

Minimotori in continua e brushless: lo stato dell'arte

Mauro Bollani, Maria Stefania Carmeli, Francesco Castelli Dezza, Marco Mauri

I minimotori elettrici sono una realtà consolidata in tutti i settori dell'industria e la continua diminuzione di costi e dimensioni, insieme alla crescita delle prestazioni, rende questi dispositivi interessanti per nuove applicazioni nel campo dell'automazione. L'articolo che segue esamina le tecnologie e le principali tipologie di minimotori elettrici disponibili sul mercato. Sono presi in considerazione i motori in corrente continua, brushless e con sensori ad effetto Hall. Le applicazioni che utilizzano i minimotori elettrici sono in costante espansione e coinvolgono aree di mercato sempre più vaste.

La moderna tecnologia degli azionamenti, nell'ottica del miglioramento delle prestazioni e della riduzione delle dimensioni complessive dei sistemi, sta spingendo sempre più nella direzione della miniaturizzazione dei motori elettrici e verso la totale integrazione degli stessi nei servosistemi.

Negli ultimi anni il mercato ha visto, quindi, la presenza sempre più massiccia di motori miniaturizzati per un campo di applicazione che sta diventando ogni giorno più ampio anche se attualmente la diffusione di tali motori è ancora limitata a settori altamente specializzati soprattutto per l'elevato costo finale degli stessi, determinato dalla qualità dei materiali impiegati e dalla necessità di disporre di personale qualificato per la realizzazione. Di seguito viene presentata una panoramica delle caratteristiche dei motori miniaturizzati di tipo corrente continua a magneti permanenti e di tipo brushless attualmente presenti sul mercato. Motori di questo tipo presentano tipicamente dimensioni trasversali variabili tra 2 mm e 26 mm di diametro, dimensioni longitudinali comprese tra 5,5 mm e 50 mm e sono in grado di erogare potenze da 0,2 W a 10 W.

Campi di applicazione dei minimotori

I campi di applicazione dei minimotori sono molteplici, in particolare si trovano applicazioni commerciali nei seguenti settori: strumentazione medica e attrezzature da laboratorio (elettrocardiografi, artroscopia, oculistica, ortopedia); strumentazione in generale (bilance di precisione, densimetri misurazioni geotecniche, telemetri a laser); automazione industriale e robotica (robot trasportatori, avvitatori elettrici, pro-

cessi automatici di realizzazione dei circuiti stampati); impianti ed attrezzature industriali (macchine per resa dei vuoti, macchine produzione Cd, sistemi per taglio a laser, industria della carta, industria della stampa); sistemi per ufficio, sicurezza e comunicazioni (sistemi ad accesso protetto, lettori di carte magnetiche, fotocopiatrici e stampanti, cambia monete/valute); industria aerospaziale e difesa¹ (strumentazione velivoli, registratori di volo, simulatori di volo, controllo di ipersostentatori/deflettori di volo, rilevatori ad immagini termiche); ottica, audio e video (regolazione delle lenti, avvolgitori di pellicole, lettori di microfilm, macchine per riprese cinematografiche, videoregistratori); ambito hobbistico (ferromodellismo, aeromodellismo e modellistica di qualità); automazione (veneziane, schermi raggi solari, ventilatori, cesoie elettriche per agricoltura, sistemi di navigazione).

Minimotori a corrente continua

Caratteristiche costruttive. Nella tabella 1 sono riportati i valori costruttivi caratteristici per minimotori in corrente continua attualmente presenti sul mercato. Le soluzioni costruttive (figura 2) sono simili per tutte le realizzazioni ed in particolare i minimotori a corrente continua presentano una carcassa in acciaio con coperchi superiore e inferiore anch'essi in acciaio o in materiale plastico per i modelli più economici. In

Tabella 1 - Valori costruttivi caratteristici per minimotori in corrente continua

Grandezza	Valore minimo	Valore massimo	Unità di misura
Diametro	7	26	mm
Lunghezza	16	50	mm
Peso	3,5	90	g
Potenza	0,2	10	W
Potenza specifica	60	130	W/Kg
Regime di rotazione a vuoto	6.000	16.000	rpm

¹ Lo sviluppo di questi sistemi sta avendo un particolare successo principalmente in campo medico e aerospaziale in cui i costi elevati sono compensati dai notevoli benefici apportati. Particolare interesse rivestono in questo settore le applicazioni in ambito spaziale; ad esempio i rover marziani *Opportunity* e *Spirit* sono veicoli a sei ruote equipaggiati con ben 39 minimotori per la trazione, lo sterzo, il movimento dei sensori e delle telecamere e per l'orientamento dei pannelli solari.

