



Il motore brushless (1° parte): principi di funzionamento

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

L. Frosini

Motore sincrono a magneti permanenti

Nella macchina sincrona tradizionale, il flusso induttore viene prodotto attraverso un apposito circuito di eccitazione.

Tuttavia, quando nelle normali operazioni della macchina non sia richiesta una regolazione di tale flusso, si possono realizzare macchine sincrone con eccitazione a magneti permanenti (**Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM**).

Questa possibilità, che consente di ridurre gli ingombri del rotore e di annullare (o quasi) le perdite Joule di eccitazione, è particolarmente sfruttata nella realizzazione di motori sincroni di piccola e media potenza (generalmente <50 kW, ma ne esistono anche oltre 100 kW), destinati ad una alimentazione a frequenza variabile.

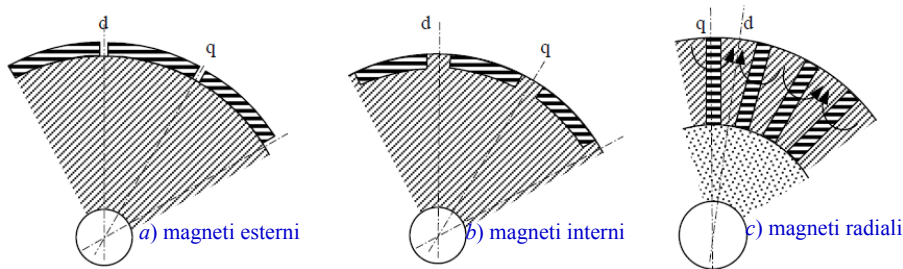
Il sistema formato da un motore sincrono a magneti permanenti, dal suo alimentatore e dal suo sistema di controllo viene usualmente definito "motore brushless".

La disposizione dei magneti sul rotore può essere superficiale (*a*), oppure i magneti possono essere immersi nel ferro di rotore (magnet interni: *b* o *c*).

2

L. Frosini

Motore sincrono a magneti permanenti



Nei casi *a* e *b*, i magneti presentano le superfici magnetizzate in corrispondenza del traferro.

Nel caso *c*, i magneti sono disposti radialmente nel rotore, la magnetizzazione assume andamento trasversale e il flusso viene convogliato al traferro attraverso i settori di materiale ferromagnetico dolce. In questo modo si possono realizzare macchine con elevato numero di poli e ottenere una concentrazione di flusso al traferro con valori di induzione più alti di quelli disponibili nei singoli magneti. Si noti che esistono molti altri tipi di configurazione a magneti interni, che in parte illustreremo più avanti.

3

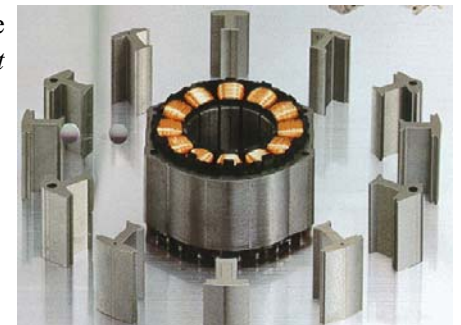
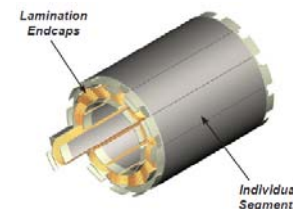
L. Frosini

Motore sincrono a magneti permanenti

Lo statore mantiene generalmente la forma tipica delle macchine sincrone e asincrone, con un avvolgimento trifase distribuito nelle cave. In alcuni motori lo statore può però presentarsi nella versione con avvolgimenti concentrati:



Un'ulteriore variante dello statore ad avvolgimenti concentrati prevede la costruzione del nucleo di statore a segmenti (*stator segment lamination technology*):



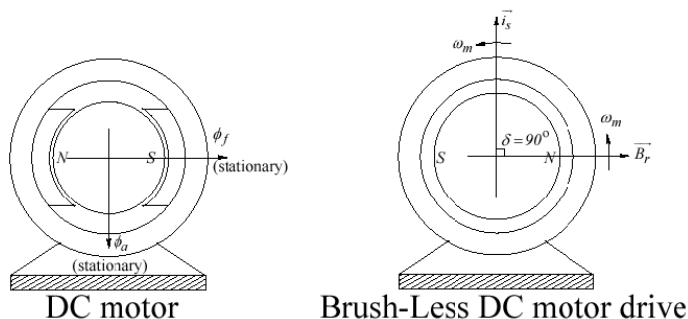
Approfondiremo più avanti gli aspetti costruttivi, analizziamo ora quelli funzionali.

4

Motore sincrono a magneti permanenti

Dal punto di vista funzionale, alcuni motori brushless possono essere considerati come motori in corrente continua a magneti permanenti con commutatore elettronico: questo vale in particolare per i motori brushless comandati con la tecnica trapezoidale, detti appunto *brushless DC motor*.

Infatti, sia nei motori in corrente continua che nei motori brushless, i vettori rappresentativi dei campi statorico e rotorico risultano sfasati (idealmente) di 90° elettrici.



5

Motore sincrono a magneti permanenti

Nei **motori in corrente continua**:

- il campo di eccitazione prodotto dai magneti permanenti statorici è stazionario;
- il campo prodotto dalle correnti che circolano negli avvolgimenti rotorici viene mantenuto stazionario dall'azione del commutatore meccanico (sistema costituito da collettore a lamelle e spazzole), che inverte il verso della corrente nei conduttori rotorici ogni volta che attraversano il piano di commutazione.

Questo commutatore meccanico converte la corrente continua in ingresso alle spazzole in una corrente alternata (a onda quadra) nei conduttori rotorici, la cui frequenza è legata alla velocità di rotazione del rotore, e quindi fa sì che la distribuzione del campo rotorico si mantenga sempre mediamente perpendicolare a quella del campo statorico, sviluppando una coppia praticamente costante.

6

Motore sincrono a magneti permanenti

Nei **motori brushless**:

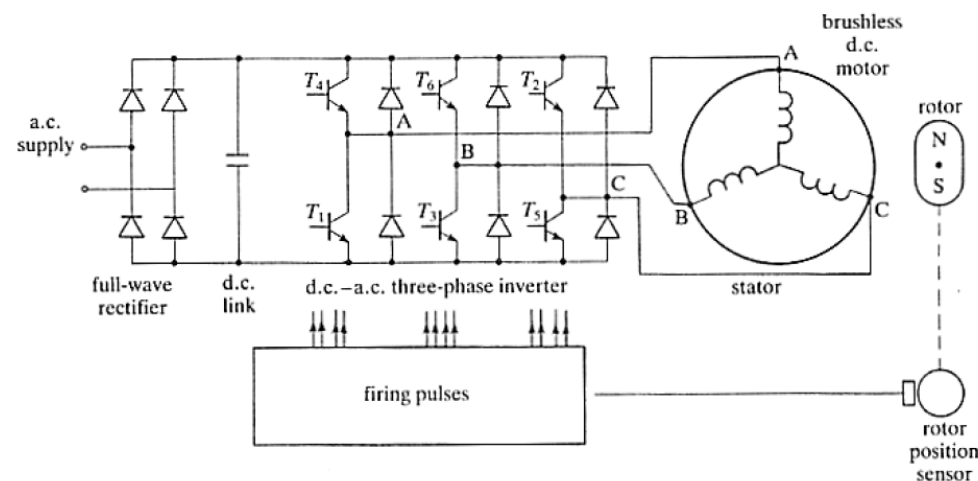
- il campo prodotto dai magneti permanenti rotorici è rotante;
- il campo rotante prodotto dalle correnti circolanti nei tre avvolgimenti statorici è mantenuto mediamente in anticipo di 90° elettrici dall'azione del controllo sull'inverter che alimenta il motore.

