

1. Generalità

I motori brushless sono idealmente derivati dai motori in DC con il proposito di eliminare il collettore a lamelle e quindi le spazzole. Esistono due tipi di motore brushless:

- DC o trapezoidali;
- AC o sinusoidali.

2. Motore brushless DC o trapezoidale

In un motore in DC a spazzole l'avvolgimento rotorico (indotto) è alimentato dall'esterno attraverso le spazzole e le lamelle di collettore. La rotazione del rotore determina lo spostamento relativo delle spazzole sul collettore e la conseguente alimentazione delle spire opportune. Il collettore a lamelle insieme alle spazzole funge da commutatore automatico dell'alimentazione sugli avvolgimenti rotorici. Nel motore brushless il collettore viene sostituito da un commutatore elettronico controllato. Ciò rende possibile lo scambio delle posizioni tra rotore e statore, ovvero il campo viene ora generato da magneti permanenti posti sul rotore, mentre gli avvolgimenti sono realizzati sullo statore (fig. 1). Un'evoluzione ha portato alla realizzazione di questa macchina con tre avvolgimenti statorici posti a 120° meccanici.

Il brushless trapezoidale ha una magnetizzazione del rotore tale che, una volta posto in rotazione, produce sugli avvolgimenti statorici una f.e.m indotta con caratteristiche profilo trapezoidale. Tale sarà dunque il profilo della f.c.e.m. E durante l'esercizio della macchina. I tre avvolgimenti statorici, posti a 120° meccanici, vedranno E con i rispettivi ritardi temporali.

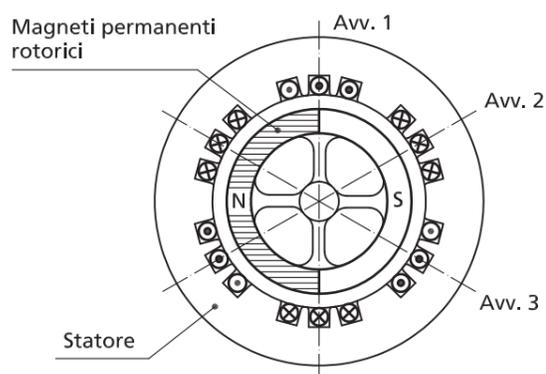
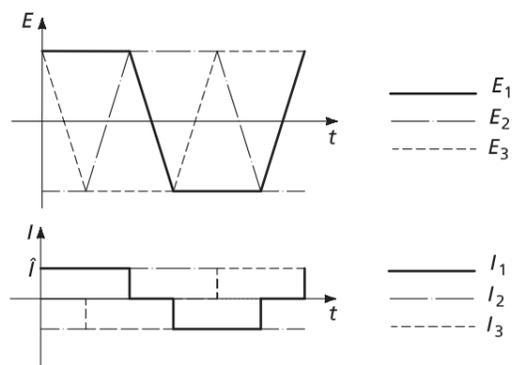


Fig. 1. Sezione del motore brushless DC.

3. Potenza del motore brushless DC

Alimentando il motore e pilotando opportunamente le correnti I in modo che siano come nella figura 2 si nota come

Fig. 2. Andamento delle correnti e delle f.c.e.m. E nel brushless trapezoidale.



in ogni istante il prodotto $E \cdot I$, equivalente alla potenza meccanica e dunque legato alla coppia, è dovuto a due avvolgimenti per volta ed è costante. Dunque:

$$P = 2 \cdot E \cdot I$$

Il motore per funzionare ha bisogno di un circuito di comando che tenga conto della posizione angolare dell'albero, tramite alcuni sensori (effetto Hall), che vanno correttamente posizionati in fase sullo statore.

4. Coppia per il motore brushless DC

Per questo motore la coppia si può esprimere come:

$$T = I \cdot \underbrace{\left(\frac{d}{dt} \Phi_m \cdot \frac{1}{\omega} \right)}_E$$

dove a destra compare, oltre alla matrice I delle correnti statoriche, la derivata, rispetto al tempo, del flusso proveniente dal rotore dovuto ai magneti rotorici (matrice Φ_m), e l'inverso della velocità angolare ω .

