

MOTORI PASSO

Il motore passo è un particolare tipo di motore sincrono: la velocità a cui gira il suo rotore infatti è univocamente correlata alla frequenza degli impulsi che sono utilizzati per alimentare gli avvolgimenti sullo statore. Tali motori sono utilizzati generalmente per applicazioni a bassa potenza (< 2 kW) dove è richiesta un accurato controllo della rotazione dell'albero o della sua rotazione. Il motore passo è infatti in grado di rispondere con ben definito spostamento angolare (passo) ad un singolo impulso in ingresso. I motori passo possono essere suddivisi in tre categorie:

- Motori passo a riluttanza variabile;
- Motori passo a magneti permanente;
- Motori passo ibridi.

MOTORI A RILUTTANZA VARIABILE

In queste macchine, l'eccitazione di una coppia polare statorica genera una forza che tende a rendere massima l'energia magnetica immagazzinata. Per comprendere il funzionamento di tale macchina si faccia riferimento alla figura 1, dove è illustrata un sistema composto da uno statore su cui è presente una coppia polare eccitata da un avvolgimento, e da un rotore in materiale ferromagnetico dolce. Ricordando quanto detto nel capitolo riguardante la conversione elettromeccanica dell'energia, è possibile scrivere il seguente bilancio energetico per una rotazione infinitesima $d\alpha$ della barra:

$$\delta L_g = \delta W_J + \delta L_p + dE_{em} \quad (1)$$

dove δL_g , δW_J , δL_p , dE_{em} sono rispettivamente il lavoro fornito dai generatori attraverso i morsetti, l'energia dissipata, il lavoro delle forze ponderomotrici e la variazione di energia magnetica nel sistema. Nello scrivere tale bilancio, si è supposto che la barra non subisca accelerazioni durante lo spostamento.

Il lavoro fornito al sistema dai generatori nel tempo dt è pari a:

$$\delta L_g = v i dt = \left(Ri + \frac{d\Phi}{dt} \right) i dt \quad (2)$$

dove Φ è il flusso concatenato all'avvolgimento che eccita le coppie polari statoriche. Supponendo che il legame tra flusso e corrente sia lineare

$$\Phi = L(\alpha) i$$

è possibile scrivere:

$$\begin{aligned} \delta L_g &= Ri^2 dt + L \frac{di}{dt} i dt + \frac{dL}{dt} i^2 dt = \\ &= Ri^2 dt + \frac{1}{2} L d(i^2) + i^2 dL \end{aligned} \quad (3)$$

Supponendo che l'energia dissipata durante la trasformazione sia dovuta unicamente all'effetto Joule, è possibile scrivere:

$$\delta W_J = Ri^2 dt \quad (4)$$

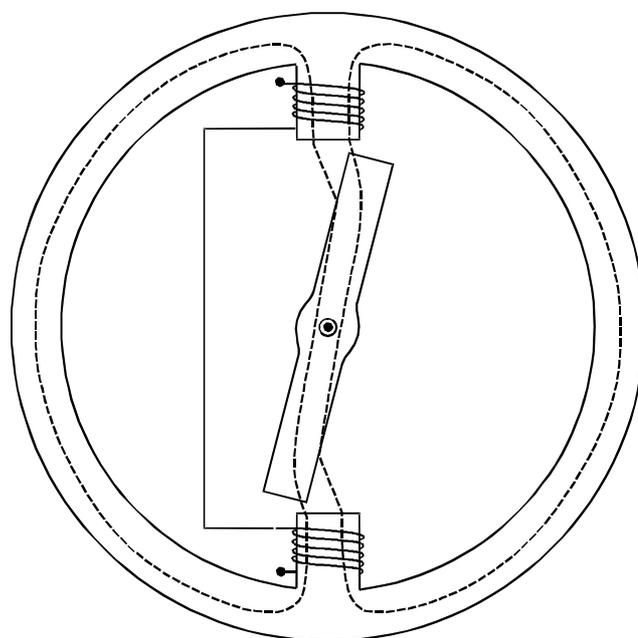


Figura 1. - Sezione schematica di un motore a riluttanza variabile con un solo avvolgimento di eccitazione.

