

# MOTORE BRUSHLESS

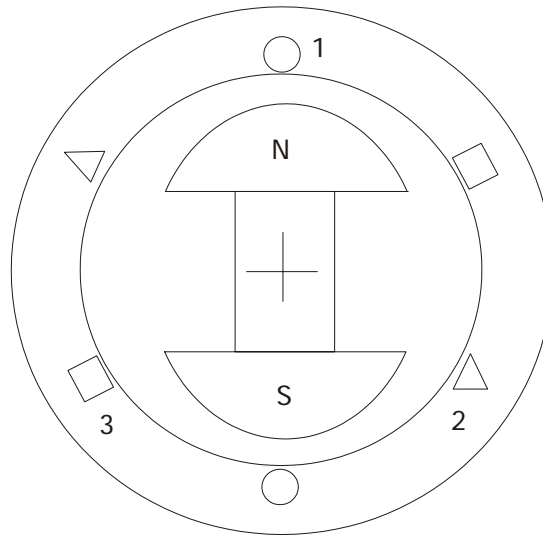
## Introduzione

E' stato introdotto negli anni 80' con lo sviluppo dell'elettronica di potenza. Il nome brushless significa 'senza spazzole', e sta ad indicare il fatto che questo tipo di macchina non presenta il collettore e le spazzole che sono invece tipiche del motore in corrente continua. In questo modo vengono eliminati i difetti principali di questo ultimo.

- a) A causa del contatto strisciante tra spazzole e collettore è richiesta una manutenzione periodica (sostituzione delle spazzole e delle lamelle del collettore) e non è possibile impiegare tale macchina in ambienti esplosivi.
- b) Il rotore ha un elevata massa e quindi la dinamica meccanica è lenta.

## Principio di funzionamento

Il motore brushless è costituito da un rotore su cui alloggiano dei magneti permanenti (è il circuito induttore) e da uno statore su cui sono disposte, ad esempio, tre fasi (è il circuito di indotto) come in fig. Sono in commercio anche motori brushless a due avvolgimenti di statore.



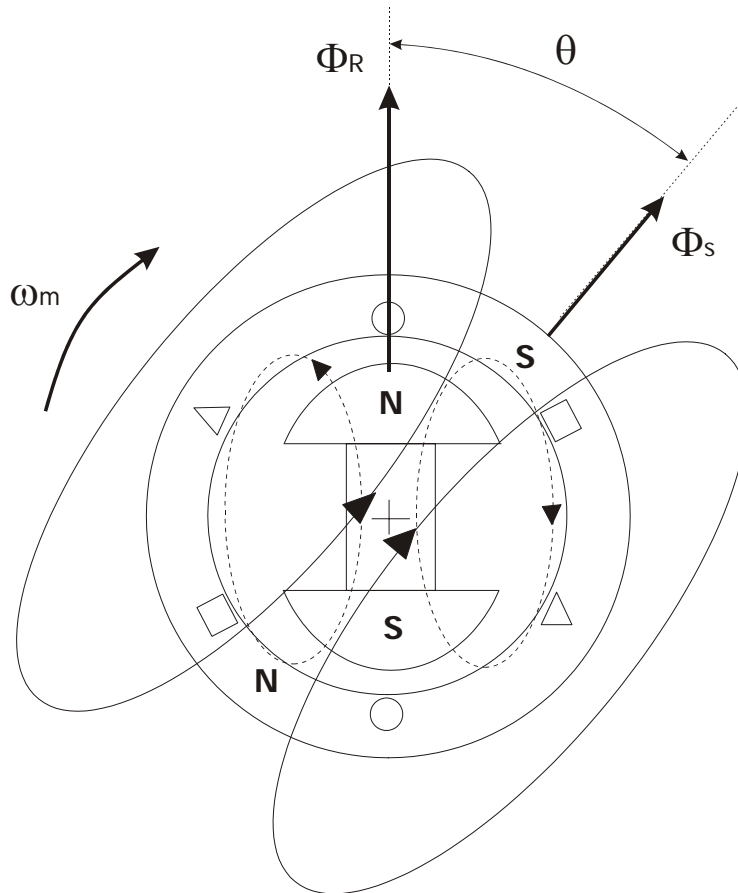
Motore Brushless.

