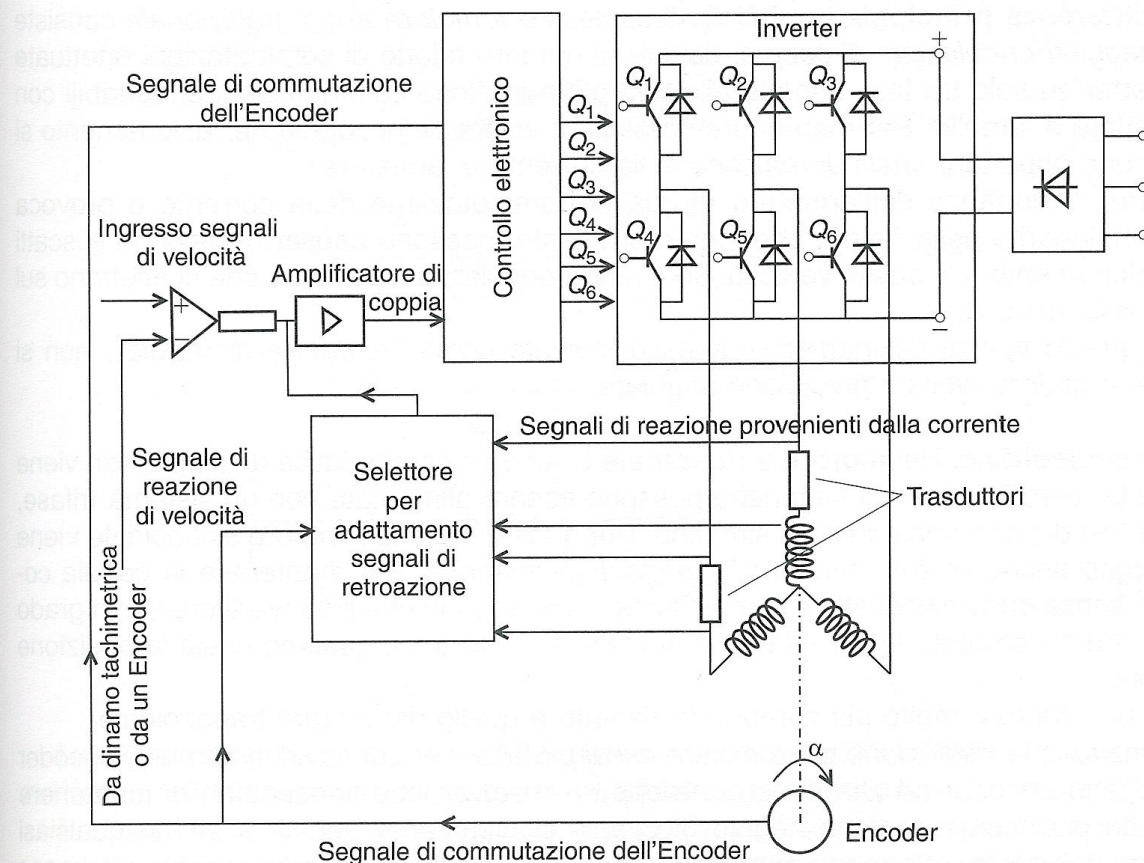


Ondulazione della coppia in uscita dal motore brushless. **Fig. 4.4.9d**

Infatti abbiamo visto che per mantenere la coppia costante occorrerebbe che i campi magnetici statorico e rotorico fossero costanti in ampiezza e sempre ortogonali fra loro, e che, essendo quest'ultima condizione irrealizzabile, nel motore brushless si producono delle piccole variazioni di coppia in uscita, che sono dette *ondulazioni di coppia*, che dipendono dalla velocità del motore, dal numero dei segmenti di commutazione e dai poli magnetici (*fig. 4.4.9d*).

Le ondulazioni di coppia vengono ridotte al minimo se si interviene nella progettazione del motore, facendo in modo che la forma d'onda della f.e.m. indotta durante la rotazione da sinusoidale si appiattisca e diventi trapezoidale, cosa nient'affatto facile da realizzare. La presenza di non linearità nella forma d'onda della f.e.m. provoca dei piccoli contraccolpi nei punti di commutazione, che alle basse velocità possono diventare notevoli, e l'ondulazione di coppia residua provoca una modulazione della velocità a cui è azionato il carico.

Uno **schema semplificato dell'azionamento con un motore trapezoidale trifase** è rappresentato in *fig. 4.4.9e*.



Schema di un azionamento con motore brushless trapezoidale. **Fig. 4.4.9e**

La **differenza principale** tra il *D.C. brushless* e il *motore a c.c. tradizionale* consiste nelle *maggiori ondulazioni di coppia*, dovute al numero ridotto di commutazioni effettuate dall'inverter su solo tre fasi, rispetto alle ben più numerose commutazioni effettuabili con un collettore a lamelle. Per mantenere costante il valore della coppia nell'azionamento si introducono opportuni *anelli di reazione* della corrente di armatura.

Inoltre, l'induttanza dell'armatura ritarda la commutazione della corrente e provoca delle non linearità nella f.e.m., che, come si è visto, possono causare rotazione a scatti nel funzionamento alle basse velocità, ed ulteriori ondulazioni di coppia che si riflettono sul valore della velocità.

Per questo tipo di azionamento, spesso indicato come "*attuatore di coppia*", non si richiede in genere elevata precisione angolare.

Motore sinusoidale. Nel **motore sinusoidale** invece, la caratteristica di coppia non viene modificata, perciò le tre fasi statoriche possono essere alimentate con un sistema trifase, come le fasi di un normale motore sincrono. Per questa ragione il motore sinusoidale viene denominato anche *motore sincrono a magneti permanenti*. Per mantenere la coppia costante e senza ondulazioni alle basse velocità, è necessario che il convertitore sia in grado di generare tre correnti uguali ed esattamente a 120° elettrici, qualunque sia la posizione del rotore.