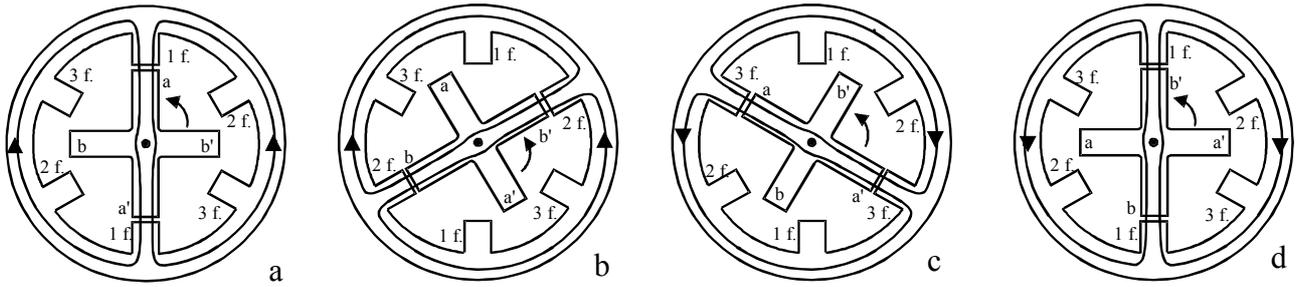


Figura 2.

Poiché la variazione di energia elettromagnetica coincide con la variazione di energia magnetica del sistema, vale la relazione:

$$d E_{em} = d E_m = d \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) = \frac{1}{2} L d(i^2) + \frac{1}{2} i^2 dL \quad (5)$$

Inserendo le (2)-(5) nella (1) si perviene alla relazione finale per il lavoro compiuto nello spostamento infinitesimo:

$$\delta L_p = \frac{1}{2} i^2 dL \quad (6)$$

Dalla (6) si desume che la macchina compie lavoro sull'esterno quando aumenta il coefficiente di autoinduzione dell'avvolgimento di eccitazione. Introducendo la riluttanza del circuito magnetico \mathcal{R} , è possibile scrivere^(*):

$$L = N^2 / \mathcal{R}$$

da cui:

$$\delta L_p = - \frac{N^2}{2\mathcal{R}^2} i^2 d\mathcal{R} \quad (7)$$

Quindi, in accordo con quanto detto, quando avviene una conversione da energia elettrica in energia meccanica, la coppia elettromeccanica che si sviluppa ruota la sbarra in modo da diminuire la riluttanza del circuito magnetico, allineandola sull'asse individuato dalla coppia polare statorica. È possibile ricavare tale coppia dalla (7):

$$\delta L_p = C_p d\alpha = - \frac{N^2}{2\mathcal{R}^2} i^2 d\mathcal{R} \quad \Rightarrow \quad C_p = - \frac{N^2}{2\mathcal{R}^2} i^2 \frac{d\mathcal{R}}{d\alpha} \quad (8)$$

Il dispositivo illustrato in figura (1) non è chiaramente adatto a produrre un moto continuo del rotore, poiché la barra tende a stabilizzarsi sulla posizione a riluttanza minima. I motori a riluttanza variabile presentano quindi più di una coppia polare statorica. Generalmente anche sul rotore sono presenti più coppie polari. In tal caso, per consentire il buon funzionamento della macchina, il numero delle coppie polari statoriche deve essere diverso da quello delle coppie polari rotoriche. In figura 2 è illustrato il funzionamento di un motore a tre coppie statoriche e due rotoriche. In figura 2.a i due poli rotorici a - a' sono affacciati ai poli statorici eccitati della prima fase. La coppia b - b' non è invece allineata a nessuna coppia di statore. Quando viene commutata la coppia statorica polare eccitata (1 f. → 2 f.) si origina una coppia che tende a minimizzare la riluttanza del nuovo circuito