Se si alimentano le tre fasi di statore con tre correnti alternate di frequenza  $f$ , opportunamente sfasate, si avrà in ogni avvolgimento un campo magnetico alternativo. La risultante dei tre campi sarà un campo magnetico costante in modulo e ruotante con una velocità angolare:

$$\omega_{mecc} = \frac{\omega}{p} \quad (4.1)$$

(con p si indica il numero di paia di poli).

Quindi se si fotografa la situazione in un certo istante, si avrà la seguente disposizione del campo magnetico statorico  $\Phi_S$ .



Posizione relativa dei campi magnetici di statore e di rotore.

Si possono individuare i due poli magnetici del campo di statore (si assume per ipotesi  $p=1$ ):

- il Nord (N) è la regione dello statore da dove escono le linee di flusso;
- il Sud (S) è la regione dello statore da dove entrano le linee del flusso magnetico.

Poichè sul rotore si ha un bipolo magnetico (N-S), i due campi magnetici (di statore e di rotore) interagiscono: si creano così delle forze di attrazione tra i poli di segno opposto ( $N_{statore} - S_{rotore}$  e  $S_{statore} - N_{rotore}$ ). Il rotore viene allora ad essere soggetto ad una coppia (di natura elettrica) che è espressa dalla relazione:

$$C_m = \Phi_S \Phi_R \sin \theta \quad (4.2)$$

dove:  $\Phi_S$  = intensità del flusso di statore,  $\Phi_R$  = intensità del flusso di rotore e  $\theta$  è l'angolo

compreso tra le direzioni medie dei due campi.

Per effetto di tale coppia il rotore tenderà a ruotare con una certa velocità angolare ( $\omega_m$ ) in modo da raggiungere l'allineamento tra i due campi. Nel caso in fig. 4.2 il rotore ruota in senso orario.

Dalla (4.2) si osserva che la coppia è massima quando i due campi magnetici sono ortogonali fra loro e nulla quando questi sono allineati.

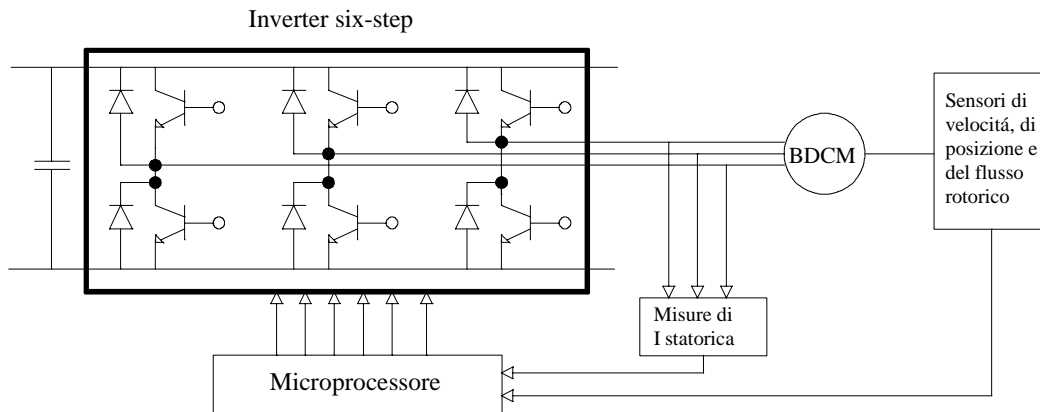
Quindi per mantenere il rotore in rotazione è necessario che il campo magnetico di statore sia sempre sfasato (la condizione ottima è che siano ortogonali) rispetto a quello di rotore.

E' chiaro che, per mantenere lo sfasamento mentre la macchina ruota, occorrerà commutare la corrente negli avvolgimenti di statore, in modo dipendente dalla posizione del rotore: quindi a monte ci dovrà essere un inverter, comandato da un segnale che rileva la posizione rotorica (ad esempio un encoder). Lo schema completo di un brushless è rappresentato in fig.