L'azionamento è molto più complicato rispetto a quello del motore trapezoidale.

Innanzitutto la *risoluzione deve essere assai più alta*, per cui anziché semplici encoder si impiegano encoder ad alta risoluzione oppure *resolver*, che consentono di mantenere con molta più accuratezza un angolo di coppia praticamente uguale a 90° in qualsiasi posizione del rotore, ottenendo di conseguenza una rotazione uniforme anche alle basse velocità e una ondulazione di coppia trascurabile.

La *regolazione di velocità* viene effettuata per mezzo di *convertitori di frequenza statici indiretti* (§ 5.2.10), che utilizzano inverter a commutazione forzata (controllo *PWM*).

Per gestire i segnali provenienti dal resolver, può essere impiegato un *microprocessore*, che elabora gli ingressi e li trasforma in segnali di passo e di direzione. Il segnale di velocità è spesso dedotto da quello della posizione.

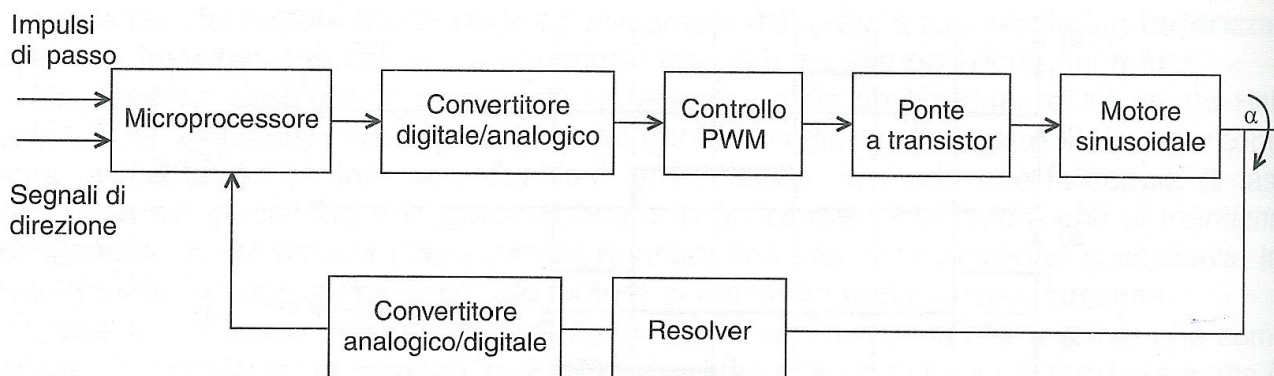


Fig. 4.4.9g Schema a blocchi dell'azionamento di un motore brushless sinusoidale.

Lo **schema a blocchi semplificato dell'azionamento per un motore sinusoidale trifase** è rappresentato in *fig. 4.4.9g*.

Sia i motori **trapezoidali** che quelli **sinusoidali**, nonostante le differenze messe in rilievo, per lo più vengono entrambi genericamente indicati dalle case costruttrici di motori come motori brushless, e classificati fra i motori a c.a.

Gli azionamenti con motore brushless sono tra i più diffusi nelle applicazioni in cui occorre elevata dinamica e precisione (robot, azionamenti per assi di macchine utensili) e in genere in tutti quegli impieghi che richiedono velocità, scarsa manutenzione, affidabilità, precisione peso ed ingombro ridotti (apparecchiature elettromedicali, aeronautiche, ecc.).

Rispetto ai motori a c.c. tradizionali l'assenza del collettore e delle spazzole rende la macchina meno delicata e più affidabile, riduce l'usura, elimina i pericolosi scintillii durante la commutazione e consente di adottare valori di tensione di esercizio maggiori perché non c'è più il pericolo di scarica tra le lamelle.

Le perdite elettriche oltre che per l'assenza delle spazzole sono ridotte anche per l'assenza degli avvolgimenti di eccitazione e degli avvolgimenti ausiliari presenti nelle macchine a c.c. L'assenza di avvolgimenti rotorici permette la realizzazione di rotor più piccoli e leggeri, e di forme estremamente varie, che si adattano ad applicazioni particolari (rotori a disco, bassissimi e con piccolissima inerzia, rotor a guscio, ecc.). Quasi tutte le perdite sono concentrate sullo statore, che è facilmente raffreddabile, quindi è possibile il funzionamento con sovraccarichi anche notevoli. Il commutatore elettronico anziché elettromeccanico consente velocità massime raggiungibili maggiori.

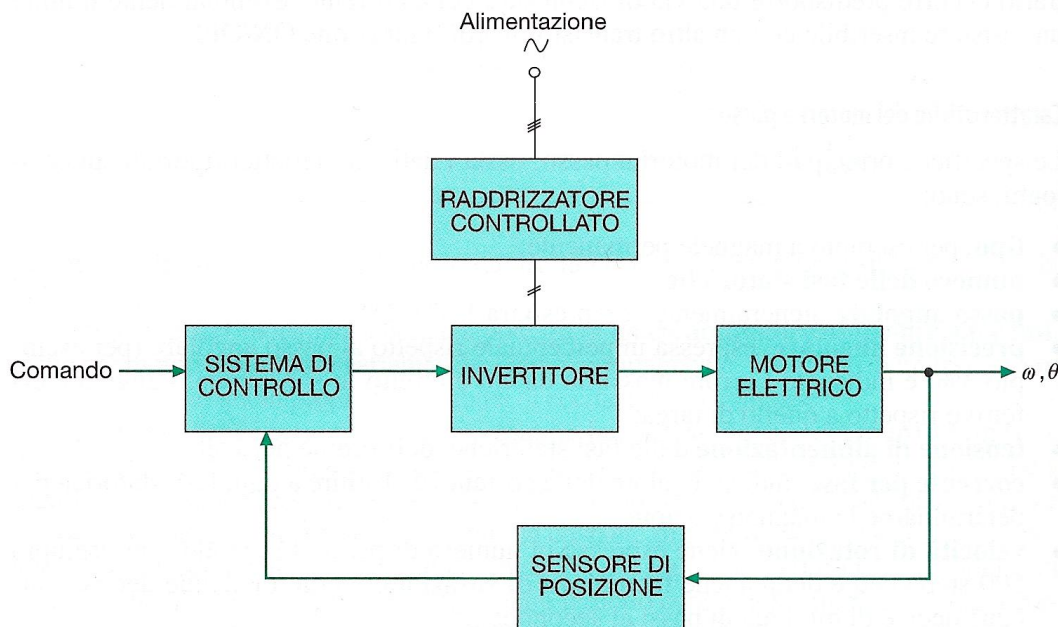
Per contro, se non si prende alcun provvedimento, si hanno ondulazioni di coppia e di velocità dell'ordine del 13% dei rispettivi valori massimi, e la caratteristica di coppia risulta affetta da discontinuità dovute al tempo finito di commutazione. Perciò tutti gli azionamenti brushless devono prevedere anelli di reazione per la stabilizzazione della coppia.