^(*) In questo caso, non è possibile calcolare la riluttanza magnetica utilizzando la nota formula $\mathcal{R} = L / (\mu_0 S)$, poiché non è più definibile a priori la distribuzione delle linee del campo di induzione magnetica. Tuttavia è sempre possibile definire la riluttanza come rapporto tra la forza magnetomotrice NI associata ad un avvolgimento eccitatore ed il flusso ad esso concatenato. Intuitivamente, la riluttanza rimane quindi una misura di quanto il circuito magnetico si "opponesse" alla sua magnetizzazione.

magnetico venutosi a creare, ruotando il rotore in senso antiorario e allineando la coppia b-b' con la coppia statorica che costituisce la fase 2 (figura 2.b). Successivamente, l'eccitazione della terza coppia polare statorica produce una rotazione che allinea la coppia a-a' alla coppia 3 f. (figura 2.c).

Una caratteristica dei motori passo a riluttanza variabile è quella di poter realizzare un numero di passi per giro molto elevato. tale numero può essere valutato come il prodotto tra le coppie polari statoriche n ed il numero m di denti rotorici. L'ampiezza angolare del passo, espressa in gradi, vale:

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{n m} \quad (9)$$

Ad esempio, il motore in figura 2 presenta quindi 12 passi/giro ed un angolo di passo pari a 30° .

I motori a riluttanza variabile multistack hanno più settori rotore - statore (figura 3). Ogni settore ha lo stesso numero di denti sullo statore e sul rotore. I denti dello statore di ogni settore sono allineati, mentre quelli del rotore sono sfalsati di un angolo α_p pari $360^\circ/sm$, dove s è il numero di settori. In figura 3 viene mostrato un motore multistack a tre settori. I tre rotori sono sfalsati di un angolo pari a 15° . Normalmente, durante il funzionamento di tali macchine, solo uno dei settori viene eccitato; nel caso illustrato, lo statore della fase A è eccitato, mentre gli avvolgimenti degli statori B e C non sono percorsi da corrente. Diseccitando gli avvolgimenti del settore A e contemporaneamente eccitando il settore B, il rotore ruota in senso orario di un angolo pari ad α_p . Al contrario, diseccitando il settore A ed eccitando il settore C, il rotore gira di un angolo in senso antiorario. È inoltre possibile far eseguire al rotore un semipasso di ampiezza $\alpha_p/2$, eccitando contemporaneamente 2 settori; ad esempio, se, partendo dalla configurazione illustrata in figura 3, si eccita lo statore B senza diseccitare lo statore A, la coppia elettromagnetica tende a ruotare il rotore di 7.5° , su una posizione di equilibrio a metà strada tra le due configurazioni che si ottengono eccitando solo il settore A e solo il settore B.