Per ottenere questo risultato, gli avvolgimenti statorici sono alimentati da un inverter, i cui interruttori statici vengono commutati da un sistema di controllo in base ai segnali logici forniti da un sensore di posizione coassiale al rotore.

In questo modo, la distribuzione delle correnti statoriche si modifica in sincronia con la posizione del rotore e quindi il campo magnetico rotante statorico risulta (idealmente) in anticipo di 90° elettrici rispetto a quello rotorico, in qualsiasi condizione di funzionamento.

7

Il controllo dei motori brushless



8

Il controllo dei motori brushless

Il controllo del motore brushless può essere realizzato attraverso la **tecnica trapezoidale** o la **tecnica sinusoidale**.

Tali tecniche differiscono tra loro per la forma d'onda di.

- corrente, imposta dal convertitore;
- forza contro elettromotrice di fase, dipendente dalla disposizione degli avvolgimenti statorici e dalla disposizione/forma dei magneti rotorici.

Il motore che utilizza la tecnica trapezoidale è anche detto **DC brushless (BLDC)** perché è equivalente al duale di un motore a commutazione in corrente continua con l'eccitazione a magneti permanenti.

In entrambi i casi la corrente nei conduttori deve invertire polarità ogni volta che un polo di magnete permanente gli passa davanti, al fine mantenere la coppia unidirezionale.

9

DC Brushless (BLDC)

- Nel motore in c.c. questa inversione di polarità è realizzata dal collettore e dalle spazzole: poiché il collettore è solidale col rotore, gli istanti di commutazione sono sincronizzati automaticamente con l'alternarsi delle polarità del campo magnetico sotto cui i conduttori di rotore passano;
- Nel motore DC brushless l'inversione di polarità è realizzata dagli interruttori statici che devono commutare in sincronismo con la posizione del rotore.

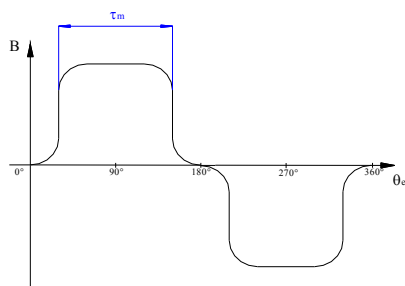
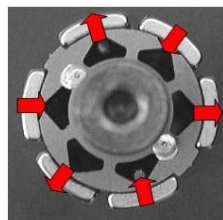
Questo processo di commutazione è simile nelle due macchine, per cui le equazioni che definiscono le prestazioni della macchina e le caratteristiche coppia/velocità sono quasi identiche.

La sezione di un motore in c.c. a magneti permanenti è analoga a quella di un motore DC brushless con rotore esterno (se escludiamo la presenza di collettore e spazzole).

10

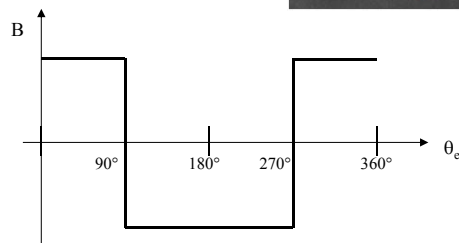
DC Brushless

Il motore DC brushless è solitamente isotropo (a magneti superficiali) e i poli magnetici producono una distribuzione di induzione al traferro uniforme di andamento quasi rettangolare.



Es. di induzione al traferro di un motore a vuoto, 2 poli, passo magnetico $\tau_m = 120^\circ$

angolo elettrico: $\theta_e = p_p \cdot \theta$



Induzione al traferro di un motore a vuoto, 2 poli, passo magnetico $\tau_m = 180^\circ$ (v. pagina seguente)

11

DC Brushless

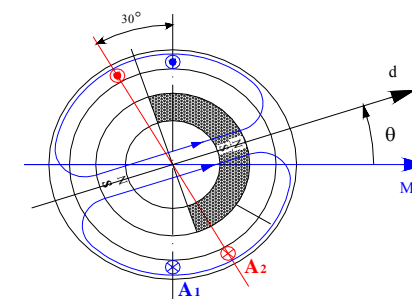
Consideriamo il campo magnetico prodotto da un rotore a magneti permanenti a due poli, il cui asse forma un angolo θ rispetto ad un dato riferimento, e il flusso ψ_1 (da esso prodotto) concatenato con una bobina di statore A_1 .

Quando $\theta = 90^\circ$, il flusso magnetico passa ai lati dei conduttori e non concatena la bobina: in questa posizione $\psi_1 = 0$.

Analogamente, $\psi_1 = 0$ per $\theta = 270^\circ$.

Il flusso concatenato raggiunge un valore massimo positivo per $\theta = 0^\circ$, quando teoricamente tutto il flusso magnetico passa simmetricamente attraverso la bobina.

Si suppone che i magneti abbiano un arco polare di 180° ($\tau_m = 180^\circ$) e che siano magnetizzati radialmente.



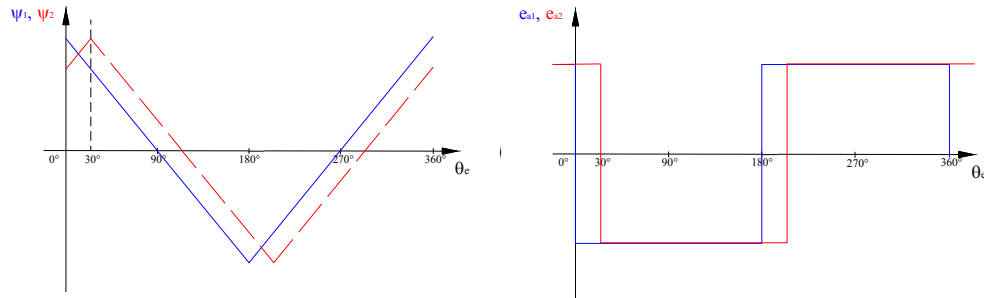
statore con 12 cave, 2 cave per polo e per fase

12

DC Brushless

Il flusso concatenato ψ_1 con la bobina A_1 varia linearmente con la posizione angolare del rotore ed è massimo quando l'asse magnetico di rotore e l'asse magnetico della bobina sono sovrapposti ($\theta = 0^\circ$).