Rispetto ai motori asincroni, a parità di potenza di targa e di ingombro, i motori brushless presentano coppia e accelerazioni maggiori.

Gli inconvenienti degli azionamenti brushless sono essenzialmente legati ai costi, compreso il costo dei trasduttori ad alta risoluzione, e al problema dello smaltimento del calore nei sensori di posizione.

30.5 Azionamenti con motori brushless

Il **motore brushless** (letteralmente "senza spazzole") non è propriamente una macchina elettrica nel senso tradizionale del termine, ma un sistema a catena chiusa, di cui il motore elettrico è solo un componente che, considerato isolatamente, non potrebbe funzionare. Lo schema a blocchi, di massima, di un azionamento brushless è riportato nella **figura 30.27**.



4.4.10 Motori passo passo (Step-by-step motor, Stepping motor)

Il motore passo passo cronologicamente ha preceduto i motori brushless ed è stato il primo servomotore senza spazzole ad affermarsi; può essere definito come un *trasduttore elettromeccanico capace di convertire un segnale elettrico digitale in uno spostamento angolare* (o lineare).

A differenza di tutti gli altri motori elettrici, il motore passo passo *per funzionare ha*

bisogno di essere pilotato: è essenzialmente un motore a c.c. senza spazzole, il cui rotore ruota di un angolo determinato quando lo statore viene alimentato secondo una programmazione prestabilita. L'avanzamento del rotore non è continuo, ma è a scatti regolari, corrispondenti ad uno spostamento angolare ben preciso (*il passo*), provocato dalla attrazione magnetica tra i poli di statore e i poli di rotore, che vengono magnetizzati in sequenza dalla scheda di controllo.

Costruttivamente il motore passo passo è molto semplice: è costituito da uno statore, che reca un certo numero di avvolgimenti, che vengono alimentati in sequenza; un rotore, con due, quattro o più coppie polari, e un dispositivo che rileva la posizione angolare del rotore. Non ci sono avvolgimenti rotorici né spazzole.

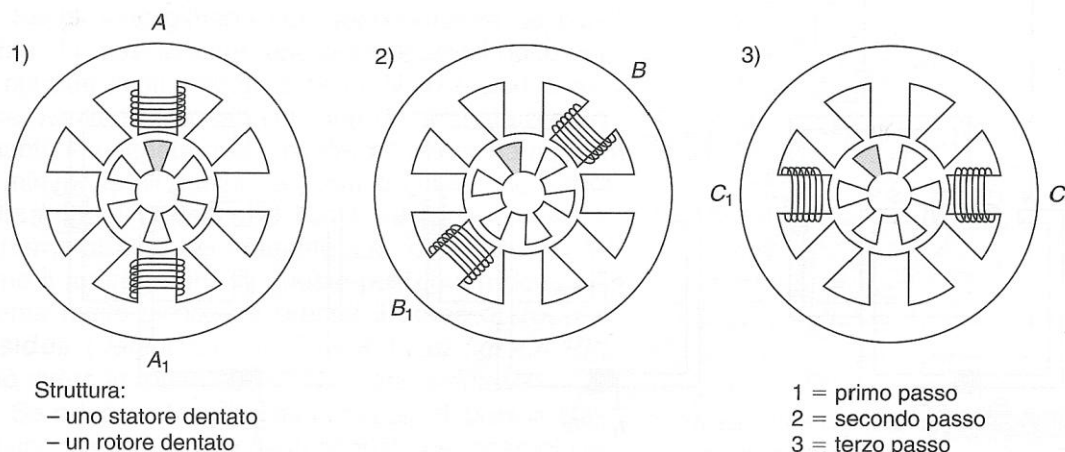
Mancando le spazzole, il motore passo passo è *quasi privo di usura* e, data la semplicità costruttiva, è un motore generalmente *economico e di lunga durata*. Il funzionamento è di regola ad anello aperto e anche il pilotaggio è molto semplice: a n impulsi di comando, corrispondono n passi, perciò non serve alcun codificatore. Poiché effettua direttamente la conversione di un segnale digitale in una posizione angolare, è direttamente interfacciabile col computer. I motori in commercio offrono la possibilità di scegliere fra più passi angolari diversi, lavorano con velocità variabili da zero a molte migliaia di passi al secondo, forniscono coppie che vanno da 1 Nm per un motore di circa 20 g, fino a oltre 10 Nm, per i motori più grandi. Si fermano in corrispondenza della posizione angolare voluta con una precisione che può raggiungere ± 50 millesimi di grado.