L'inverter è un convertitore statico che trasforma una tensione continua in tre tensioni alternate di cui è possibile regolare la frequenza e l'ampiezza.

In questo caso l'inverter ha la stessa funzione che aveva il sistema spazzole-collettore nel motore in continua: da ciò nasce il nome di motore in continua senza spazzole.

In un certo senso è una macchina sincrona, perché i campi di rotore e di statore sono sempre mantenuti sincroni e sfasati tra loro per creare la coppia motrice.

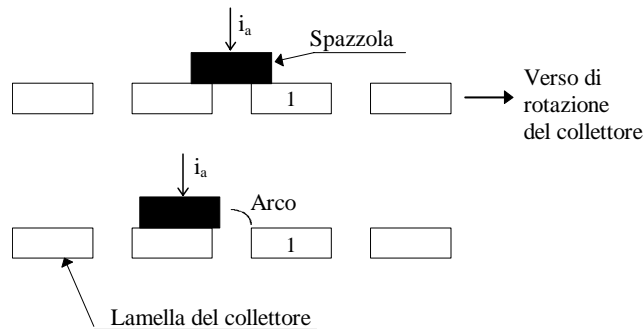


Struttura tipica di un azionamento brushless.

### ***Vantaggi nell'uso del motore brushless***

- Il campo di rotore si deve ad un magnete permanente, quindi nel rotore non ci saranno perdite apprezzabili. Le uniche perdite saranno nello statore..
- Si evita il sistema spazzole-collettore con notevoli vantaggi. Infatti nel motore in continua il problema di ottenere alte coppie in velocità (es: robot che solleva o sposta un pezzo) è male affrontato, perché lo scorrimento delle spazzole sulle lamelle del

collettore porta, per fenomeni induttivi, al mantenimento di archi elettrici che saranno sempre più intensi quanto più elevata è la corrente (alte coppie) e quanto più cresce la velocità.



Spostamento del contatto spazzola-collettore durante il moto

Spesso un robot industriale deve compiere un ciclo di lavoro ripetitivo: ad esempio lo spostamento di un pezzo da un banco di lavoro a un altro (*pick and place*). In tal caso il motore compie sempre lo stesso numero di giri a carico, abbandona il pezzo trasportato, si riposiziona e riprende un nuovo pezzo. Ci sarà perciò uno scintillio dovuto a una sovracorrente per ogni presa di carico e sempre sulla stessa lamella: quindi un'usura più rapida del collettore rispetto al caso di un ciclo di lavoro non ripetitivo. E' il motivo che ha portato a una delle prime applicazioni industriali del motore brushless nelle macchine transfert sulle linee di produzione della FIAT UNO.

L'assenza di spazzole è quindi vantaggiosa non solo per problemi di manutenzione e di usura, ma anche perché elimina un sistema pesante, ingombrante e costoso.

- Problemi di peso ed inerzia: il motore brushless ha rotori molto leggeri (a volte cavi) e i magneti (in Samario-Cobalto o in Neodimio-Ferro-Boro) sono incollati solo su di uno strato sottile superficiale. Ciò riduce di molto il peso ed anche il momento di inerzia del motore.

### ***Svantaggi nell'uso del motore brushless***

- Necessità dell'inverter: al costo del motore va aggiunto quello di inverter, sensori e sistema di controllo.
- Presenza di magneti permanenti del tipo a terre rare, con elevati costi.

# MOTORE A PASSO

## Caratteristiche generali

I motori a passo sono alimentati da impulsi elettrici ed eseguono per ogni impulso una rotazione angolare ben definita in una direzione prefissata, esercitando sostanzialmente una conversione da un segnale numerico di ingresso ad una rotazione continua dell'albero di uscita. Fino a non molti anni fa era l'unica macchina usata nel campo degli azionamenti, insieme al motore in continua. Il principio di funzionamento dei motori a passo può ricondursi alla tendenza delle parti mobili a disporsi per ogni condizione di alimentazione degli avvolgimenti, nelle posizioni di massima energia al traferro, cioè di minima riluttanza. In realtà si tratta di un motore di scarsa efficienza, in quanto deve spendere energia sia per generare il campo, che per interagire con esso, con una generazione di coppia del tipo a riluttanza. Un motore a passo quindi può essere usato per piccole potenze, ma non appena la potenza cresce (e supera il KW) diventa inefficiente, in quanto il suo volume aumenta troppo.