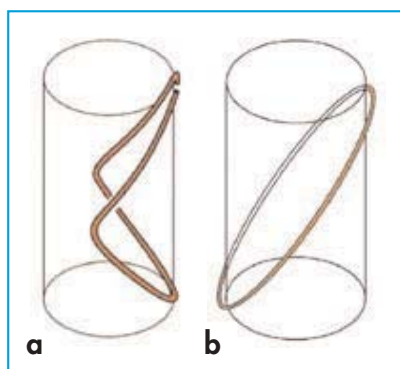


Figura 1 - Particolare degli avvolgimenti:
a) avvolgimento a spire ripiegate;
b) avvolgimento a spire oblique

uno dei due coperchi per facilitarne il montaggio (solitamente dal coperchio dal quale spunta l'albero motore), mentre dal coperchio opposto fuoriescono i morsetti di rame, a coltello, o i conduttori isolati previsti per il collegamento del motore all'alimentazione. Costruttivamente presentano una struttura non tradizionale con rotore esterno e statore interno. Il rotore è realizzato in aria in modo da migliorarne le prestazioni in termini di inerzia complessiva ed è costituito da un avvolgimento auto-portante, a forma di coppa, calettato direttamente sull'albero motore. A seconda del produttore, l'avvolgimento è costituito da spire ripiegate e sovrapposte od oblique (figura 1 a, 1 b), rivestito da resina termoindurente in grado di resistere ad elevate temperature (da 85 °C fino a 125 °C) che conferisce la necessaria compattezza e rigidità. Data l'assenza di ferro e la ridotta inerzia si possono ottenere notevoli accelerazioni, riducendo i tempi di avviamento e contenendo la corrente di spunto. Infatti, l'avvolgimento di indotto, avvolto in aria, presenta induttanza ridotta e un comportamento lineare per l'assenza di saturazione e di perdite per isteresi e correnti parassite. L'assenza di cave di rotore favorisce inoltre il raffreddamento dell'avvolgimento e consente l'adozione di correnti più elevate, ottimizzando il rapporto potenza-volume. Lo statore è costituito da un magnete permanente di forma cilindrica posto all'interno del rotore (figura 2). Al fine di ottenere elevate prestazioni si utilizzano solitamente magneti permanenti pregiati a terre rare (neodimio-boro, samario-cobalto). L'albero motore è realizzato tipicamente in acciaio e più raramente in ceramica e sostenuto con bronzine in metallo sinterizzato o cuscinetti a sfere. L'uso di cuscinetti a sfere è previsto solitamente per quei motori destinati ad uso continuativo ad elevate velocità o con elevato carico radiale all'albero.

Commutazione meccanica - spazzole e collettore

La commutazione meccanica, realizzata dall'accoppiata collettore-spazzole, rappresenta sicuramente il punto debole dei minimotori a corrente continua. La presenza del commutatore meccanico limita la velocità massima e la tensione di alimentazione. Quest'ultima, in particolare, non può superare la massima ammissibile dall'isolamento tra le lamelle. È inoltre difficoltoso erogare elevate coppie a velocità nulla, a causa

Tabella 2 - Valori costruttivi caratteristici di minimotori Dc brushless

Grandezza	Valore minimo	Valore massimo	Unità di misura
Diametro	1,9	16	mm
Lunghezza	5,5	28	mm
Peso	0,091	31	g
Potenza	0,06	6	W
Potenza specifica	150	660	W/Kg
Regime di rotazione a vuoto	5.000	100.000	rpm

genere è prevista la presenza di filettatura o di fori filettati su

do la risposta dinamica. Sono inoltre richiesti frequenti interventi di manutenzione a causa dell'usura per attrito e per scintillio. Per la realizzazione del commutatore vengono solitamente adottate due soluzioni costruttive: collettore in rame con spazzole in grafite oppure collettore e spazzole in metalli preziosi. La combinazione collettore di rame e spazzole in grafite è generalmente impiegata nei motori di dimensioni leggermente superiori che devono sopportare carichi gravosi. In particolare le spazzole in grafite sono in grado di sopportare correnti più elevate rispetto a quelle in metalli preziosi e sono quindi adatte ad un funzionamento intermittente con frequenti inversioni di marcia. Tale soluzione costruttiva ha però lo svantaggio di presentare frequentemente fenomeni transitori quali lo scintillio. La combinazione di metalli preziosi invece garantisce un costante e basso valore di resistenza di contatto anche dopo lunga inattività e un limitato scintillio, permettendo il funzionamento con bassissime tensioni d'avviamento ed una elevata immunità alle interferenze elettriche. Questa soluzione si presta ottimamente alla realizzazione di motori di ridotte dimensioni funzionanti in servizio continuativo, con basso carico di corrente.