Motori passo passo a riluttanza variabile (Variable Reluctance)

I motori passo passo *VR* hanno il nucleo in ferro dolce. Rotore e statore, realizzati in lamierini di acciaio al silicio di elevata permeabilità, sono dentati: sui “denti” di statore sono avvolte un certo numero di fasi, alimentate in sequenza ciclica da un commutatore elettronico (fig. 4.4.10a). Quando una fase viene alimentata in corrente continua, i denti su cui la fase è avvolta si magnetizzano e nasce una coppia che sposta il rotore fino a che i denti di rotore risultano allineati con i denti dello statore magnetizzati, in modo che le linee di flusso del campo magnetico di statore possano richiudersi attraverso il percorso a minor riluttanza possibile.

Quando la corrente viene commutata sulla fase successiva, il rotore ruota di un “passo” e va ad allineare i suoi denti con i nuovi denti di statore magnetizzati, e così via.

Questo tipo di motore passo passo è il meno usato nelle applicazioni industriali per l'assenza di magneti permanenti.



Alimentazione in sequenza delle fasi di un motore passo passo a riluttanza variabile. Fig. 4.4.10a

Caratteristiche dei motori VR:

- costo medio-alto; pessimo smorzamento; coppia limitata; rendimento basso;
- coppia residua ridotta al minimo, legata praticamente al solo attrito nei cuscinetti; velocità alta; inerzia del motore bassa; buona precisione angolare; virtualmente coprono tutti gli angoli possibili (però in pratica gli angoli reperibili sono $1,8^\circ$; $7,5^\circ$ e 15°).

Motori passo passo a magnete permanente (Permanent Magnet)

I motori passo passo *PM* hanno il rotore a magneti permanenti, in configurazione radiale, normalmente di tipo metalloceramico, e disposti in modo che la superficie cilindrica del rotore presenti una successione di polarità Nord e Sud alternate. Il funzionamento è basato sulla forza di attrazione che si esercita tra polarità magnetiche di nome opposto.

Nella *fig. 4.4.10b* è rappresentato lo schema di principio di un motore passo passo *PM* con *due fasi* e con *alimentazione bipolare*: nella condizione indicata in figura, la fase 1 è alimentata con tensione positiva, mentre la corrente nella fase 2 è zero. Il rotore si trova in posizione di equilibrio.

Quando, annullata l'alimentazione della fase 1, si passa ad alimentare con tensione positiva la fase 2, il motore avanza di un passo in senso orario. Per far avanzare ulteriormente il motore, è necessario annullare l'alimentazione della fase due, e passare nuovamente ad alimentare la fase 1, ma con tensione invertita. Il ciclo si conclude annullando l'alimentazione della fase 1 e passando l'alimentazione sulla fase 2, con tensione ancora invertita. Il rotore avanza di un altro passo e ha compiuto un intero giro. In questo esempio l'angolo di passo è 90° .

Per realizzare angoli di passo minori, occorre aumentare il numero delle coppie di denti di statori o il numero di coppie polari di rotore.

Nella *fig. 4.4.10c* è rappresentato un motore passo passo *PM* con quattro fasi e con alimentazione unipolare.

Caratteristiche dei motori PM:

- coppia residua alta; coppia limitata; velocità bassa; inerzia del motore alta; scarsa precisione angolare; coprono pochi angoli (gli angoli reperibili sono 6° ; $7,5^\circ$; 9° ; 11° ; 15° ; 18° e 25°);
- costo basso (che costituisce il pregio principale di questi motori); rendimento medio; smorzamento buono: si assestano rapidamente nelle posizioni di equilibrio e vi rimangono bloccati anche in assenza di alimentazione delle fasi statoriche.

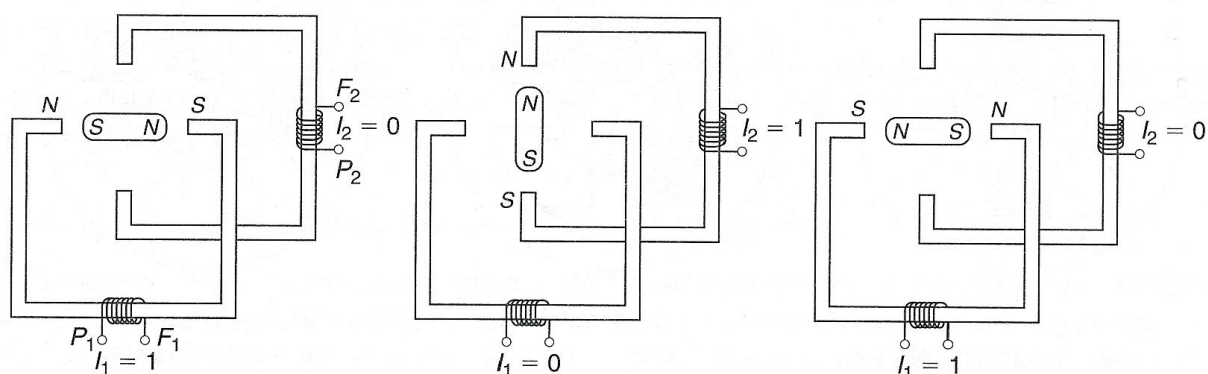
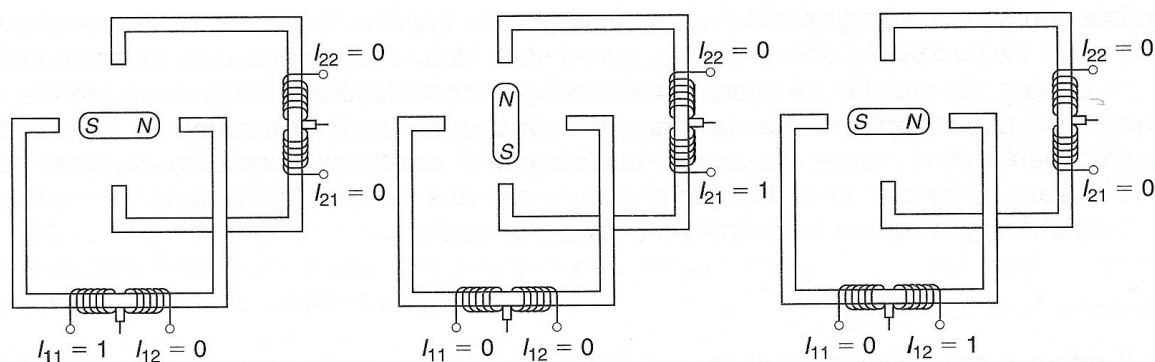


Fig. 4.4.10b Schema di principio di un motore passo passo a due fasi ad alimentazione bipolare.