Il flusso concatenato ψ_2 con la bobina A_2 (appartenente alla stessa fase) ha lo stesso andamento del precedente, ma è in ritardo rispetto a questo di 30° (dato che $p_p = 1$, angolo elettrico e magnetico coincidono). Derivando i flussi concatenati, si trovano le f.e.m. indotte nelle due bobine e la f.e.m. indotta nella fase come somma di e_{a1} ed e_{a2} .



13

DC Brushless

In realtà, il magnete non copre mai completamente un passo polare, perciò, a causa dello spazio vuoto tra il magnete del polo N e il magnete del polo S, l'angolo θ può variare di alcuni gradi intorno alla posizione $\theta = 0^\circ$ senza cambiamenti nel flusso concatenato (il valore massimo del flusso concatenato non si ha solo per $\theta = 0^\circ$, ma nell'intorno di questo angolo). Questo fatto dà origine al *flat-top* nella forma reale del flusso concatenato (trapezoidale invece che triangolare).

Consideriamo ora la forza contro elettromotrice e_1 relativa alla fase 1 complessiva e derivata dal flusso concatenato complessivo ψ_1 :

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \omega_m \frac{d\psi_1}{d\theta} \rightarrow \text{velocità angolare}$$

Questa forza contro elettromotrice e_1 assume teoricamente una forma rettangolare (nella realtà gli angoli tendono ad essere smussati e la forma quasi trapezoidale).

Il convertitore fornisce all'avvolgimento di fase 1 la corrente i_1 , da un'alimentazione in c.c., con la stessa polarità della sua f.e.m., cosicché la potenza fornita è data da: $e_1 i_1$.

14

DC Brushless

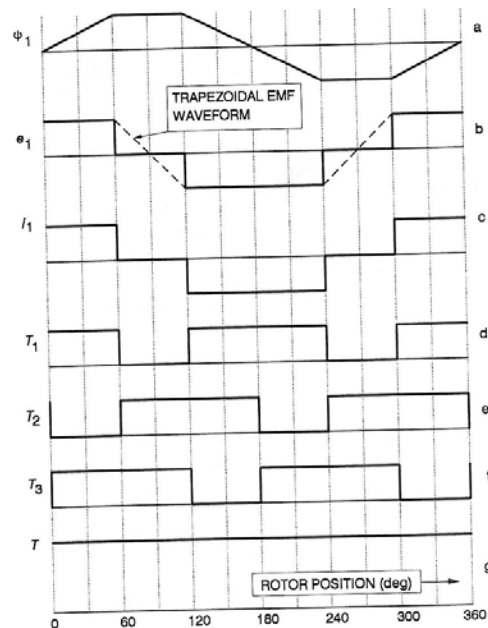


Fig. 1.6 Waveforms of flux-linkage, back-EMF, current and torque in an elementary DC commutator motor or brushless DC motor

Se la velocità angolare è fissa e si trascurano tutte le perdite, la potenza elettrica in ingresso è convertita in potenza meccanica $T_1 \omega_m$, dove T_1 è la coppia prodotta da un avvolgimento di fase.

Questa coppia è unidirezionale, perché ottenuta come prodotto di una corrente per una f.c.e.m., entrambe con la stessa polarità.

Tuttavia, la coppia prodotta da un solo avvolgimento non è costante: ci sono periodi in cui la coppia è nulla, in corrispondenza del *flat-top* del flusso concatenato.

15

DC Brushless

Se invece di un solo avvolgimento ce ne sono tre, i cui assi sono simmetricamente disposti a 120° l'uno dall'altro, si possono ottenere forme di coppia prodotte dagli avvolgimenti 2 e 3 identiche a T_1 , ma traslate in fase di 120° e 240° rispettivamente.

La coppia totale è data dalla somma $T_1 + T_2 + T_3$ ed è (teoricamente) costante.

Facendo l'analogia tra i due motori (DC brushless e in c.c.):

- le bobine di rotore del motore in c.c. sono funzionalmente equivalenti alle bobine di statore del motore DC brushless;
- le spazzole e il collettore a lamelle sono funzionalmente equivalenti al convertitore elettronico;

Le correnti nelle tre fasi di statore del motore DC brushless sono ad onda quadra per 120° e solo due fasi conducono in ogni istante.

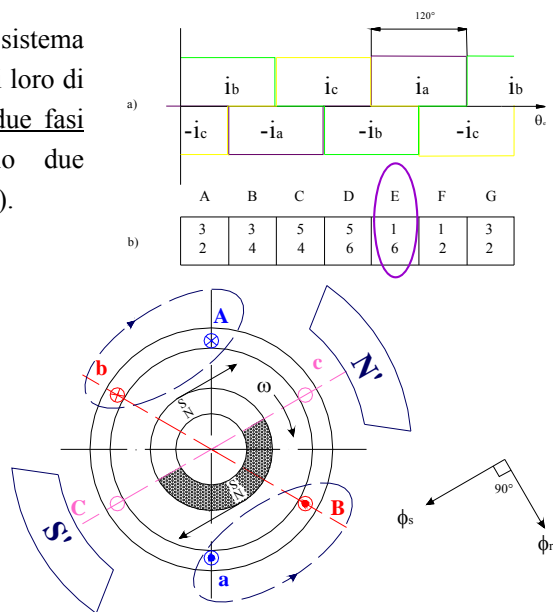
16

DC Brushless

Le correnti di fase costituiscono un sistema di tre onde quasi quadre sfasate tra di loro di 120° elettrici. In ogni istante solo due fasi sono percorse da corrente (solo due interruttori statici sono in conduzione).

Le correnti di statore, che in ogni istante interessano due fasi, generano complessivamente un campo magnetico i cui poli fittizi N'-S' interagiscono con i poli magnetici rotorici reali N-S, dando origine alla coppia meccanica.

Supponendo di essere a metà dell'intervallo E:



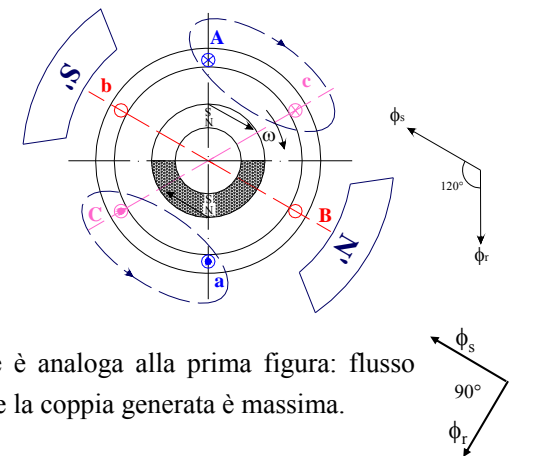
17

DC Brushless

Alla fine dell'intervallo E il rotore è ruotato di ulteriori 30° elettrici in verso orario, mentre il campo magnetico di statore è rimasto fisso: quindi lo sfasamento tra flusso di rotore Φ_r e statore Φ_s non è più 90° , ma diventa 60° .

