

## **Stato dell'arte nel pilotaggio elettronico ad alta efficienza di motori Brush-less**

### **Introduzione**

Solamente cinque anni fa, al campo volo del gruppo aeromodellistico a cui appartengo (Gruppo Aeromodellistico di Belgioioso GMB), in seguito a scadenti prestazioni di un aliantino elettrico, ho udito la seguente frase: “vale di più un motore da 1cc che 100 batterie”. È ancora vero?

Nonostante la mia professione nel campo elettronico, resto un amante del motore a combustione interna, ma oggi mi trovo a disapprovare (almeno parzialmente) la suddetta affermazione.

Nel campo dei modelli a propulsione elettrica, negli ultimi 3-4 anni vi è stato un impressionante progresso, non tanto per quanto riguarda i motori stessi, ma soprattutto per l'elemento più debole del sistema, la batteria.

In effetti, si deve molto al business degli apparecchi elettronici portatili, quali telefonini, computer, lettori MP3, videofonini, agendine elettroniche, GPS, ecc. Anche per questi generi di consumo la parte più debole è sempre stata la batteria, che determina principalmente sia le dimensioni sia il peso dell'intero dispositivo.

È innegabile come gli odierni aeromodelli elettrici equipaggiati con batterie al litio-polimero (LiPO) e motori brushless (mb), abbiano doti di volo acrobatico che per praticità ed affidabilità hanno poco da invidiare ai modelli con motore a scoppio.

Sulle batterie ci sarebbe molto da dire; rimando il lettore agli atti della precedente edizione di questo convegno.

### **Motori a spazzole e senza spazzole**

Importanti elementi del sistema di propulsione elettrica sono il motore ed il regolatore di giri, che per ovvie ragioni saranno trattati congiuntamente.

Il motore a spazzole non richiede un pilotaggio particolare, è sufficiente fornirgli una tensione continua di adeguato valore, ed in assenza di altri impedimenti, il rotore si mette in moto.

Il motore a spazzole ha tipicamente tre avvolgimenti rotanti all'interno di un campo magnetico "quasi uniforme" che sono alimentati mediante contatti striscianti costituiti tipicamente da carboncini morbidi ed usurabili (denominati comunemente spazzole).

Come si nota dalla sequenza di figure (da Fig. 1 a Fig. 4) le spazzole non svolgono unicamente la funzione di alimentazione del rotore, ma costituiscono anche un selettore perfettamente sincrono con la rotazione. Viene quindi alimentato il giusto avvolgimento al momento giusto in modo da avere sempre un contributo alla coppia.

A questo punto è semplice intuire il motivo della maggior complessità del pilotaggio di un motore brushless.

Gli avvolgimenti dei mb, sono solidali con lo statore, quindi sono semplicemente collegabili al mondo esterno senza ricorrere alle spazzole, ciò che ruota sono i magneti permanenti, appunto incollati sul rotore, che ovviamente non necessitano di alimentazione.

A causa dell'elevata forza centrifuga a cui sono sottoposti i magneti, si può verificare lo scollamento degli stessi dal rotore, provocando la distruzione del motore, si sono quindi progettati i mb a cassa rotante, nei quali lo statore con gli avvolgimenti elettrici si trova al centro di una campana rotante all'interno della quale ci sono i magneti, in questo caso la forza centrifuga ne aumenta l'adesione al rotore.

Il selettore non è realizzato meccanicamente nel motore, ma deve essere a carico del circuito di pilotaggio.

Ma allora quali sono i vantaggi che compensano le complessità di pilotaggio?

In primo luogo l'efficienza, il rotore è libero; unicamente sottoposto agli attriti trascurabili dei cuscinetti.

Non vi sono elementi striscianti e quindi usuranti, l'affidabilità e la vita del motore sono più durature e la velocità di rotazione può essere notevolmente più elevata.

È relativamente semplice aumentare il numero di coppie polari (Fig. 6) migliorando l'uniformità della coppia e l'efficienza elettrica (se ottimamente pilotato).

Vi è una ridotta emissione elettromagnetica, il che significa un ridotto rischio di disturbi alla ricevente. Effettivamente l'emissione può essere ben controllata e mantenuta a bassi livelli grazie ad un buon circuito e metodo di pilotaggio.

## Come si pilotano?

I moderni mb dispongono unicamente di tre terminali accessibili dall'esterno, che fanno capo agli avvolgimenti interni posti sullo statore. In generale i tre avvolgimenti sono connessi in configurazione STELLA ed il nodo comune centrale non è quasi mai disponibile all'esterno. Sarebbe utile disporne? Beh aiuterebbe a “predire” con maggior precisione la posizione istantanea del rotore, ma non entriamo in troppi dettagli.