Schema di principio di motore passo passo a magnete permanente a quattro fasi e ad alimentazione unipolare. **Fig. 4.4.10c**

Motori ibridi (Hybrid Motor)

I *motori ibridi* (in inglese indicati con la sigla *HY*) sono il tipo di motore passo passo più usato nelle applicazioni industriali. Hanno un rotore dentato in ferro dolce, magnetizzato da un magnete permanente in modo che i suoi denti vengano a costituire delle polarità magnetiche alternate Nord e Sud. Si dicono ibridi perché il loro principio di funzionamento si basa sulla combinazione dei principi di funzionamento del motore passo passo a riluttanza variabile e di quello a magnete permanente. Vengono realizzati nelle versioni commerciali a due fasi e a cinque fasi.

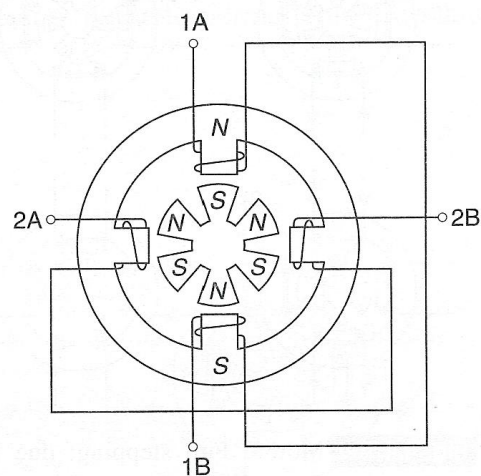
In *fig. 4.4.10d* è rappresentato lo *schema di principio* di un motore passo passo *HY* a due fasi.

Il rotore è realizzato in tre sezioni: le due sezioni esterne, ciascuna sagomata con tre denti equidistanti, sono in ferro dolce e vengono polarizzate, una con polarità Nord e una con polarità Sud, da un magnete permanente polarizzato nella direzione dell'asse del rotore, interposto fra esse. Sfasando opportunamente la posizione delle due sezioni dentate del rotore, in modo che tutti i denti risultino uniformemente distribuiti lungo la periferia del rotore, si ottiene una corona di poli magnetici alternati, Nord e Sud.

Lo statore è costituito da un cilindro cavo, anch'esso di ferro dolce laminato, che reca internamente quattro denti che coprono tutta la lunghezza del rotore. Sui denti di statore sono avvolte le bobine magnetizzanti, collegate a due a due in serie, in modo da costituire due fasi: due denti opposti appartengono alla stessa fase.

Se gli avvolgimenti non sono percorsi da corrente, il rotore assume una delle possibili posizioni in cui due denti, rispettivamente Nord e Sud di rotore, risultano allineati con due denti di statore, in quanto il magnete permanente del rotore ha ridotto al minimo la riluttanza del circuito magnetico attraversato dal flusso che deve richiudersi da un estremo all'altro del magnete. La coppia che mantiene il rotore in una di queste posizioni è generalmente molto piccola, e prende il nome di **coppia residua** (*detent torque*). Il motore di *fig. 4.4.10d* può avere in totale *dodici posizioni residue*.

Se adesso alimentiamo la coppia di bobine statoriche avvolte su due denti opposti (per esempio la fase 1 di *fig. 4.4.10e-1*, i risultanti poli Nord e Sud di



Schema di principio di un motore passo passo *HY* a 12 passi. **Fig. 4.4.10d**

statore attraggono i denti rotorici di polarità magnetica opposta. In questo caso si possono avere solo *tre posizioni stabili* del rotore, quanti sono cioè i denti rotorici dello stesso nome.

La coppia che mantiene il rotore in una delle posizioni stabili è adesso molto grande, e viene chiamata **coppia di mantenimento o di tenuta** (*holding torque*). La coppia di mantenimento corrisponde alla *coppia minima che è necessario applicare al rotore per farlo ruotare, alimentando le due fasi di statore con una tensione continua*.

Vediamo in dettaglio il meccanismo di funzionamento.

Motore Full stepping

Il rotore è nelle condizioni di *fig. 4.4.10e-1*. Annulliamo ora la corrente della fase 1 e inviamo corrente nella fase 2, con i versi indicati in *fig. 4.4.10e-2*. Quando la seconda coppia di bobine avvolte su denti opposti è percorsa da corrente, si creano le nuove polarità statoriche rappresentate in figura: il campo statorico ha subito una rotazione oraria di 90° e attrae ora una nuova coppia di poli rotorici. Siccome i poli rotorici sono 6, l'angolo meccanico tra due di essi vale 60° , e il rotore avanza di un angolo di 30° , che è lo *spostamento corrispondente ad un passo intero (full step)*.

Adesso annulliamo la corrente nella fase 2, e alimentiamo la fase 1, facendo passare corrente nelle due bobine di verso opposto al precedente: il campo statorico ruota di altri 90° e il rotore avanza di un altro passo, pari ancora a 30° (*fig. 4.4.10e-3*).

L'inversione della corrente nella coppia di bobine della fase 2, infine, conclude il ciclo provocando il terzo avanzamento di passo (*fig. 4.4.10e-4*). Il rotore ha compiuto una intera rivoluzione. Per proseguire si ritorna alla condizione di alimentazione di *fig. 4.4.10e-1* e si ripetono le operazioni sopraindicate.