Si noti la similitudine con il motore DC a spazzole per il quale la coppia T_m è espressa da:

$$T_m = I \cdot \left(E \cdot \frac{1}{\omega} \right)$$

Se si ruota manualmente l'albero di un motore brushless DC si avvertono degli *scatti*. Questi sono segnale di un effetto negativo di impuntamento detto *cogging*. Il rotore tende a posizionarsi in modo da creare percorsi magnetici a minima riluttanza (fig. 4), come per esempio i tratti di circuito magnetico statorico tra due cave consecutive. Ciò da luogo a una discontinuità di coppia detta *ripple di coppia* che può avere ampiezze anche del 30%. Per ridurre il problema si co-

La matrice I delle correnti è espressa come $I = (i_1, i_2, i_3)$; vedi figura 3.

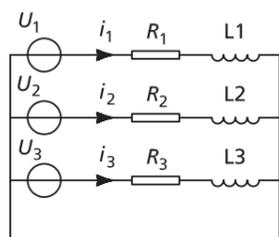


Fig. 3. Convenzioni per il brushless DC.

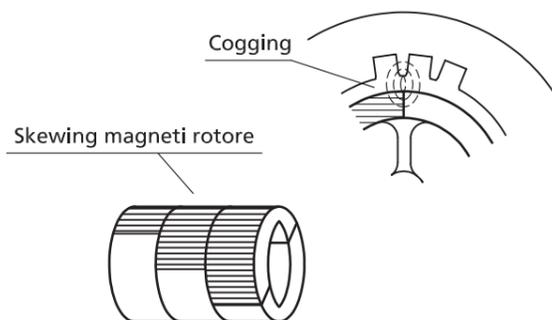


Fig. 4. Fenomeno di cogging e skewing rotorico per il motore brushless DC.

struisce il motore con un certo *skewing* rotorico ovvero con un lieve *avvitamento longitudinale* del circuito magnetico o nella disposizione dei magneti (fig. 4).

Un'altra causa di ripple di coppia è l'impossibilità fisica di ottenere le i esattamente come nella figura 2, commutando la U di alimentazione sugli avvolgimenti i quali sono fortemente induttivi. Nella figura 5 è rappresentato lo schema a blocchi di un azionamento per motori brushless DC.

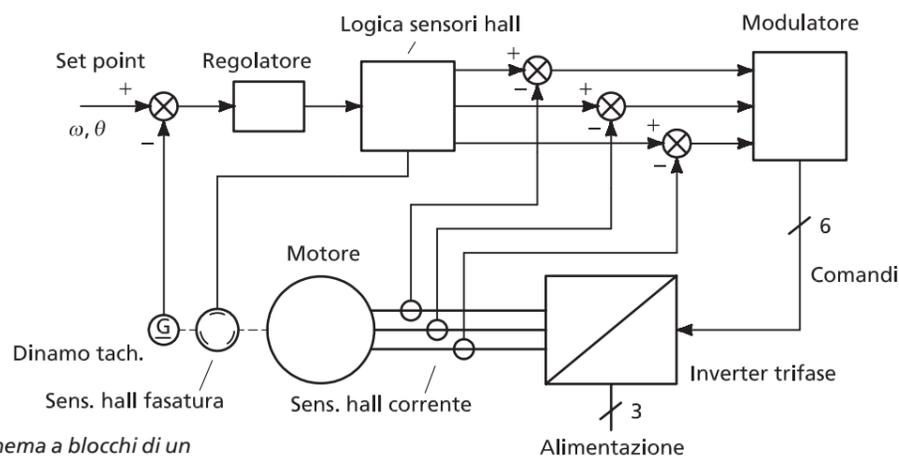


Fig. 5. Schema a blocchi di un azionamento per il motore brushless DC.