Il collegamento a STELLA (Fig. 6) non è l'unico modo di combinare tra loro i vari avvolgimenti, si possono collegare anche a TRIANGOLO o DELTA oppure in modalità 6x6, disponendo così di tutti gli estremi delle spire, in genere questo è un ottimo metodo per applicazioni a bassa tensione di alimentazione, anche se si complica il circuito di pilotaggio.

Anche per i mb come per quelli a spazzole, è definito un parametro che lega la velocità di rotazione in rpm (rotation per minute) alla tensione di alimentazione, generalmente denominato Kv. Ad esempio un motore con  $Kv=1500$  rpm/V significa che al variare di 1V dell'alimentazione, la velocità di rotazione varia di 1500 rpm. Come già anticipato i motori a spazzole richiedono banalmente una tensione di alimentazione in continua che varia unicamente in ampiezza, in accordo col comando impartito dal pilota ed il motore fa tutto da solo.

Un mb richiede che il controllore gli fornisca tre segnali di tensione alternata e tra loro sfasati di  $120^\circ$ , anche qui la loro ampiezza determina la velocità di rotazione.

Trattandosi di segnali alternati, quali altre caratteristiche devono avere? È assolutamente necessario che abbiano la corretta frequenza e siano perfettamente in fase con il campo magnetico rotante generato dai magneti permanenti solidali col rotore. Se tali condizioni non sono rispettate il motore “perde il passo” e si ferma.

Per un corretto ed ottimale pilotaggio del motore occorre considerare anche la forma d'onda, che può essere sinusoidale, quadra, triangolare, ecc., ciò impatta sull'efficienza, (importantissima in aeromodellismo) e sull'uniformità della coppia generata assolutamente insignificante per il corretto volo del modello.

Il regolatore o controllore deve quindi ricevere dal motore le informazioni relative al valore della frequenza elettrica da applicare, correlata con la velocità di rotazione e, di posizione istantanea, associata alla fase.

In passato i mb erano corredati di un sensore ad effetto hall posto in prossimità di un magnetino solidale con l'albero di rotazione e che generava un impulso elettrico ad ogni giro meccanico, tale segnale veniva “letto” dal regolatore il quale sincronizzava fase e frequenza delle forme d'onda generate ed applicate agli avvolgimenti.

Notare che esiste una frequenza meccanica ( $f_m$ ) espressa come numero di giri al secondo (rps=rotation per second, rps=rpm/60) ed una frequenza elettrica  $f_e$ . Questo è causa del fatto che sul rotore dei mb sono montati più di un magnete, quindi durante 1 giro meccanico, in prossimità delle spire transitano più poli magnetici N-S, facendo sì che la frequenza elettrica sia uguale alla frequenza meccanica moltiplicata per il numero delle coppie polari ( $f_e=f_m \cdot \text{Num. Coppie Polari}$ ).

I regolatori moderni sono in grado di “leggere” la posizione del rotore direttamente analizzando la tensione presente sugli avvolgimenti, non è quindi più necessario il sensore ad effetto hall.

Quando un polo dei magneti permanenti solidali col rotore, passa in prossimità di un avvolgimento vi induce un segnale di tensione denominato BEMF (Back Electro-Magnetic Force).

La BEMF così generata, ha esattamente la frequenza elettrica  $f_e$  che si va cercando.

A questo punto, dato che il motore ha una certa inerzia meccanica, non può variare istantaneamente la propria velocità, quindi la frequenza di rotazione e di conseguenza anche il periodo del segnale elettrico ( $T_e=1/f_e$ ) non può cambiare sensibilmente tra ciclo e ciclo. Il regolatore “sapendo” la frequenza e la fase istantanea del segnale che sta generando, sa anche predire quando un magnete passerà in corrispondenza di un avvolgimento, quindi qualche istante prima (ordine dei milionesimi di secondo) smette di forzare tensione al motore e misura la BEMF generata, registrando il passaggio per lo zero di tale segnale sinusoidale. L’istante di attraversamento dello zero della BEMF detto  $Z_c$  (zero cross) garantisce il continuo sincronismo tra regolatore e motore. Banalmente misurando il periodo tra due attraversamenti dello zero consecutivi, si ottiene la frequenza elettrica.