Le spazzole sono composte da molti segmenti a forma di pettine (fino a sette denti) per assicurare una maggiore elasticità e quindi un perfetto e costante contatto elettrico.

Minimotori Dc brushless

Soluzioni costruttive. Nella tabella 2 sono riportati i valori costruttivi caratteristici dei minimotori Dc brushless attualmente presenti sul mercato. Dal punto di vista costruttivo i mi-

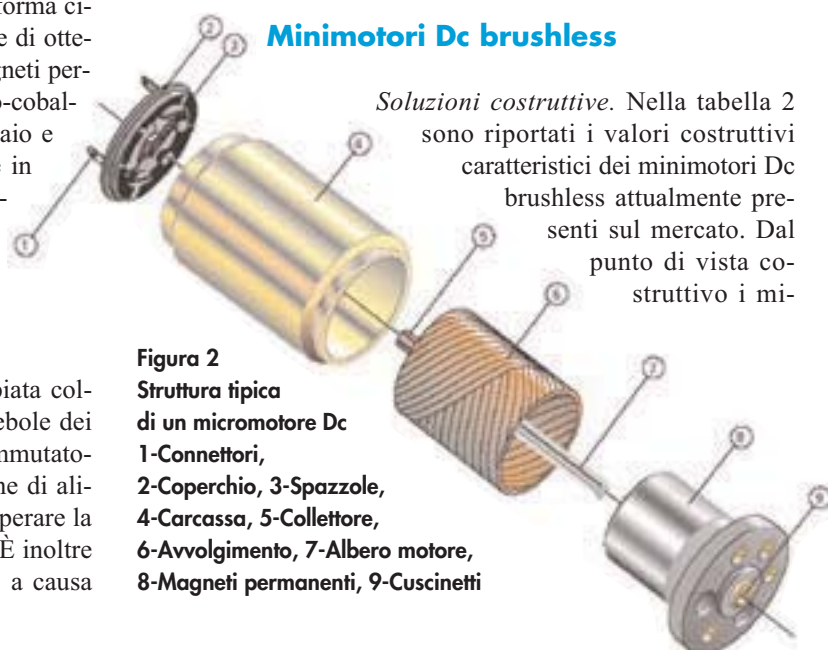


Figura 2
Struttura tipica di un micromotore Dc
1-Connettori,
2-Coperchio, 3-Spazzole,
4-Carcassa, 5-Collettore,
6-Avolgimento, 7-Albero motore,
8-Magneti permanenti, 9-Cuscinetti

nimotori Dc brushless sono simili ai minimotori con commutatore meccanico, hanno carcassa in acciaio e coperchi superiore e inferiore di acciaio o plastica; in genere è prevista una filettatura o la presenza di fori filettati su uno dei due coperchi, per facilitarne il montaggio. Nella progettazione di questi motori si è cercato di unire i vantaggi dell'avvolgimento in bobine autoportanti senza ferro e quelli della commutazione elettronica, con la conseguente eliminazione di archi elettrici al collettore o di usura meccanica.

Ne deriva una costruzione compatta ed economica di grande affidabilità e lunga durata di vita. Questi motori trovano quindi applicazione ideale in tutti quei dispositivi che richiedono un funzionamento continuativo per lunghi periodi, quali ad esempio l'azionamento di impianti di ventilazione, pompe ecc. Sono dotati di uno statore costituito da tre avvolgimenti sfasati spazialmente di 120° elettrici; ciascun avvolgimento è autoportante senza ferro, realizzato con le stesse metodologie dei minimotori in corrente continua.