Tuttavia può essere considerato come attuatore di posizione, che governa l'apertura di elettrovalvole di motori idraulici e quindi in senso lato può essere utilizzato in applicazioni di grande potenza.

Per piccole taglie resta comunque una soluzione molto semplice ed economica: si usa oggi nel controllo di posizione di macchine utensili, nelle periferiche di calcolatori, nell'industria tessile, nella fabbricazione di circuiti integrati, nel posizionamento di antenne, plotter x-y, telecamere, etc.

Caratteristiche peculiari del motore a passo sono:

- l'angolo di passo: angolo nominale di cui ruota il motore soggetto a un impulso (varia in genere dal centesimo di grado fino a  $30^\circ$ ),
- l'errore sul passo: differenza tra il valore teorico e quello effettivo dell'angolo di rotazione,
- la frequenza massima ( $f_A$ ) di alimentazione impulsiva senza carico: la massima frequenza di impulsi con cui il motore scarico può essere comandato in modo da fermarsi e invertire il senso di rotazione senza perdere il sincronismo,
- la coppia massima ( $C_M$ ) sviluppata: la coppia massima erogata dal motore quando la frequenza di alimentazione tende ad annullarsi,
- la coppia di tenuta: la coppia esterna che si può applicare al motore diseccitato senza che entri in rotazione.

Una possibile classificazione dei motori a passo si basa sulla diversa geometria costruttiva e distingue due tipologie di base:

- a riluttanza variabile;

- a magnete permanente.

## Motori a passo a riluttanza variabile

Sulla superficie interna dello statore (è la parte fissa della macchina) sono presenti  $n_s$  denti uniformemente distribuiti. Su ogni coppia di denti diametralmente opposti è presente un avvolgimento che costituisce una fase della macchina. Quindi sullo statore si ha un numero di fasi pari:

$$q = \frac{n_s}{2} \quad (5.1)$$

Il rotore è di ferro dolce e presenta sulla superficie esterna un numero di denti  $n_r$  pari a:

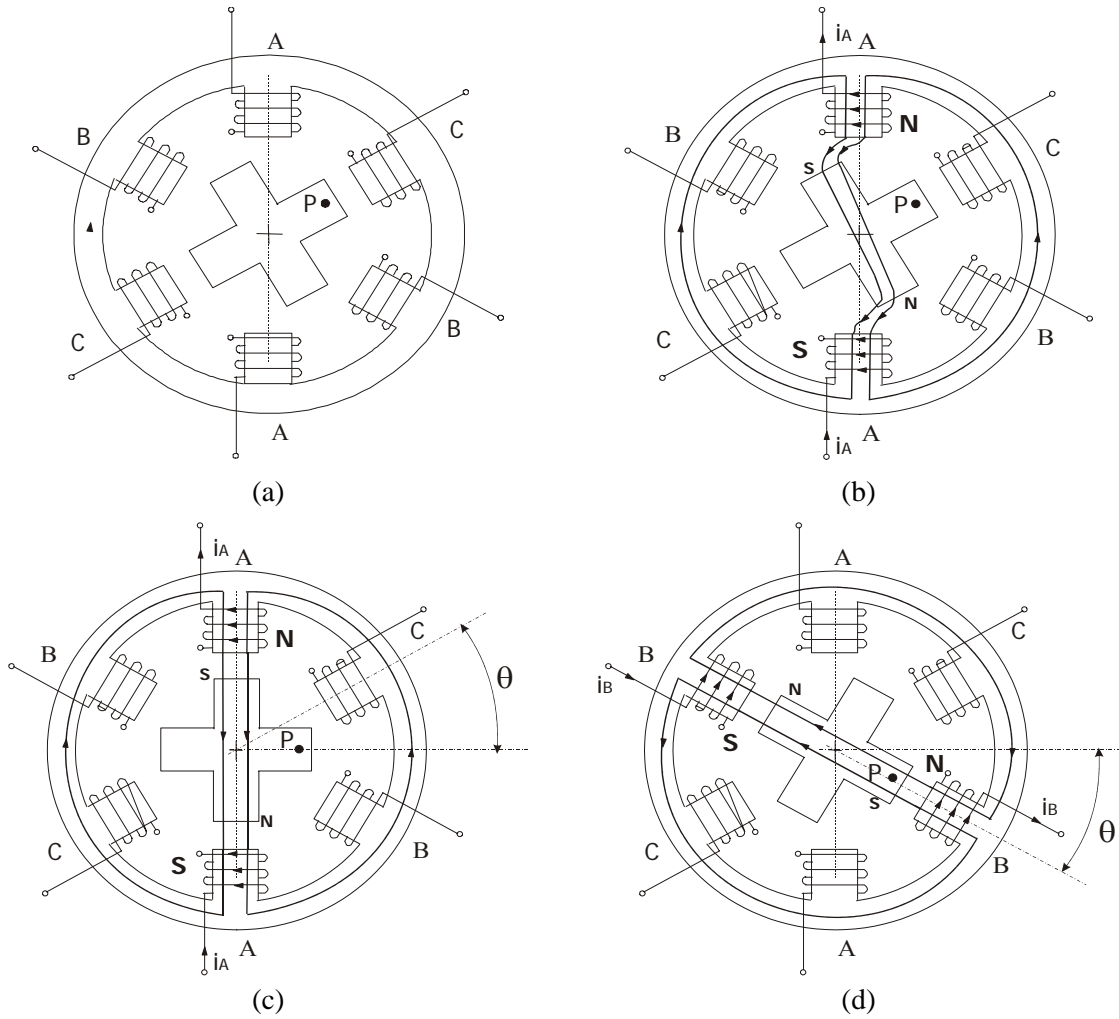
$$n_r = n_s \pm 2 \quad (5.2)$$

Per spiegarne il principio di funzionamento si prende in esame il motore rappresentato in fig. a con  $n_s = 6$ ,  $n_r = 4$  e  $q = 3$ , con le fasi contraddistinte dalle lettere A, B e C.

Si parte dalla configurazione rappresentata in fig. 5.2.a. Si alimenta solo la fase A con una corrente costante  $i_A = I$  ( $i_B = i_C = 0$ ). Nasce un campo magnetico le cui linee di flusso sono dirette dal polo N (le linee sono uscenti dal polo Nord) al polo Sud. Queste linee di flusso seguono un percorso di minima riluttanza e quindi tendono a passare attraverso i denti del rotore che sono prossimi alla fase A, anziché muoversi lungo il diametro che congiunge i due denti della fase eccitata (fig. b).

A causa di ciò i denti di rotore interessati dal flusso magnetico vengono magnetizzati (fenomeno di polarizzazione magnetica) e quindi si creano dei poli magnetici indotti: dove le linee di flusso entrano si crea un Sud, da dove escono si crea un Nord (fig. b).