Per invertire il senso di rotazione è sufficiente alimentare le bobine con sequenza inversa.

Supponiamo adesso di *alimentare contemporaneamente entrambe le fasi*: se le coppie di bobine opposte sono alimentate tutte contemporaneamente, il rotore avanza di soli 15° , pari a mezzo passo, perché il polo che abbandona la posizione stabile assume una posizione intermedia, in quanto risulta attratto in ugual misura da due poli statorici (*fig. 4.4.10f-1*).

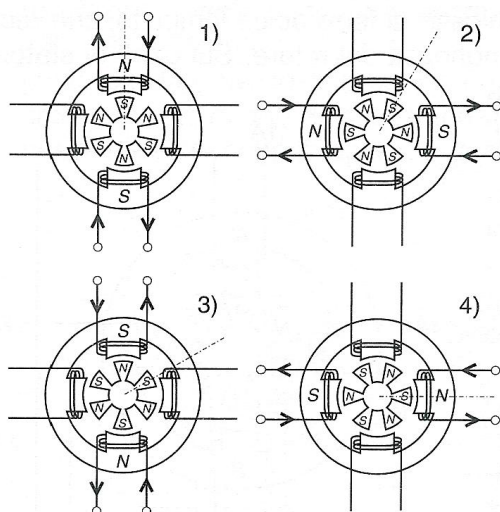


Fig. 4.4.10e Motore Full stepping: due bobine antagoniste vengono alimentate contemporaneamente. Le due fasi sono alimentate in sequenza.

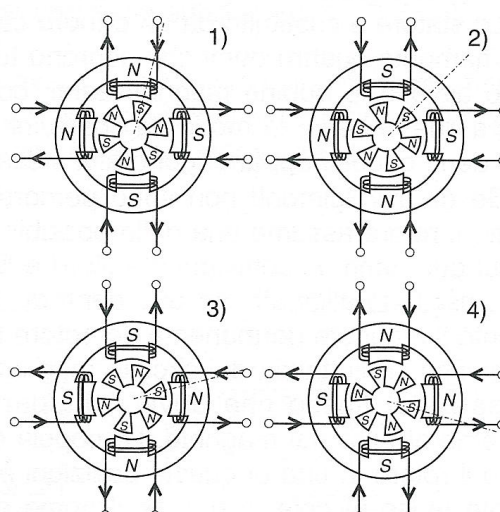


Fig. 4.4.10f Motore Full stepping: tutte e quattro le bobine sono alimentate contemporaneamente. Le due fasi sono alimentate contemporaneamente.

In queste condizioni la *coppia di mantenimento* è grande perché tutti i poli statorici influenzano il rotore.

Per consentire al rotore di avanzare di *un passo* intero, basta semplicemente *invertire la corrente in una delle due fasi*: con lo stesso meccanismo di prima, l'inversione di corrente in una coppia di bobine antagoniste determina la rotazione di 90° del campo statorico (fig. 4.4.10f-2 e seguenti).

Questo procedimento è usato per l'*avviamento* del motore Full stepping: inizialmente si alimentano entrambe le fasi, poi, mantenendo sempre alimentate le due fasi, si inverte alternativamente la corrente che le percorre.

Motore Half stepping

La soluzione precedente viene utilizzata per realizzare un altro tipo di motore passo passo, il *motore a mezzo passo* (*Half stepping Motor*).

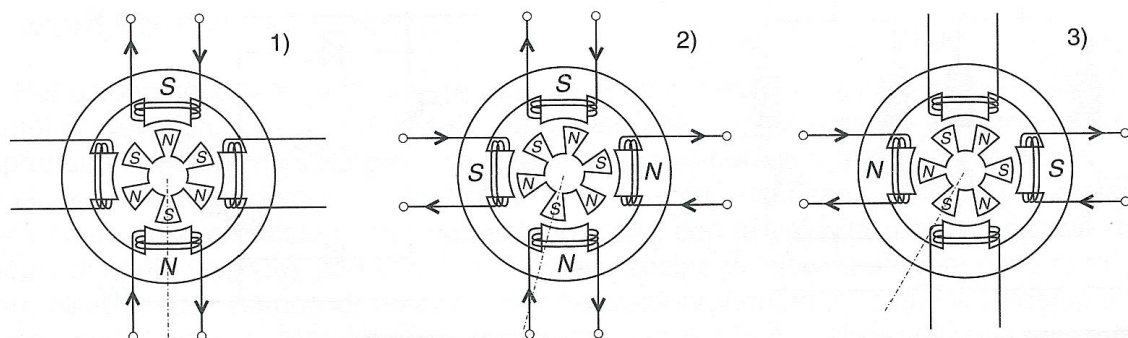
Prima si alimenta una sola fase, e successivamente si alimentano entrambe le fasi del motore, seguendo ciclicamente la sequenza indicata in fig. 4.4.10g: in questo modo il rotore ruota ogni volta di soli 15° e il numero di passi che corrisponde a una rivoluzione completa sarà doppio rispetto a quello del motore Full stepping.

Il motore Half stepping viene adottato in moltissime applicazioni industriali.

Caratteristiche dei motori HY:

- coppia residua media; costo basso (che costituisce il loro pregio principale); rendimento buono; smorzamento medio-buono; coppia medio-alta, con ottime prestazioni; velocità molto alta; inerzia del motore bassa; ottima precisione angolare; virtualmente coprono tutti gli angoli possibili (ma in pratica quelli reperibili sono $0,9^\circ$, $1,8^\circ$, 2° e $3,6^\circ$).