All'inizio dell'intervallo F il campo statorico scatta in avanti (in verso orario) di 60° elettrici, a seguito della commutazione delle fasi attuata dall'inverter, per cui lo sfasamento tra flusso di rotore Φ_r e di statore Φ_s diventa 120° .

A metà dell'intervallo F la situazione è analoga alla prima figura: flusso rotorico e statorico sono sfasati di 90° e la coppia generata è massima.



18

DC Brushless

A seguito della commutazione, lo sfasamento tra il campo magnetico statorico e rotorico passa istantaneamente da 60° a 120° per poi raggiungere il valore di 90° , condizione di coppia massima, a metà intervallo.

La condizione di massima coppia è rispettata mediamente anziché istantaneamente, per cui è presente un'ondulazione di coppia, la cui entità è riducibile a valori accettabili tramite l'uso dei tre regolatori di corrente: transitorio con tre fasi on, una in presa di carico, una in perdita di carico e una con carico costante.

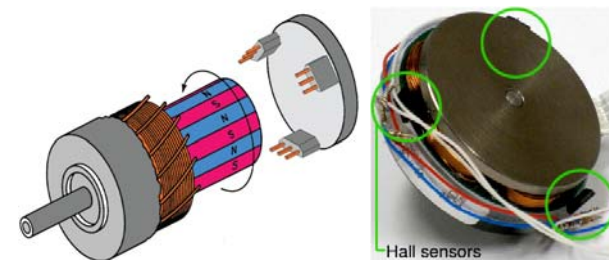
Per commutare la corrente nell'istante opportuno, è necessario conoscere la posizione del rotore ogni 60° : a tal fine, si inserisce coassialmente all'albero un **sensore di posizione**, che comanda la commutazione della corrente nelle tre fasi.

Questo trasduttore è molto semplice (sonda a effetto Hall), dovendo discriminare un numero limitato di posizioni per giro: è sufficiente individuare il "sesto" di angolo giro elettrico in cui si trova il rotore.

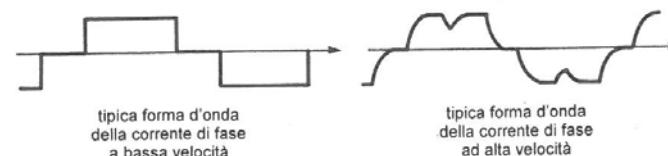
19

DC Brushless

Sensori a effetto Hall utilizzati per il controllo della posizione nei DC brushless:



Si osserva inoltre che, a causa del tempo finito necessario per la commutazione delle correnti (l'avvolgimento statorico è un circuito R-L e quindi presenta una costante di tempo non nulla), quando il rotore ruota ad alta velocità, la coppia contiene un'ondulazione dovuta alla forma ondulata della corrente:



Questa ondulazione di coppia non pregiudica in modo grave la regolarità del moto, grazie all'effetto dell'inerzia meccanica del sistema.

20

DC Brushless

Il sensore di posizione assicura il sincronismo tra f.c.e.m. e correnti:

- l'inversione di polarità della f.c.e.m. è naturale (causata dal passaggio dei poli magnetici di rotore),
- l'alternanza delle correnti è forzata dalla commutazione del convertitore.

È poi presente una caduta di tensione dovuta alla resistenza e all'induttanza degli avvolgimenti (così come accade per il sincrono e l'asincrono): questa caduta di tensione fa sì che, a carico, la tensione di alimentazione non sia in fase con la f.c.e.m. e non abbia esattamente la stessa forma d'onda.

Considerando per il momento, per semplicità, che la coppia T prodotta complessivamente sia costante, anche per il motore DC brushless vale l'equazione della macchina in c.c.: $E \cdot I = T \cdot \omega_m$

dove E è la f.e.m. concatenata tra due fasi e I la corrente di linea.

21

DC Brushless

Le fasi sono generalmente collegate a stella, perciò le correnti di linea sono uguali alle correnti di fase, mentre le tensioni concatenate sono date dalla differenza tra tensioni di fase.

L'equazione precedente esprime la linearità e la semplicità del controllo del motore DC brushless.

Il motore asincrono non segue naturalmente questa equazione (può farlo solo indirettamente, attraverso le trasformazioni che sono alla base del controllo vettoriale o ad orientamento di campo).

Questo è il motivo per cui il controllo lineare del motore asincrono (come servomotore) richiede una elettronica molto più complessa di un motore DC brushless.

Al contrario, è possibile azionare a velocità variabile un motore asincrono in modo semplice, ma con prestazioni dinamiche piuttosto scarse.

22

DC Brushless

Abbiamo visto che, durante ogni intervallo di conduzione, deve essere mantenuta costante la f.c.e.m. concatenata E tra due fasi, che quindi può essere espressa come:

$$E = k_E \omega_m$$

Ne segue che: $T = k_E I$

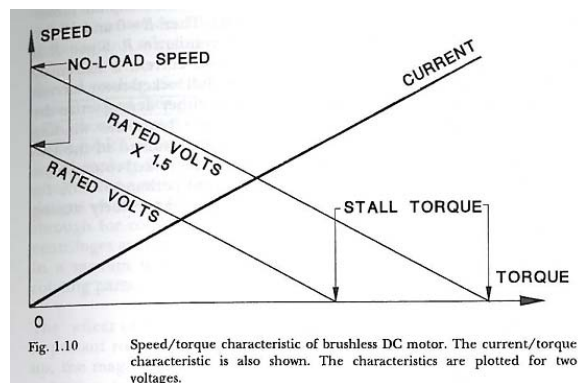
Si può verificare che a vuoto (*no-load*):

$$\omega_{NL} = V_s / k_E$$

Mentre con rotore fermo (a rotore bloccato, *locked-rotor*) si ha la coppia di stallo (*stall torque*):

$$T_{LR} = k_E I_{LR} = k_E V_s / R$$

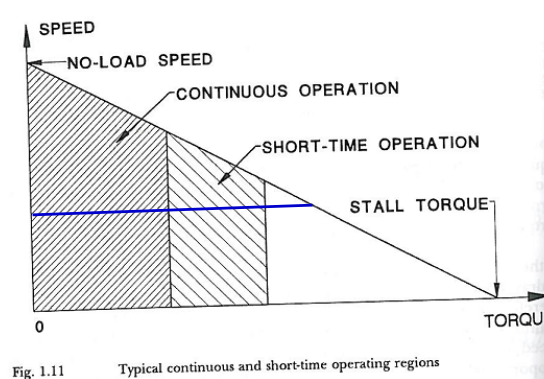
con R = resistenza avvolgimenti.



23

DC Brushless

A rotore bloccato la corrente è limitata dalla sola resistenza degli avvolgimenti, perciò risulta molto elevata, per cui non è normalmente permesso mantenere questa condizione, nemmeno per un breve periodo di tempo, in quanto potrebbe smagnetizzare i magneti, distruggere gli interruttori statici o bruciare gli avvolgimenti.



Tipicamente è permesso utilizzare continuamente la macchina fino al 30% della coppia a rotore bloccato e fino al 50-60% per intervalli di tempo molto piccoli (queste percentuali possono variare a seconda del tipo di motore).