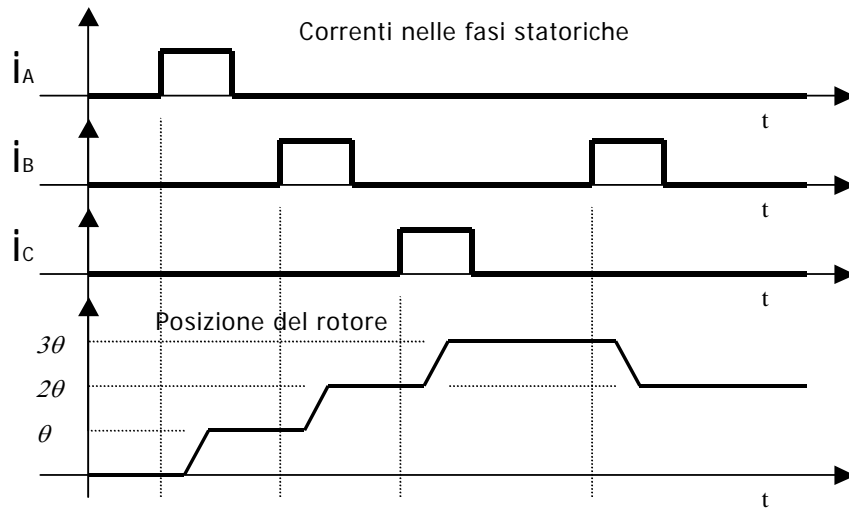
I poli magnetici di statore e di rotore interagiscono: si creano delle forze di attrazione tra poli di segno opposto e quindi una coppia elettromotrice ( $C_{em}$ ) che fa ruotare il rotore di un angolo  $\theta$ , detto passo agolare (osservare il movimento del punto P) in modo da allineare i poli di segno opposto (fig. c). Il principio di funzionamento è a minima riluttanza: quando la corrente di eccitazione percorre l'avvolgimento statorico A, il rotore si dispone in modo da offrire la minima riluttanza magnetica (cioè la massima induttanza e il massimo flusso).



Motore a passo a riluttanza variabile.

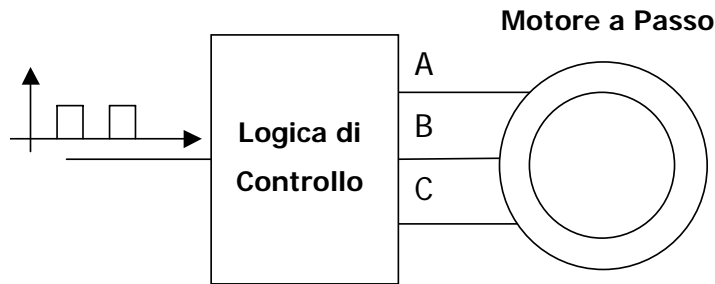
Se adesso si diseccita la fase A e si alimenta la B ( $i_B = I, i_A = i_C = 0$ ) si avrà una situazione identica a quella descritta precedentemente e al termine del transitorio il rotore avrà compiuto un altro passo angolare (fig. d).

Alimentando in sequenza le varie fasi il rotore compie un moto continuo (fig.). Ogni volta che varia la fase alimentata il rotore si sposta di un passo. Se cambia il verso di alimentazione (da A-B-C a C-B-A) delle fasi statoriche, cambierà il verso di rotazione del motore.



Sequenza di alimentazione delle fasi. Sequenza A-B-C-B

Quindi il motore presenta un'opportuna logica di controllo in modo da alimentare le fasi nella sequenza corretta (fig.). Un parametro importante del motore è la frequenza massima di funzionamento del motore: tra un impulso e l'altro deve trascorrere un certo tempo per consentire al rotore di compiere il passo polare. Se tale limite non è rispettato c'è il rischio che il motore perda il passo.



Schema completo di un motore passo passo.

Il fatto che il numero dei denti di rotore differisce da quello di statore secondo la relazione (5.2) garantisce che non si potrà mai verificare la situazione in cui i denti di statore sono già allineati a quelli della fase che deve essere alimentata (se si verificasse ciò ovviamente non si avrebbe la rotazione angolare).

Si determina il passo angolare ( $\theta$ ). Si definiscono le seguenti grandezze:

$$\begin{cases} \theta_s = \frac{360}{n_s} \\ \theta_r = \frac{360}{n_r} \end{cases} \quad (5.4)$$

L'angolo di passo è:

$$\theta = |\theta_s - \theta_r| \quad (5.5)$$

Nel caso in esame con  $n_s = 6$  e  $n_r = 4$  si ha  $\theta = 30^\circ$ , quindi ad ogni impulso il rotore compie una rotazione di  $30^\circ$ .