Come si vede dal raffronto con le caratteristiche delle altre categorie di motori passo passo, i *motori ibridi* offrono *prestazioni di gran lunga superiori*. La scelta del tipo specifico di motore passo passo da impiegare sarà dettata evidentemente dalle caratteristiche del carico azionato, ma resta comunque in genere circoscritta ai motori ibridi e ai motori a magnete permanente. Il motore a riluttanza variabile infatti viene impiegato quasi esclusivamente quando è indispensabile avere una coppia residua minima. Quando interessa ottenere piccoli angoli di spostamento, o precisione angolare elevata, o velocità elevata, o coppia elevata, la scelta cade necessariamente sui motori ibridi. In tutti gli altri casi, comunque, l'eventuale scelta di un motore passo passo a magnete permanente è dettata solo da motivi di economicità.



Motore Half stepping. Fig. 4.4.10g

Azionamenti passo passo

Il pilotaggio dei motori passo passo funge da fonte di corrente e la tensione presente ha la sola funzione di stabilire o meno il passaggio di corrente.

I segnali di ingresso alla scheda di pilotaggio sono i comandi digitali di moto, costituiti da una successione di segnali di passo (*treno di impulsi di passo*) e da un *segnale di direzione*.

Per ogni passo del rotore, occorre un impulso di passo. Gli azionatori con motori passo passo devono essere perciò in genere in grado di produrre treni di impulsi di passo con frequenza di impulso anche molto elevata, basta pensare che un motore micro passo, per compiere una rivoluzione completa di rotore, deve compiere per esempio 25.000 passi, il che corrisponde a una frequenza di impulsi di passo pari a 750 kHz. Nelle applicazioni industriali il motore più usato è l'Half stepping, con 400 passi per rivoluzione, con azionamento di tipo unipolare.

Il sistema di pilotaggio del motore passo passo può essere *unipolare* o *bipolare*.

Con il **pilotaggio unipolare** (*Unipolar Drive*) la corrente in ciascuna bobina del motore circola sempre nello stesso senso. Il motore deve avere doppio avvolgimento, in modo che si possa ottenere l'inversione del campo statorico trasferendo la corrente da una bobina all'altra bobina (*fig. 4.4.10c*).

Nel pilotaggio unipolare, il passaggio di corrente è determinato solo dalla tensione e dalle caratteristiche degli avvolgimenti: essendo questi di natura induttiva, il comando funziona perfettamente a basso frequenza di impulso di passo, ma quando la velocità aumenta la coppia diminuisce rapidamente. Per ovviare all'inconveniente si possono utilizzare delle resistenze limitatrici o si può ricorrere all'uso di un chopper.

L'inserzione delle resistenze limitatrici in serie agli avvolgimenti migliora la costante di tempo del circuito. Il pilotaggio che si ottiene si dice di tipo R/L (R/L Drive) ed è ancora un pilotaggio a tensione costante, molto economico, ma che dissipa una potenza elevata (*fig. 4.4.10h*).

Il pilotaggio chopper (*Chopper Drive*) consiste nell'aumentare la tensione applicata agli avvolgimenti del motore e nel tagliarla quando la corrente raggiunge il valore prefissato: è una tecnica di pilotaggio a corrente costante (*fig. 4.4.10i*).

Si parla invece di **pilotaggio bipolare** (*Bipolar Drive*) quando la corrente nelle bobine circola in entrambi i sensi (*fig. 4.4.10b*). Il modo più semplice di realizzare un pilotaggio bipolare consiste nel collegare l'avvolgimento del motore a due fonti di alimentazione di

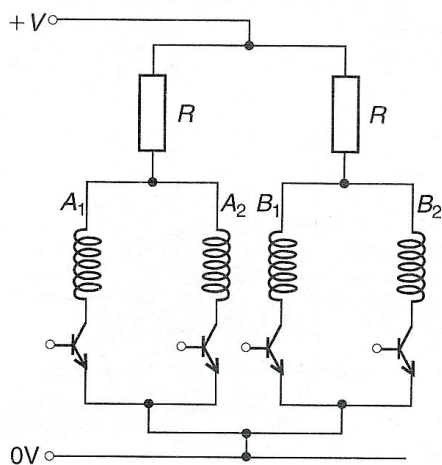


Fig. 4.4.10h Pilotaggio unipolare $\frac{R}{L}$ in motore passo passo.

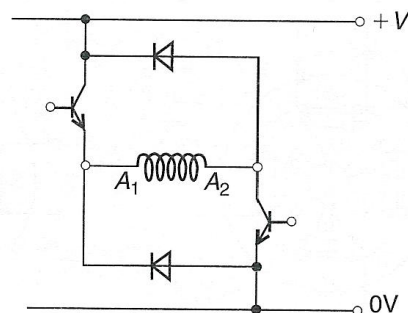
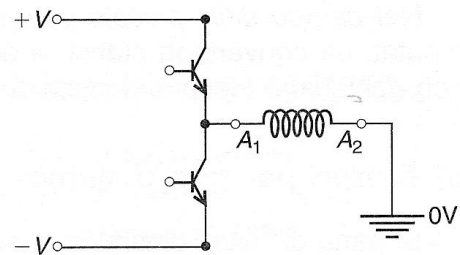


Fig. 4.4.10i Pilotaggio unipolare a chopper di un motore passo passo.

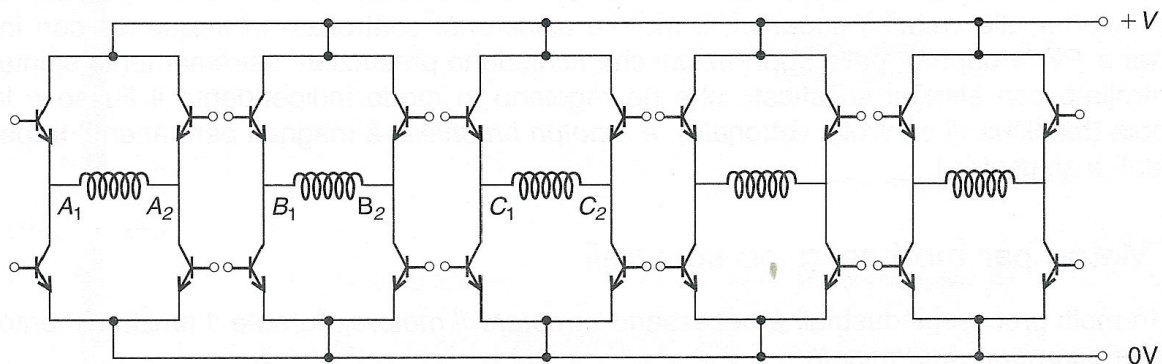
polarità opposta, attraverso due transistor: la corrente può essere fatta circolare in un senso oppure in quello opposto, a seconda del transistor che viene mandato in conduzione (fig. 4.4.10ℓ).