In Errore: sorgente del riferimento non trovata è rappresentato il segnale applicato ad un terminale del motore, si nota che ad un certo istante prossimo all’attraversamento dello zero, il pilotaggio si interrompe (discontinuità nella sinusoide) e si attiva il circuito di analisi della BEMF.

La BEMF fornisce quindi tutte le informazioni necessarie al controllore per pilotare o alimentare i tre avvolgimenti con i corretti segnali ben definiti come ampiezza (V), frequenza ( $f_e$ ) e fase (!). La BEMF essendo generata da un fenomeno di induzione elettro-magnetica, occorre che si verifichi una variazione nel tempo del flusso magnetico, questo avviene regolarmente quando il rotore è avviato e la velocità è relativamente sostenuta. Quando il motore è fermo la BEMF è nulla quindi non si ottiene nessuna informazione dal motore; in fase di partenza e fino a quando il rotore non ha raggiunto una velocità che generi una BEMF di ampiezza sufficiente per essere misurata. Occorre trovare un altro metodo.....

Dato che i mb hanno un vasto impiego negli Hard Disk Drive (HDD), protagonisti di un mercato economicamente molto redditizio (almeno in un recente passato), la ricerca tecnologica

dedicata al loro pilotaggio, è stata molto proficua e sono stati sviluppati diversi metodi, tra cui mi limito a citare “l’inductive sense” (sensore induttivo) e “l’alignment and GO” (allineamento e partenza). Il primo metodo è largamente impiegato negli HDD, in quanto permette una partenza decisa senza alcuna rotazione in direzione contraria, che potrebbe rovinare la testina dei dischi, vantaggi che si pagano con una maggior complessità circuitale. Il sistema consiste nel misurare il valore induttivo dei tre avvolgimenti ed identificarne il maggiore, il che significa la presenza di un magnete permanente del rotore è in prossimità di tale spira, quindi si parte con la corretta sequenza delle fasi.

I regolatori progettati per aeromodellismo, gestiscono la fase di partenza forzando un impulso di corrente in un avvolgimento, ed aspettano che il rotore compia una rotazione di alcuni gradi fino a far allineare un polo magnetico con l’avvolgimento eccitato, in tal modo la posizione è nota. Il regolatore può partire con la sequenza corretta. Così facendo a seconda della posizione del rotore prima dell’impulso, si potrebbe indurre una rotazione di alcuni gradi contraria a quella voluta, ma non si crea nessun inconveniente.

Resta da commentare brevemente la caratteristica più importante del pilotaggio: la forma d’onda dei segnali applicati agli avvolgimenti. Se per mezzo di un oscilloscopio si acquisisse il segnale in tensione indotto nelle spire di un mb posto in rotazione ed usato come alternatore, si noterebbe che la forma è molto simile ad una senoide, non di certo ad un’onda quadra. In realtà si ottiene una senoide con qualche percentuale di armoniche dispari.

I sistemi di pilotaggio motori impiegati negli HDD alimentano gli avvolgimenti con tre segnali sinusoidali molto simili alla BEMF, in modo da ottenere una coppia meccanica estremamente costante ed un’elevata precisione nel controllo dinamico della velocità, nonché l’ottimo come efficienza, parametro estremamente importante nelle moderne applicazioni portatili alimentate a batteria.

I regolatori per uso aeromodellistico, anche i più costosi, non sono così sofisticati e si limitano a generare tre segnali trapezoidali visibili in Fig. 7, così facendo, l’elica si mette in rotazione correttamente, il ripple di coppia non è sicuramente paragonabile al pilotaggio sinusoidale ma in questa applicazione il fatto è del tutto trascurabile. Si può lanciare la sfida al più sensibile aeromodellista per riconoscere un “ripple” di coppia dell’1% sull’albero dell’elica.

L’effetto più limitante è l’efficienza, che peggiora di circa il 10-15%!!!!!!!