Per la realizzazione del rotore si adottano invece due differenti soluzioni tecniche. La prima prevede un magnete permanente a due poli con una camicia formata da un tubo di acciaio che ruota in modo solidale con il "rotore interno"; tale camicia è destinata ad accogliere l'avvolgimento statorico (figura 3). Con questa costruzione si ottiene un costante e uniforme traferro ed inoltre si riducono le perdite nel ferro. La seconda soluzione (figura 4) prevede una struttura più tradizionale con un rotore a magneti permanenti a due poli. In particolare la struttura di rotore deve soddisfare esigenze contrastanti: deve essere in grado di generare l'intero flusso necessario al funzionamento della macchina e presentare bassa inerzia per consentire buone accelerazioni.

Al fine di soddisfare queste esigenze risulta fondamentale la scelta del tipo di magneti permanenti. I materiali impiegati possono essere ceramici, a terre rare (samario e cobalto), oppure a base di ferro, boro e neodimio. I magneti di tipo ceramico, se da un lato risultano molto economici, dall'altro possiedono caratteristiche magnetiche mediocri. I magneti a terre rare hanno eccellenti qualità magnetiche ma risultano molto costosi, data la scarsità delle materie prime sul mercato. Proprio perché in grado di generare alti flussi magnetici, questo tipo di magneti permanenti rende possibile progettare motori di piccolissime dimensioni con momenti d'inerzia estremamente contenuti; vengono quindi utilizzati per tutte quelle applicazioni in cui il costo non è un fattore determinante. Il terzo tipo di magneti unisce a caratteristiche magnetiche simili a quelli a terre rare, un costo che può diventare concorrenziale con quello dei magneti in ferrite. Un aspetto negativo è costituito dalla bassa temperatura di Curie, intorno ai 350 °C, che ne limita l'uso ad un massimo di 100 °C.

Riduttori di velocità

I minimotori a corrente continua e i Dc brushless sono in grado di produrre coppie che possono variare tra 0,1 mNm e 100 mNm con velocità da 5000 rpm a 100000 rpm. Spesso però le applicazioni necessitano di coppie superiori e/o velocità

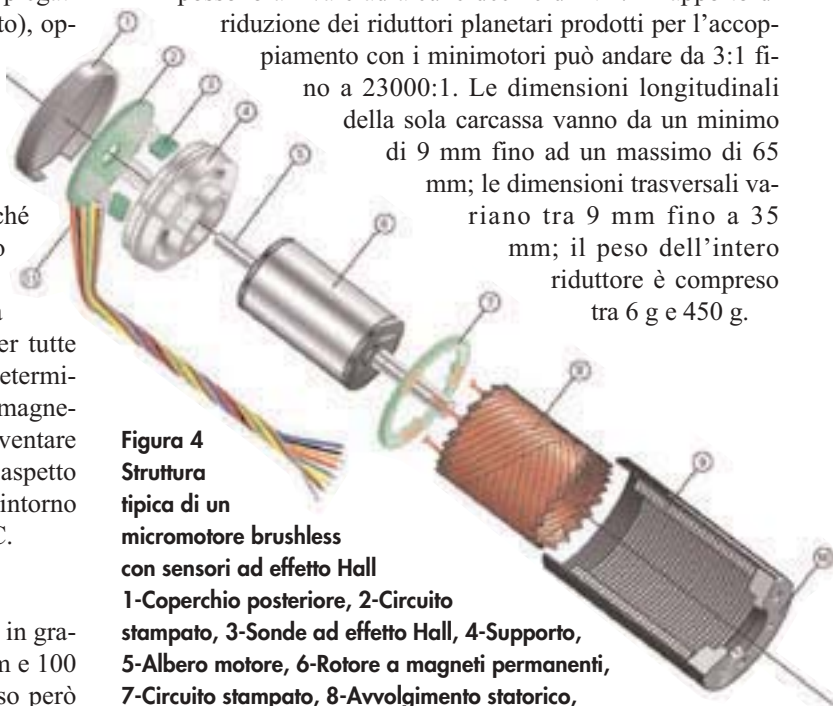
Figura 3 - Struttura tipica di un micromotore brushless senza sensori: 1-Coperchio posteriore, 2-Cavetti di collegamento, 3-Elettronica di alimentazione, 4-Involucro, 5-Avvolgimento statorico, 6-Rotore a magneti permanenti, 7-camicia di acciaio, 8-Albero motore, 9-Coperchio frontale



inferiori. È quindi previsto quasi sempre l'utilizzo di riduttori ad ingranaggi accoppiati ai minimotori allo scopo di ridurre la velocità di uscita e, proporzionalmente, aumentare la coppia. Vengono utilizzate due tipologie di riduttori:

- Riduttori con pignoni in linea costituiti da uno o più rapporti, ciascuno composto da una coppia di ingranaggi. Si trovano in commercio riduttori con pignoni in linea con diversi rapporti di riduzione, a partire da 3:1 fino a circa 1000000:1. Le dimensioni longitudinali della sola carcassa sono comprese tra un minimo di 9 mm fino ad un massimo di 75 mm mentre le dimensioni trasversali variano da 12 mm fino a 30 mm. Il peso dell'intero riduttore è compreso tra 3 g e 120 g. Questo tipo di riduttori è adatto a trasmettere coppie non troppo elevate con valori massimi in uscita attorno ai 2 Nm.
- Riduttori planetari, indicati principalmente per il trasferimento di coppie elevate con valori massimi in uscita che possono arrivare ad alcune decine di Nm. Il rapporto di riduzione dei riduttori planetari prodotti per l'accoppiamento con i minimotori può andare da 3:1 fino a 23000:1. Le dimensioni longitudinali della sola carcassa vanno da un minimo di 9 mm fino ad un massimo di 65 mm; le dimensioni trasversali variano tra 9 mm fino a 35 mm; il peso dell'intero riduttore è compreso tra 6 g e 450 g.

Figura 4
Struttura tipica di un micromotore brushless con sensori ad effetto Hall
1-Coperchio posteriore, 2-Circuito stampato, 3-Sonde ad effetto Hall, 4-Supporto, 5-Albero motore, 6-Rotore a magneti permanenti, 7-Circuito stampato, 8-Avvolgimento statorico, 9-Statore laminato, 10-Involucro, 11-Cavetti di collegamento



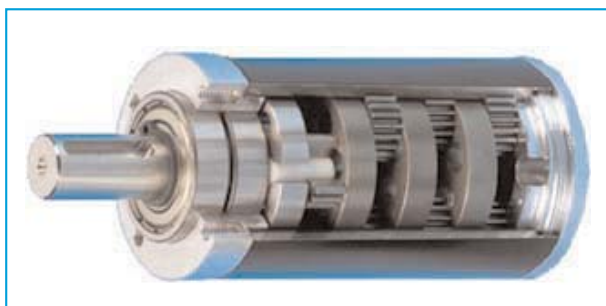


Figura 5 - Spaccato di un riduttore

In entrambi i casi sono caratterizzati da una forma cilindrica, con carcassa in plastica o d'acciaio per facilitare la dissipazione del calore prodotto per attrito (figura 5).

Le ruote dentate sono tipicamente realizzate in metallo e, a volte, per ridurre al minimo la rumorosità, il primo stadio, che è il meno sollecitato, viene realizzato in plastica. I mozzi degli alberi guida degli ingranaggi sono dotati di bronzine sinterizzate o di cuscinetti a sfere. Nei riduttori planetari si sta diffondendo l'utilizzo di alberi in ceramica che, garantendo una minore usura dei componenti critici, permette maggiori velocità in entrata e maggiori coppie trasmissibili (figura 6). Il montaggio sui minimotori avviene attraverso una flangia, filettata o con fori filettati, che si accoppia al sistema di aggancio del motore.

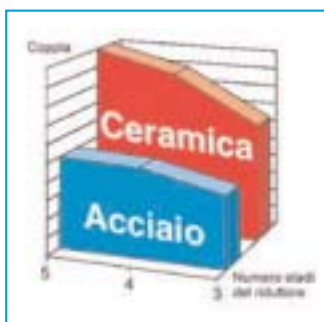


Figura 6 - Comparazione delle coppie applicabili in funzione del materiale utilizzato

Conclusioni

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente impiego e sviluppo degli azionamenti basati su motori miniaturizzati. Il campo di applicazione sta divenendo via via più ampio e spazia dal settore medicale a quello di automazione in generale. Il

presente articolo si focalizza su due tipologie di motori miniaturizzati: i motori a corrente continua a magneti permanenti e i Dc brushless. In particolare sono state considerate le problematiche costruttive di questi motori evidenziandone pregi e limiti di applicazione.

Riferimenti

- [1] *Servosistemi miniaturizzati*, catalogo 2003, Faulhaber Group.
- [2] *Catalogo Maxon 2003*, catalogo 2003, Maxon Motor.
- [3] *Innovative motion solutions*, catalogo 2003, Namiki Motor Group.
- [4] *Miniature brushless Dc*, catalogo 2003, Danaher Motion Company. ■