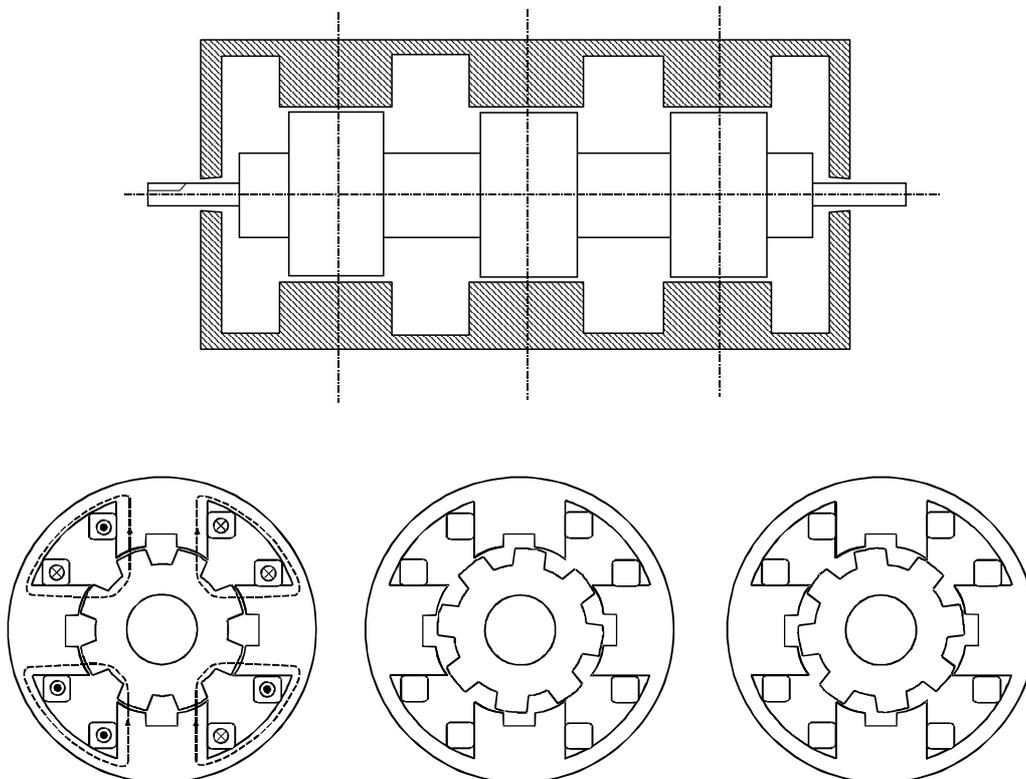


Figura 3. - Sezione schematica di un motore a riluttanza variabile multistack.

MOTORI PASSO A MAGNETE PERMANENTE

Il rotore di queste macchine è costituito da un magnete permanente, che genera un campo magnetico diretto perpendicolarmente all'asse del rotore. Il principio di funzionamento di tali motori è schematicamente illustrato in figura 4: in figura 4.a la fase 1 è eccitata. I due poli statorici eccitati mostrano quindi una polarità magnetica (in questo caso, il polo statorico in alto è il polo sud, quello in basso il nord). Tale polarità genera una coppia che tende a ruotare il rotore in modo che i poli rotorici si affaccino ai poli statorici di segno opposto. Diseccitando la fase 1 ed eccitando la fase 3, il rotore ruota in modo da mantenere il polo nord rotorico affacciato al polo sud statorico ed il polo sud rotorico con il polo nord rotorico.

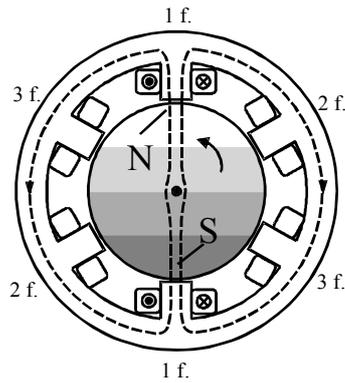


Figura 4.a

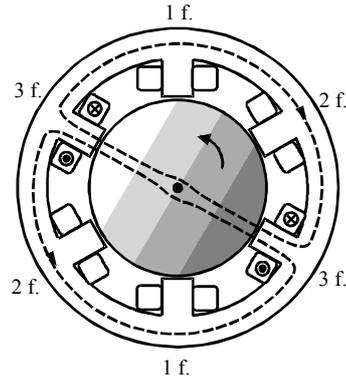


Figura 4.b

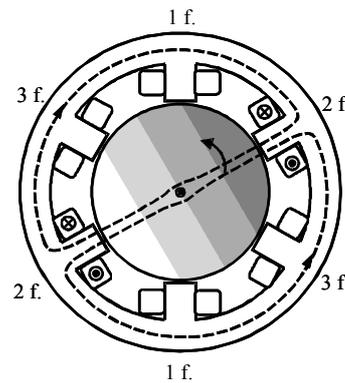


Figura 4.c

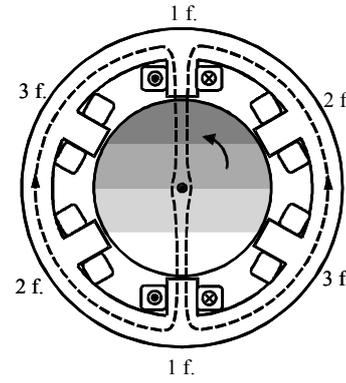


Figura 4.d

Il motore passo a magnete permanente presenta una coppia residua o di bloccaggio, ovvero una coppia che rimane anche quando il circuito di eccitazione viene spento. In questo caso, il rotore tende a mantenere la posizione in cui è minima la riluttanza del circuito magnetico percorso dal campo generato dal magnete permanente.