24

DC Brushless

Dalla figura precedente non è chiaro come il motore DC brushless possa lavorare a velocità costante: in realtà, sul grafico precedente si può disegnare una retta parallela all'asse delle ascisse, che rappresenta il funzionamento a velocità costante, che può essere ottenuto aumentando gradualmente la tensione di alimentazione V_s , in modo che la f.c.e.m. E rimanga costante all'aumentare della caduta di tensione sugli avvolgimenti (dovuta all'aumento della corrente, necessario per aumentare la coppia).

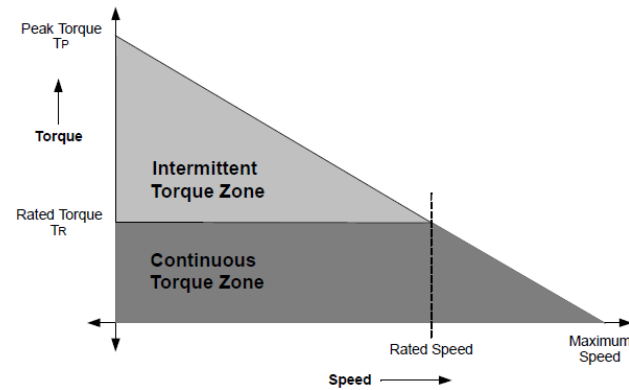
Si osserva l'importanza del raffreddamento per questo tipo di motore, perché, oltre agli effetti comuni agli altri motori tradizionali, qui si può anche avere una riduzione del flusso disponibile dai magneti causato dall'aumento di temperatura. Come conseguenza, si avrebbe una riduzione della costante di coppia k_E .

In realtà, le curve velocità/coppia non sono perfettamente rettilinee, a causa dell'induttanza degli avvolgimenti, della saturazione magnetica e degli effetti di smagnetizzazione.

Curve di coppia del motore brushless

Possiamo visualizzare il grafico precedente anche come coppia in funzione della velocità (questa è la modalità più frequentemente utilizzata).

Nella zona a coppia inferiore alla nominale è permesso il servizio continuo (S1), nella zona superiore quello intermittente (S3).



I motori brushless sono in grado di erogare piena coppia anche a velocità nulla (es. in macchine utensili, nelle quali il pezzo da lavorare deve essere tenuto fermo durante la lavorazione, contrastando la spinta dell'utensile); infatti generalmente la loro taglia viene espressa in termini di coppia, anziché di potenza.

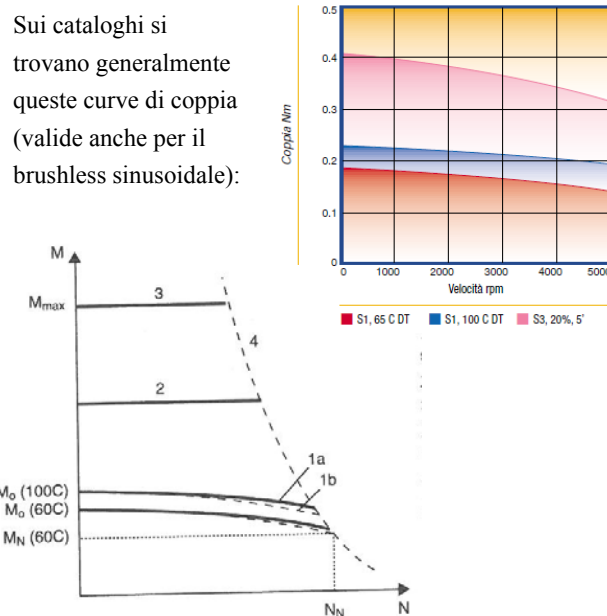
Curve di coppia del motore brushless

Fig. 2.7 - Curve di coppia del motore brushless riferite ad una prefissata temperatura ambiente (20 °C o 40 °C) e a definite dimensioni della controflangia di montaggio del servomotore.

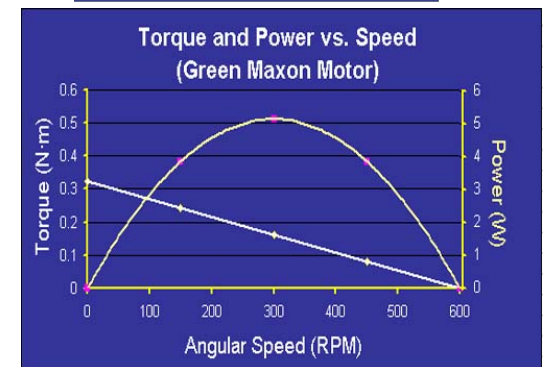
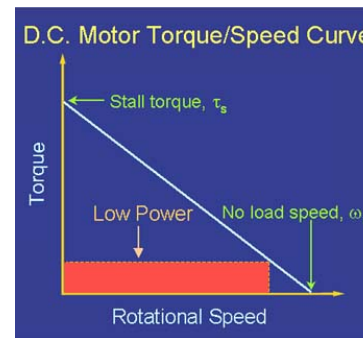
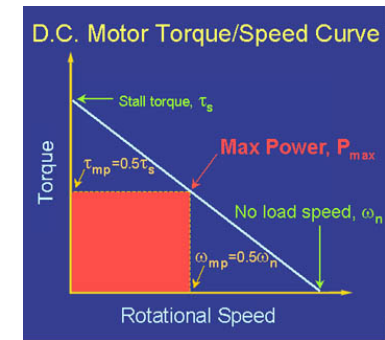
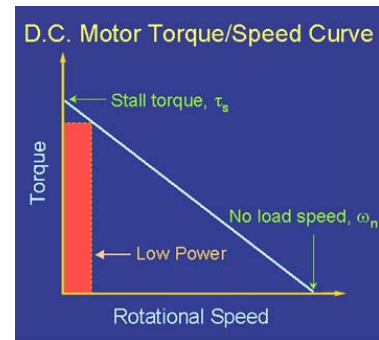
- 1 - curva di servizio continuo (S1) per motore sinusoidale (a) e per motore trapezoidale (b);
- 2 - curva limite dovuta alla corrente di picco del modulo invertitore;
- 3 - curva limite dovuta alla smagnetizzazione del rotore;
- 4 - limite di saturazione di tensione del modulo invertitore: oltre una certa velocità non è possibile mantenere la corrente impostata perché la tensione d'uscita del modulo è costante, ma la f.c.e.m. e la reattanza del motore aumentano.

$M_{0(100C)}$ - coppia di stallo con sovratemperatura dell'avvolgimento $\Delta T = 100\text{ °C}$ e $T_{amb} = 45\text{ °C}$;
 $M_{0(60C)}$ - coppia di stallo con sovratemperatura dell'avvolgimento $\Delta T = 60\text{ °C}$;
 $M_{0(60C)} = 0,75-0,85 \cdot M_{0(100C)}$;
 $M_{MAX} = 3...5 \cdot M_0$; $M_N =$ coppia nominale.

N - numero di giri al minuto.