Il circuito di fig. 4.4.10ℓ presenta diversi inconvenienti: intanto devono essere disponibili due sorgenti di alimentazione, entrambe in grado di erogare la corrente necessaria per le fasi del motore passo passo, ma quando è in funzione una, l'altra resta inutilizzata, per cui il rendimento del sistema è molto basso. Inoltre i componenti sono costosi perché i transistor devono essere dimensionati per il doppio del valore di tensione applicata agli avvolgimenti del motore. Si utilizza allora una *configurazione a ponte*: per quanto il numero dei transistor aumenti, non c'è più la necessità di dimensionarli per tensione doppia ed è sufficiente una sola sorgente di alimentazione, pienamente utilizzata. La configurazione standard a ponte utilizzata nel pilotaggio bipolare è rappresentata in fig. 4.4.10m.

Anche nel pilotaggio di tipo bipolare per ovviare agli inconvenienti dovuti alle caratteristiche induttive del circuito si aggiungono le resistenze limitatrici o si ricorre all'uso di un chopper.



Pilotaggio bipolare di un motore passo passo. **Fig. 4.4.10ℓ**



Pilotaggio bipolare a ponte di un motore passo passo a cinque fasi. **Fig. 4.4.10m**

4.4.11 Caratteristiche funzionali dei motori per azionamenti

I motori per azionamenti si possono classificare in motori per bassa dinamica, per alta dinamica e motori per movimenti incrementali.

a) Motori per bassa dinamica

Per azionamenti lenti, e in genere quando sono richieste velocità non molto elevate e campi di variazione di velocità limitati, nel *campo delle grandi potenze* vengono impiegati soprattutto il *motore asincrono* e il *motore sincrono* alimentati a frequenza variabile.

Generalmente la grandezza controllata è la velocità, e spesso i motori sono impiegati per vincere coppie resistenti che aumentano molto con la velocità (come nel caso della coppia di attrito viscoso), con potenze che dalle decine di kilowatt arrivano sino ai megawatt. Nello stesso campo di potenze, per lavorazioni industriali, come ad esempio nel campo metallurgico o della plastica, si impiegano motori a c.c. alimentati con convertitori statici o motori asincroni alimentati con inverter a *PWM*.

Nel *campo delle piccole potenze* è frequente l'impiego dei *motori a c.c.*, sempre alimentati da convertitori statici, e dei *motori a collettore*. Per posizionamenti angolari che non richiedano elevata velocità si impiegano i *motori passo passo*.

b) Motori per alta dinamica

Si parla di “alta” dinamica quando vengono richieste prestazioni dinamiche particolarmente spinte, come un campo di variazione della velocità molto ampio (rapporti da 1 a 100 e più), o velocità molto elevate (fino a 20.000 giri/” e più), o grande accelerazione all'avviamento e all'arresto, o infine quando sono richieste particolari regolazioni di potenza o di coppia.

Esempi di applicazioni in cui sono richieste prestazioni dinamiche spinte sono i *motori per assi* delle macchine utensili, che devono fornire potenze dell'ordine di 50 kW con coppie che arrivano ai 100 Nm e velocità variabili da 0 a 10.000 giri/”, e i *motori per mandrini*, per i quali sono richieste potenze anche superiori ai 100 kW, spesso a velocità molto elevata, e per i quali si rendono necessarie regolazioni a potenza costante e posizionamenti dell'albero. Altre applicazioni che richiedono elevata dinamica si hanno nelle catene cinematiche della *robotica*, nei sistemi di *laminazione*, nei sistemi di *amplificazione di coppia*, ecc.

I motori impiegati per alta dinamica, nel campo delle grandi potenze, sono ancora il *motore sincro* alimentato con cycloconverter fino a velocità dell'ordine di 1000 giri/” e con inverter alle velocità superiori, il *motore asincro*, controllato in frequenza con inverter a *PWM* oppure, nelle applicazioni che richiedono prestazioni estremamente spinte, controllato con sistemi sofisticati, che ne regolano in modo indipendente il flusso e la coppia (tecniche di controllo vettoriale), e i *motori brushless* a magneti permanenti, trapezoidali e sinusoidali.

c) Motori per movimenti incrementali

In molti processi industriali è necessario *arrestare il motore*, durante il funzionamento, *in una posizione determinata*.

Si utilizzano comunemente motori passo passo, oppure motori a c.c. pilotati con un opportuno sistema di controllo automatico di posizione. Gli esempi di applicazione più diffusa si hanno nei piccoli robot e nei motori per assi di macchine utensili che non richiedono elevata dinamica, e che lavorano in un campo di potenza non superiore a qualche centinaio di watt.

Lo sviluppo dell'elettronica di potenza e della tecnologia dei materiali magnetici, consente oggi, anche nel campo dei motori per movimenti incrementali, la realizzazione di motori a magneti permanenti di elevate prestazioni dinamiche, come il *motore ibrido passo passo*, che presenta coppia di mantenimento dell'ordine di 10 Nm, accompagnata da ottime prestazioni per quanto riguarda velocità, precisione angolare e prontezza d'intervento, e il *motore brushless*, trapezoidale o sinusoidale.

Quadro riassuntivo dei motori elettrici