MOTORI PASSO IBRIDI

Un motore passo ibrido è costituito da un magnete permanente che genera un campo magnetico coassiale con il rotore, e da due settori statore - rotore, che denomineremo settore nord e settore sud, corrispondenti rispettivamente al polo nord ed al polo sud del magnete permanente (vedi figura 5). La macchina è realizzata in modo che il campo magnetico prodotto dal magnete permanente si sommi a quello prodotto dagli avvolgimenti di eccitazione. Si faccia riferimento alla figura 5, in cui vengono raffigurate una sezione assiale della macchina (figura 5.a) e le sezioni trasversali A-A' e B-B' corrispondenti rispettivamente al settore nord e sud (figure 5.b, 5.c e 5.d). In figura 5.b è illustrata la situazione in cui sono eccitate le coppie polari di statore 1 e 3. Nel settore nord (sezione A-A') due denti del rotore sono affacciati ai due denti dell'espansione polare 1. I rotori sono sfasati in modo tale che, al settore sud, i due denti del rotore siano affacciati all'espansione 3. In tal modo il percorso del flusso magnetico attraversa il traferro nel settore sud in corrispondenza dell'espansione polare 3, percorre assialmente il rotore lungo il magnete permanente, e riattraversa il traferro al settore nord in corrispondenza dell'espansione 1, per richiudersi sulla carcassa dello statore. Eccitando gli avvolgimenti delle espansioni 2 e 4, si genera una coppia che tende a ruotare in senso antiorario il rotore. Tale coppia è dovuta a due azioni concomitanti:

- 1) l'interazione tra i due campi magnetici generati dal magnete permanente e dagli avvolgimenti di statore. In base a tale azione, nel settore nord l'espansione 4 tende a respingere i denti rotorici, mentre l'espansione 2 li attrae. Il contrario avviene nel settore sud.
- 2) la seconda è quella che tende a minimizzare la riluttanza del circuito magnetico costituito dal sistema. Tale azione tende, nel settore nord, ad allineare i denti rotorici con le espansioni polari eccitate.

Per effetto di tale coppia, il rotore si porta nella posizione illustrata in figura 5.c: nel settore nord i denti del rotore sono affacciati all'espansione polare 2, mentre nel settore sud i denti del rotore sono affacciati all'espansione 4.

Eccitando nuovamente le espansioni polari 1 e 3, ma con polarità opposta a quella precedente, il rotore effettua un'ulteriore rotazione in senso antiorario, portandosi nella posizione di equilibrio mostrata in figura 5.d. Come il motore passo a magneti permanenti, il motore ibrido presenta una coppia residua (o di bloccaggio) che, una volta diseccitati gli avvolgimenti di statore, tende a bloccare il rotore nell'ultima posizione di equilibrio raggiunta.

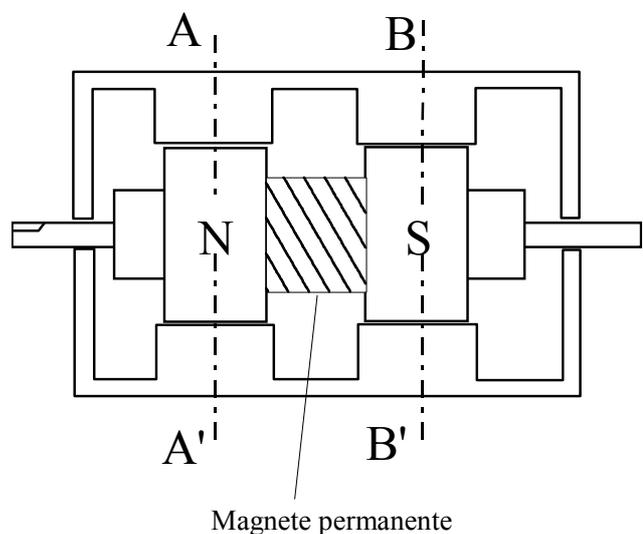
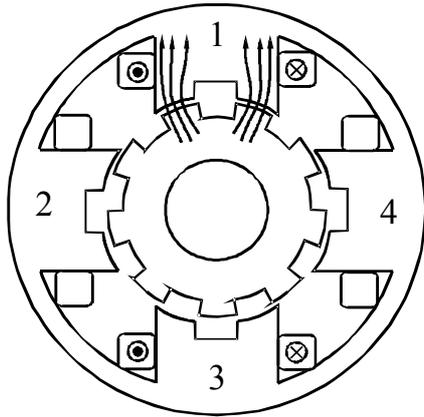