5. Motore brushless AC o sinusoidale

Il motore brushless AC è in sostanza una evoluzione di quello DC. Lo statore viene alimentato da una terna di i sinusoidali sfasate tra loro di 120° elettrici (fig. 6); siccome la coppia T_m è ancora determinata dal prodotto della f.c.e.m. E e dalla cor-

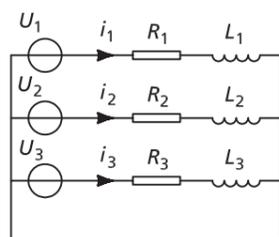


Fig. 6. Convenzioni per il motore brushless AC.

rente di armatura I_m (essendo fondamentalmente ancora un motore DC),

$$T_m = \frac{E \cdot I_m}{\omega}$$

per ottenere una coppia costante è necessario che la f.c.e.m. abbia anch'essa andamento sinusoidale. Ciò si ottiene magnetizzando opportunamente il rotore.

Il brushless AC, dal punto di vista esterno del collegamento è simile al DC.

6. Coppia del motore brushless AC

La coppia è legata alle correnti, ma essendo queste sinusoidali, è difficilmente controllabile dall'azionamento. Si cerca dunque un modello che evidenzi una componente controllabile della I che influenzi la coppia stessa: se in particolare si riesce a scomporre la I nella componente che origina coppia e nella componente che genera flusso ci si riconduce alla situazione ben nota del motore DC. Occorrono due trasformazioni:

- *trasformazione trifase-bifase* del riferimento per le grandezze elettriche;
- *trasformazione* del riferimento da *fisso a rotante*.

Queste trasformazioni portano a riferire le grandezze a due assi ortogonali rotanti: l'asse d allineato con il flusso e l'asse q posto in quadratura (macchina orientata).

Si può dimostrare che l'espressione della coppia meccanica, vale:

$$T_m = \varphi_m \cdot i_q$$

Quindi con l'opportuno orientamento della macchina, il controllo della coppia meccanica si attua verificando la componente i_q della corrente assorbita. Occorre tuttavia precisare che i_q non verrà direttamente letta da un sensore, ma sarà calcolata in tempo reale attraverso le I assorbite dalle fasi e tenendo conto dell'esatta posizione rotorica. Il brushless AC per funzionare necessita quindi di almeno due trasduttori di corrente per la lettura delle I assorbite, di un trasduttore di posizione rotorica e di un sistema di calcolo molto veloce, come per esempio un *DSP (Digital Signal Processor)*, per ricavare la i_q e per comandare conseguentemente la U di alimentazione (fig. 7). Ovviamente avendo la necessità di variare a piacere la terna di tensioni trifase che pilotano il motore, è necessario integrare nel sistema anche un inverter (vedi Scheda 56).

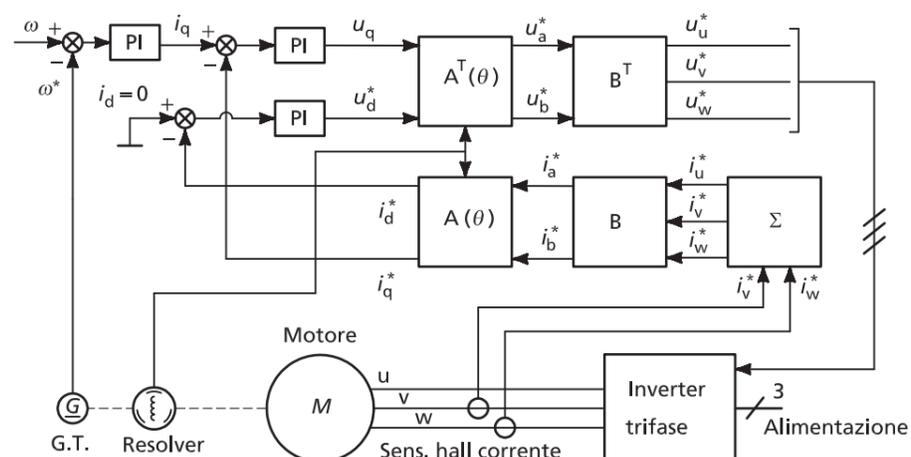


Fig. 7. Schema a blocchi di un azionamento per motore brushless AC.