Sui cataloghi si trovano generalmente queste curve di coppia (valide anche per il brushless sinusoidale):



Oscillazioni di coppia

In realtà la coppia è soggetta ad oscillazioni periodiche, che possono creare problemi in applicazioni di servoazionamenti, che richiedono alta precisione sia nel controllo della posizione che della velocità.

Queste oscillazioni di coppia includono:

- **coppia di ondulazione (ripple)**, causata principalmente dal contenuto armonico presente nella corrente di alimentazione del motore: è un disturbo intrinseco al sistema elettronico di potenza che alimenta la macchina.
- **coppia di cogging**, dovuta alle variazioni della riluttanza del circuito magnetico: è riconoscibile quando l'albero è ruotato a mano lentamente.

In un motore ben progettato, le coppie oscillanti di *ripple* e di *cogging* dovrebbero essere trascurabili: per un servomotore alimentato con tecnica sinusoidale, possono essere inferiori all'1-2% della coppia nominale.

29

Coppia di cogging

La **coppia di cogging**, di natura elettromagnetica, è sempre presente, anche quando non c'è corrente di statore: per questo è possibile valutarla qualitativamente girando manualmente il rotore di un motore scollegato dalla rete. È generata dall'**attrazione magnetica tra i denti statorici e i magneti permanenti rotorici** dovuta alla rotazione del rotore. È dovuta alla componente circonferenziale della forza attrattiva che tenta di mantenere l'allineamento tra denti di statore e magneti permanenti: il rotore tende ad allinearsi con il massimo numero di denti statorici in modo tale che sia minima la riluttanza di una linea di flusso e massima l'energia magnetica immagazzinata.

La coppia di *cogging* aggiunge una componente oscillante alla coppia costante desiderata dalla macchina: questo può produrre vibrazione, rumore e una forma non perfettamente sinusoidale della corrente di fase, specialmente a bassa velocità.

Questo fenomeno può essere individuato nello spettro delle vibrazioni a una frequenza multipla della velocità di rotore, che dipende dal n° poli e n° cave di statore.

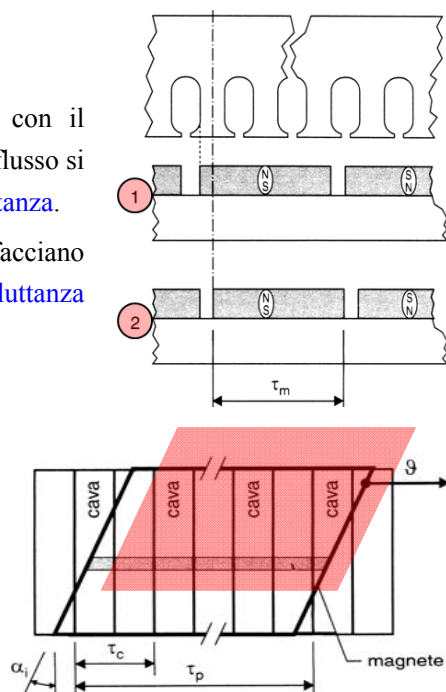
30

Coppia di cogging

Nella **posizione 1** i magneti sono allineati con il massimo numero di denti statorici e il relativo flusso si svolge in un circuito magnetico di **minima riluttanza**.

Con il rotore nella **posizione 2** i magneti si affacciano ad un numero minore di denti statorici e la **riluttanza** del circuito magnetico **aumenta**.

La coppia di cogging può essere **ridotta** limitando la variazione della riluttanza di una linea di flusso, ossia, come soluzione più semplice, **inclinando (skewing) i fianchi dei magneti rispetto a quelli delle cave statoriche** (ad es. di 1 passo cava).



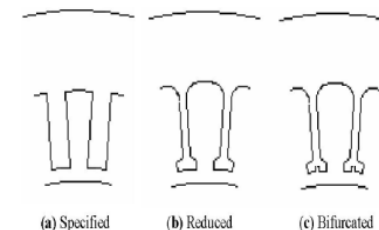
31

Coppia di cogging

Altri metodi per ridurre la coppia di *cogging* sono:

- n° elevato di cave di statore per polo e per fase;
- inclinazione (*skew*) delle cave di statore;
- compensazione elettromagnetica, adattando le forme d'onda della corrente di alimentazione per produrre una componente di coppia elettromagnetica che "cancella" quella di *cogging*;
- denti "biforcati" sullo statore, che hanno l'effetto di raddoppiare il numero di cave; in questo modo viene raddoppiata la frequenza della coppia di *cogging* e l'inclinazione necessaria per eliminare la coppia di *cogging* è dimezzata.

Infine, la coppia di *cogging* è influenzata negativamente dalla parziale smagnetizzazione dei magneti, causata a sua volta da sovratemperature o sovracorrenti.



32

Coppia di cogging

Quest'ultimo effetto è particolarmente sentito nei motori a magneti superficiali, dove il grado di smagnetizzazione può variare lungo la faccia del magnete, producendo una distorsione nella forma d'onda della f.e.m.

Questa distorsione tende ad aggravare sia la coppia di *cogging* che la coppia di *ripple*.

I motori a magneti interni soffrono molto meno di questo problema.

Altri metodi che riducono la coppia di *cogging* sono:

- > aumentare la lunghezza del traferro;
- > usare un numero di cave per polo e per fase frazionario;
- > maggiore spessore delle punte dei denti di statore per prevenire la saturazione;
- > ridurre al minimo l'apertura delle cave.

33

Funzionamento del motore brushless sinusoidale

La tecnica sinusoidale è più complessa di quella trapezoidale e permette di ottenere correnti approssimativamente sinusoidali in ogni fase del motore.

Gli avvolgimenti vengono distribuiti il più possibile sinusoidalmente: **avvolgimenti a due strati a passo raccorciato** per ridurre gli effetti delle armoniche.

Di conseguenza, anche l'induzione al traferro è sinusoidale.

Per generare una coppia costante con la rotazione del rotore, il campo magnetico statorico deve ruotare in sincronismo con il rotore.

La macchina è allora realizzata con avvolgimenti trifasi che, alimentati con un sistema trifase di correnti equilibrate, generano un campo magnetico rotante.

Nel motore DC brushless ci sono due interruttori statici che conducono in ogni istante, al contrario, nei brushless sinusoidali, normalmente i tre interruttori statici conducono ad ogni istante.

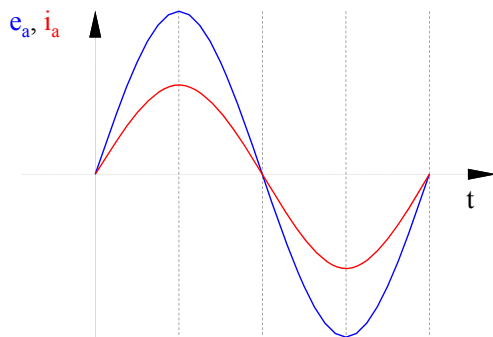
34

Funzionamento del motore brushless sinusoidale

La condizione di massima coppia, per una macchina isotropa, corrisponde alla situazione in cui le correnti di alimentazione sono in fase con le rispettive forze elettromotrici indotte.