Figura 5.a - Sezione schematica di un motore passo ibrido.

I motori a riluttanza ibridi è possibile avere dei passi minori degli altri tipi di motori a riluttanza e, a parità di dimensioni, forniscono una coppia maggiore. In generale, è comunemente adottato come passo angolare un valore pari a 1.8° , che corrisponde a duecento passi per una rotazione completa del rotore.

sez. A-A'



sez. B-B'

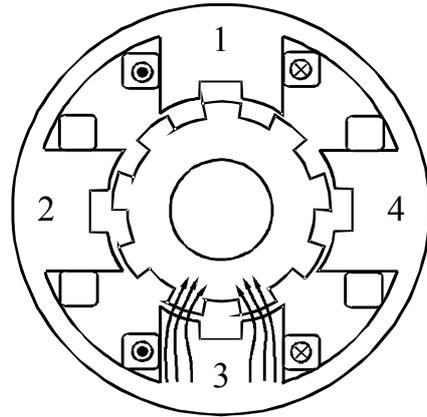


Figura 5.b

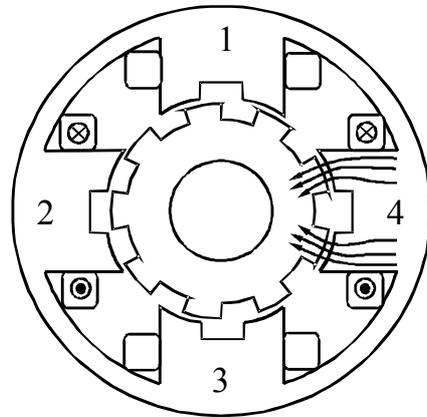
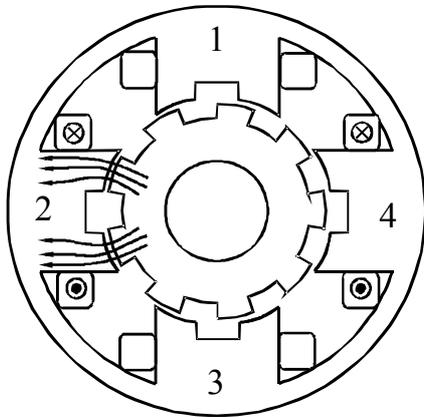


Figura 5.c

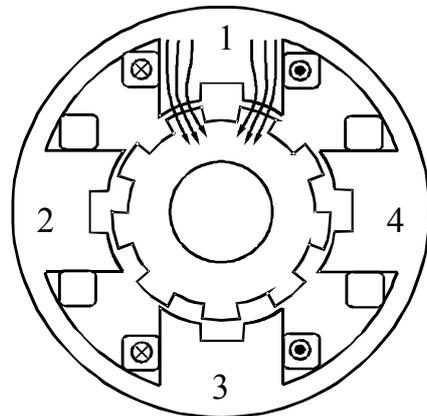
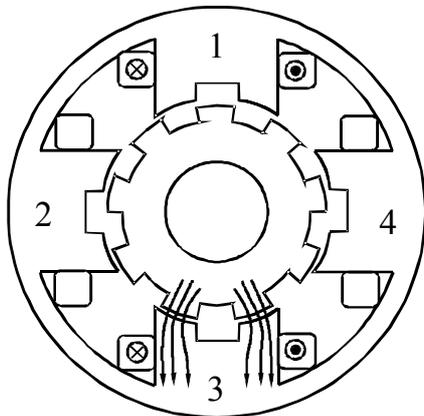


Figura 5.d