Il blocco Σ a partire da due delle I assorbite dal motore calcola la terza e le presenta al successivo blocco B il quale opera la trasformazione delle I dal sistema trifase a un equivalente sistema bifase. Il blocco $A(\theta)$ riceve dal resolver l'informazione θ sulla posizione del rotore e ricalcola le I assorbite equivalenti in bifase ottenute dal blocco B , sulla base di un nuovo riferimento rotante; quelle I sono la componente in fase e in quadratura al flusso del campo magnetico. La componente i_{qr} , strettamente legata alla coppia è confrontata con la coppia richiesta (anello di coppia) proveniente dal regolatore PI che riceve l'errore dell'anello esterno di velocità. L'errore dell'anello interno di corrente entra in un altro regolatore PI e rende in uscita una componente della U da applicare al motore (bifase su riferimento rotante). La corrente in fase i_d è confrontata con il set point $i_d = 0$ e restituisce attraverso il terzo regolatore PI la seconda componente della U richiesta (bifase su riferimento rotante). Il blocco $A^T(\theta)$ compie l'operazione inversa del blocco $A(\theta)$ e ricostruisce la U da applicare al motore su riferimento fisso ma ancora in bifase. Il blocco B^T compie l'operazione inversa del blocco B e a partire dalla coppia di tensioni, in bifase ricostruisce la terna trifase equivalente. Infine l'inverter applica al motore la U richiesta ottenuta dal blocco B .

7. Prestazioni applicazioni, parametri

I motori brushless presentano vantaggi e svantaggi rispetto al motore DC tradizionale. I principali vantaggi sono:

- eliminazione delle spazzole notoriamente soggette a usura;
- buon rapporto potenza-peso e potenza-dimensioni;
- ottime prestazioni dinamiche;
- migliore raffreddamento degli avvolgimenti.

Gli svantaggi più salienti consistono in:

- alti costi;
- tecnologia non diffusa;
- per funzionare necessitano di essere integrati in un azionamento.

L'elevato ripple di coppia del brushless DC (vedi paragrafo 4), lo rende idoneo per applicazioni con carichi aventi grande inerzia, oppure per applicazioni con elevato numero di giri (per

esempio lavatrici, ventilatori industriali, veicoli elettrici ecc.). Il brushless AC ha prestazioni migliori rispetto a quello DC, non presenta infatti ripple di coppia, per contro richiede un azionamento più complesso e costoso. Trova applicazione nei sistemi industriali di posizionamento e controllo assi. I parametri principali per il motore brushless sono elencati nella tabella 1 ove sono riportati a titolo di esempio i dati di un motore, mentre nella tabella 2 si riporta in breve il significato dei parametri:

Tab. 1.

Velocità nominale [rpm]*	Coppia stallo [Nm]	Coppia nominale [Nm]	Coppia picco [Nm]	Potenza nominale [kW]	Tensione nominale [V]	Corrente stallo [A]	Corrente nominale [A]	Corrente picco [A]
1 200	12,0	11,2	41	1,407	380	2,9	2,7	10,0

*rpm = Revolution Prime Minute (giri al minuto primo)

Tab. 2.

Velocità nominale	Velocità di rotazione con tensione nominale e corrente nominale
Coppia di stallo	Coppia all'albero a rotore bloccato con tensione nominale
Coppia nominale	Coppia all'albero con potenza assorbita nominale a velocità nominale
Coppia di picco	Coppia massima consentita per un periodo limitato
Potenza nominale	Potenza meccanica resa all'albero con tensione e corrente nominali
Tensione nominale	Tensione di alimentazione nominale degli avvolgimenti
Corrente di stallo	Corrente assorbita con rotore bloccato e tensione nominale
Corrente nominale	Corrente assorbita con potenza resa all'albero e velocità nominali
Corrente di picco	Corrente massima consentita per un periodo limitato