Figure

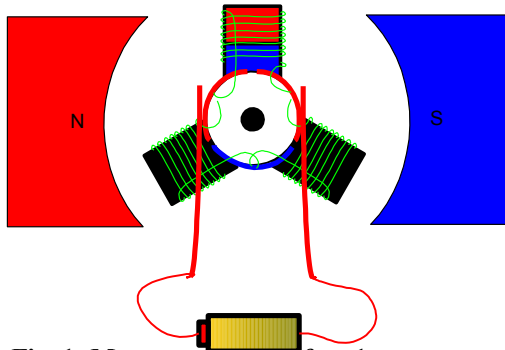


Fig. 1 - Motore a spazzole fase 1

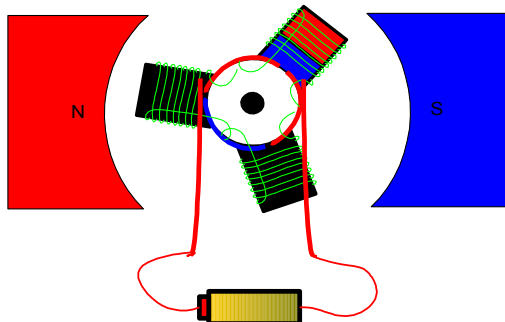


Fig. 1 - Motore a spazzole fase 2

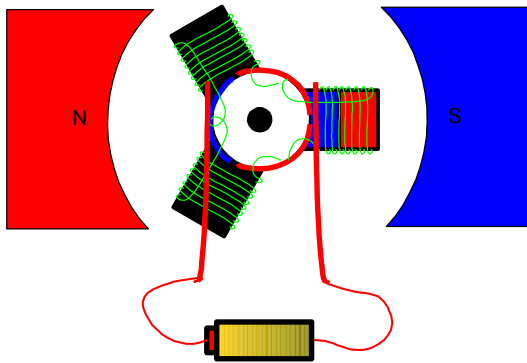


Fig. 3 - Motore a spazzole fase 3 (intermedia)

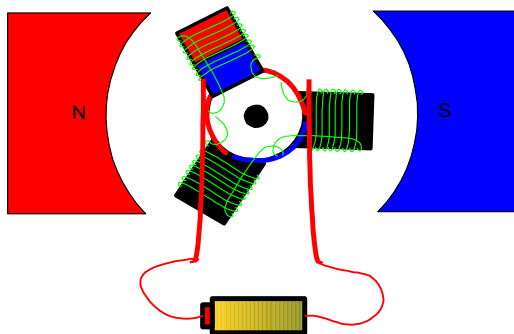


Fig. 4 - Motore a spazzole fase 3

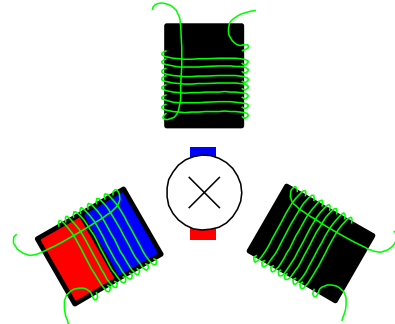
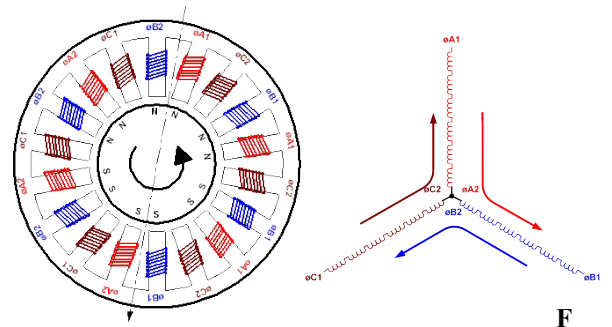
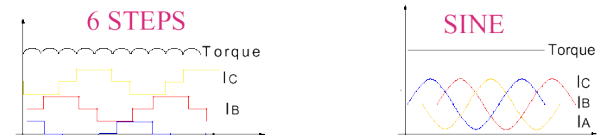


Fig. 5 - Schema di principio motore brushless

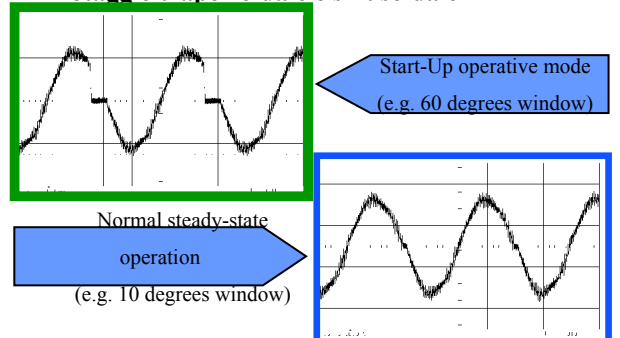


ig. 6 - Motore brushless con 3 coppie polari



NO STEPS COMMUTATION  
NO TORQUE RIPPLE  
REDUCED ACOUSTIC NOISE

ig. 7 - Pilotaggio trapezoidale e sinusoidale



ig. 8 - Apertura finestra per ricezione BEMF