È necessario fornire al sistema di regolazione della corrente la posizione angolare dei campi magnetici di statore e rotore:

- la posizione istantanea della forza magnetomotrice di statore è ricavata mediante trasduttori di corrente;
- la posizione angolare del rotore è fornita da un sensore di posizione (**resolver ad albero cavo**, trasduttore induttivo analogico di spostamento), montato sull'albero del motore.



35

Funzionamento del motore brushless sinusoidale

Un aspetto fondamentale dei motori brushless sinusoidali è che la f.e.m. indotta in ogni fase dell'avvolgimento dalla rotazione dei magneti deve essere una funzione sinusoidale dell'angolo di rotore.

La forma di questa funzione dipende parzialmente dalla distribuzione del flusso prodotto dai magneti, che deve essere il più possibile sinusoidale, e parzialmente dalla distribuzione dell'avvolgimento di statore.

Se l'avvolgimento fosse perfettamente distribuito sinusoidalmente, non avrebbe concatenamenti con le armoniche spaziali della distribuzione del flusso prodotto dai magneti. Ma poiché nella pratica gli avvolgimenti non sono perfettamente distribuiti sinusoidalmente, è importante rendere più sinusoidale possibile la distribuzione del flusso dei magneti.

Si osserva che, per i due tipi di controllo (trapezio e sinusoidale), l'elettronica di potenza è la stessa, ciò che cambia è la strategia di controllo.

36

Funzionamento del motore brushless sinusoidale

I motori brushless sinusoidali presentano una stretta somiglianza con i motori sincroni; rispetto ai DC brushless, sono più costosi per la maggiore complessità del controllo, ma consentono più facilmente di minimizzare le inevitabili pulsazioni di coppia utilizzando tecniche di progetto standard (ad es.: inclinazione dei magneti o dei lamierini statorici di un passo di cava, avvolgimenti a passo raccorciato, avvolgimenti a passo di cava frazionario).

Un'ulteriore differenza legata alla tecnica di controllo si ha nel **sensore di posizione** rotorica: la **tecnica trapezoidale** impiega **sensori ad effetto Hall**, mentre la **tecnica sinusoidale** si avvale di **resolver ad albero cavo**.

Per una **regolazione di velocità** il convertitore necessita anche di un **sensore di velocità**: per la **tecnica sinusoidale** questo è costituito dallo stesso **resolver**, mentre per quella **trapezoidale** è costituito da un **tachimetro trifase brushless o dinamo tachimetrica**.

Funzionamento del motore brushless sinusoidale

Alimentando con una sequenza opportuna le tre fasi dello statore, è possibile far sviluppare al motore una coppia unidirezionale, cioè diretta sempre nello stesso verso, e al valore massimo.

Per ottenere questo, è necessario conoscere la posizione del rotore in ogni istante e utilizzare questa informazione per comandare l'inverter in modo da ottenere la situazione desiderata per le correnti di statore (il loro campo magnetico risultante deve formare con il campo magnetico rotorico un angolo prossimo a 90°, affinché la coppia sviluppata sia massima).

Quanto detto vale per il motore *brushless sinusoidale*, mentre per il *brushless trapezoidale* è sufficiente discriminare soltanto alcuni intervalli di posizione del rotore in un giro.

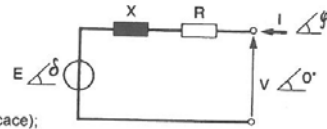
In entrambi i casi si ha un asservimento tra la posizione del rotore e la chiusura/apertura sequenziale degli interruttori statici predisposti all'alimentazione delle tre fasi dello statore.

Funzionamento del motore brushless sinusoidale

Questo asservimento è gestito dal circuito logico di controllo che determina istante per istante quali fasi attivare e quali disattivare in dipendenza della posizione assunta dal rotore, in modo da mantenere la coppia costante (o mediamente costante) durante la rotazione.

a) Circuito equivalente di una fase (avvolgimento a stella):

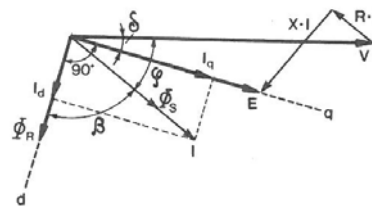
X - reattanza sincrona di fase ($\gg R$), principalmente dovuta alla reazione d'armatura causata da I.
R - resistenza di fase



V - tensione statorica di fase (valore efficace);
I - corrente statorica (valore efficace);
 $E = K_E \cdot N / \sqrt{3} \cdot 1000$ - f.e.m. indotta dal flusso rotorico nella fase statorica (valore efficace);
 ϕ - angolo di sfasamento di I rispetto a V.

b) Diagramma vettoriale per funzionamento da motore:

Φ_S - flusso statorico;
 Φ_R - flusso rotorico;
 $\omega_e = 2\pi \cdot f = \omega_m \cdot cp$ = pulsazione elettrica (rad/s);
 $f = N \cdot cp / 60$ = frequenza d'alimentazione (Hz);
N - numero di giri rotorico al minuto;
 $\omega_m = 2\pi \cdot N / 60$ = velocità angolare meccanica;
cp - numero di coppie polari;
d - asse del polo rotorico, o diretto;
q - asse medio tra due poli rotorici, o in quadratura.

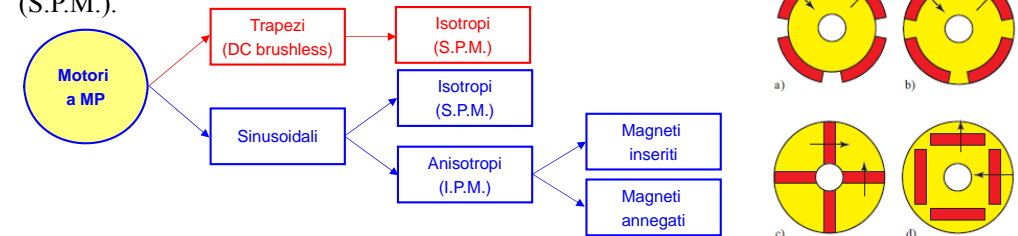


Classificazione dei motori brushless

I motori **sinusoidali** si distinguono in:

- isotropi, detti anche **Superficial Permanent Magnet (S.P.M.)**
- anisotropi o **Interior Permanent Magnet (I.P.M.)** ➡ presentano anche una coppia di riluttanza
 - magneti inseriti
 - magneti annegati.

I motori **trapezi** sono essenzialmente a magneti superficiali (S.P.M.).



a) Surface-mounted PM; b) Inset PM; c) Tangentially-magnetized buried PM; d) Radially magnetized buried PM.

Applicazioni dei motori brushless

I motori brushless sono sempre più frequentemente impiegati come motori regolati in velocità. Ricordando che sono macchine sincrone, essi sono quindi in grado di generare coppia solo alla velocità di sincronismo, legata alla frequenza e al numero di paia poli p_p secondo la relazione:

$$\omega_r = \frac{\omega}{P_p} = \frac{2\pi f}{P_p} \Rightarrow n_r = \frac{60 f}{P_p}$$

dove ω è la pulsazione elettrica delle grandezze di statore.