Quello descritto è il funzionamento del motore a *singolo passo*, poichè si alimenta una sola fase alla volta. Nel funzionamento detto a *multipasso* si alimentano più fasi contemporaneamente. Modulando in modo opportuno le correnti nelle singole fasi si riesce a farsi che il campo magnetico risultante sia posizionato in modo intermedio tra le fasi e quindi è possibile far compiere rotazioni inferiori al passo angolare. Ad esempio, ritornando al caso in esame, alimentando contemporaneamente le fasi A e B con due correnti uguali, il campo risultante è posizionato nella mezzeria tra i due denti e quindi il motore ruoterà di un angolo pari a metà del passo angolare.

Per ottenere un passo angolare ridotto (inferiore al 1/100 di grado) occorre avere un numero elevato di fasi e applicare la strategia di controllo multipasso).

## Motori a passo a magnete permanente

Il rotore è un magnete con  $p_r$  poli. Lo statore contiene 2 fasi (A, B) avvolte in modo da creare lo stesso numero di poli del rotore. Il numero dei denti di statore è:

$$n_s = 2p_r \quad (5.6)$$

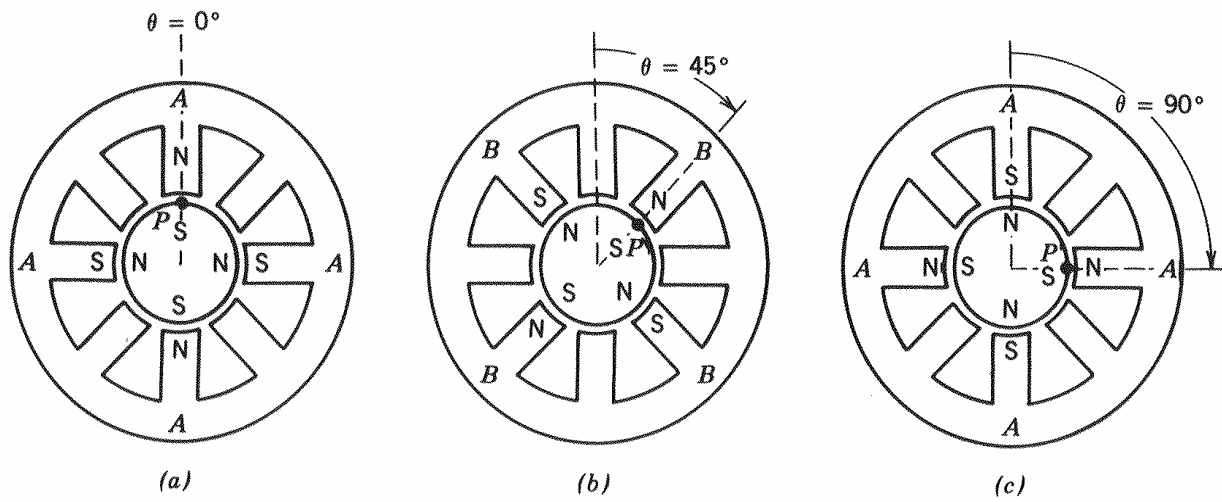
Nel caso in fig. 5.5 si ha  $p_r = 4$  e quindi  $n_s = 8$ .

Si parte dalla situazione di fig. a in cui è alimentata la fase A e i poli di rotore sono allineati a quelli della fase A. Se adesso si diseccita la fase A e si alimenta la fase B in modo da creare una successione di poli di statore come rappresentato in fig..b. il rotore ruoterà di un passo angolare ( $\theta$ ) in modo da allineare i suoi poli a quelli di statore. Se adesso si diseccita la fase B e si alimenta la fase A in modo da creare la situazione illustrata in fig..c. il rotore compie un nuovo passo angolare nello stesso verso. Se la corrente nella fase A avesse avuto segno opposto, il rotore sarebbe ruotato ancora di un passo angolare, ma in verso opposto.

Il passo angolare in questo caso è definito:

$$\theta = \frac{360}{n_s} \quad (5.7)$$

Nel caso in esame  $\theta = 45^\circ$ .



Motore a passo a magnete permanente

E' un motore che, rispetto a quello a riluttanza variabile, mantiene la posizione da spento a causa di una piccola coppia dovuta al magnetismo residuo dello statore.