Grazie agli inverter e ai sensori di velocità, risulta possibile regolare facilmente la frequenza di alimentazione e quindi la velocità di rotazione della macchina.

Ricordiamo che l'utilizzo del motore brushless è imprescindibile dall'uso di un convertitore elettronico di potenza e di un sistema di controllo: per attuare le leggi di moto e di velocità desiderate, al sistema di controllo serve tipicamente l'informazione della posizione istantanea del rotore rispetto a un riferimento fisso di statore.

41

Sensore di posizione

Tale misura viene acquisita tramite opportuni sensori montati sull'albero della macchina (encoder, resolver, ecc.) oppure tramite misure ai morsetti elettrici e utilizzando il modello dinamico della macchina (**controlli di tipo *sensorless***).

Si osserva che, se da un lato i motori brushless evitano l'uso delle spazzole e del commutatore, che possono influenzare l'affidabilità della macchina, dall'altro è necessario un sensore di posizione (a meno di usare il controllo *sensorless*), con la sua circuiteria elettronica e cavi di interconnessione.

Questi componenti, a loro volta, aumentano i costi e possono diminuire l'affidabilità complessiva della macchina, perché sono relativamente fragili e, sebbene siano adeguatamente protetti, possono essere suscettibili di danni conseguenti ad alte temperature, contaminazione da polveri o grassi, vibrazioni e interferenze elettriche.

Per questi motivi, negli ultimi anni è stata studiata la necessità di eliminare il sensore di posizione attraverso un controllo *sensorless*.

42

Controllo sensorless

Lo schema di principio rimane lo stesso.

Nel caso DC brushless, poiché la f.e.m. è presente solo in alcune fasi ad ogni istante, a seconda della posizione del rotore, allora questa f.e.m. può essere utilizzata per dare un'informazione sulla posizione dei poli del rotore e della loro polarità magnetica.

Quindi questo tipo di controllo usa la f.e.m. come informazione che indica quando commutare le fasi.

Questo metodo necessita però di una sorta di sequenza di avviamento, in quanto la f.e.m. non è presente a velocità nulla. È possibile che il rotore parta nel verso sbagliato per qualche grado prima che il normale controllo sia stabilito.

Esistono altri schemi di controllo *sensorless*, più complessi, che non dipendono dalla f.e.m.

43

Applicazioni dei motori brushless

“*Macchina sincrona a commutazione elettronica con magneti permanenti sul rotore*” è la spiegazione più completa del termine “brushless” comunemente usato nella terminologia elettrotecnica.

Nei motori sincroni a magneti permanenti il **flusso di eccitazione** è generato da una serie di **magneti** disposti sul **rotore**: questa è la caratteristica principale che li distingue rispetto ai motori sincroni tradizionali.

Vantaggi: data la costante presenza del flusso al traferro, vi è **immediata disponibilità di coppia motrice**. **Materiali magnetici ad alta densità di flusso**, come leghe neodimio-ferro-boro (NdFeB) o altre terre rare, permettono di costruire, a parità di coppia disponibile all'albero, **motori leggeri, compatti** e con basso momento di inerzia rotorico. Vi è inoltre **assenza delle perdite per effetto Joule nel circuito di eccitazione e dei contatti striscianti**, che nelle macchine sincrone tradizionali sono necessari per alimentare il circuito di eccitazione.

44

Applicazioni dei motori brushless

L'immediata disponibilità di coppia e la ridotta inerzia rotorica permettono di conseguire **elevate prestazioni dinamiche**.

Da diversi anni si è affermata la tendenza ad impiegare azionamenti con motori sincroni a magneti permanenti nel settore della robotica e della movimentazione assi, in sostituzione degli azionamenti con motori in corrente continua con magneti permanenti.

La movimentazione tipo **assi** trae il nome dal moto a cui sono sottoposti gli organi meccanici. I moti di avanzamento, detti per l'appunto di tipo assi, sono associati ai **movimenti lineari** e rotatori degli organi delle macchine sottoposti a **frequenti avvii ed arresti**, **inversioni** del senso di marcia e con spostamenti per cui sono richiesti controlli di posizione estremamente precisi.

Applicazioni dei motori brushless

Gli organi meccanici interessati nei moti di avanzamento costituiscono un complesso ad inerzia e coppia resistente variabile con la posizione, noto come servomeccanismo dal quale deriva la dicitura **servomotore** per indicare il motore adoperato per azionarlo.

Il **problema** principale dei motori brushless, particolarmente fastidioso nelle applicazioni servo, è la presenza di **componenti armoniche di coppia** dovute al cogging e all'alimentazione di corrente non perfettamente sinusoidale.

Malgrado questo problema e malgrado i maggiori costi, i motori brushless trovano sempre più numerose applicazioni nel controllo del moto (macchine utensili a controllo numerico, automazione industriale, robotica, trazione leggera, macchine da ufficio, apparecchiature trasportabili, attrezzature mediche, campo aerospaziale, ecc.), in quanto presentano molti vantaggi rispetto ai motori tradizionali sia a corrente continua che asincroni.

Applicazioni dei motori brushless

In particolare, rispetto ai motori in corrente continua, presentano i seguenti vantaggi, dovuti essenzialmente all'assenza delle spazzole e del collettore:

- ◆ ridotta manutenzione;
- ◆ maggiore affidabilità;
- ◆ campo di variazione della velocità più ampio;
- ◆ maggiore rendimento;
- ◆ più agevole asportazione del calore, in quanto essendo gli avvolgimenti disposti sullo statore è minore la resistenza termica incontrata dal calore da essi generato;
- ◆ di conseguenza, dimensioni più piccole a parità di potenza;
- ◆ ridotta inerzia e più elevate prestazioni dinamiche per la presenza sul rotore di magneti permanenti (quando abbiamo un avvolgimento di eccitazione sul rotore bisogna mettere in conto la costante di tempo L/R di tale avvolgimento);
- ◆ minore rumore acustico.

Applicazioni dei motori brushless

Rispetto ai motori asincroni, per la presenza del rotore a magneti permanenti, presentano i seguenti vantaggi:

- ◆ dimensioni più piccole a parità di potenza;
- ◆ più elevate prestazioni dinamiche;
- ◆ non necessitano di ulteriori dispositivi di avviamento (ma sono dotati di inverter).

Le perdite del motore brushless comprendono essenzialmente:

- perdite ohmiche di statore;
- perdite per isteresi e correnti parassite nel ferro laminato (sia di statore che di rotore), ma anche nel cilindro metallico che può contenere il rotore;
- perdite meccaniche per attrito e ventilazione.

I rendimenti dei motori brushless sono mediamente più alti di quelli dei motori asincroni o in c.c. di analoga taglia: per potenze elevate (decine e centinaia di kW) si può arrivare a rendimenti del 98%.