

Sommario Rassegna Stampa

Pagina Testata		Data	Titolo	Pag.
Rubrica	Umbragroup			
38/42	Organi di Trasmissione	01/05/2023	Un motore elettrico ad alta affidabilit�	2

L'ELETTRIFICAZIONE DEI VELIVOLI È UNA DELLE MAGGIORI SFIDE DELL'INDUSTRIA AEROSPAZIALE: LE ARCHITETTURE "MORE ELECTRIC AIRCRAFT" E "ALL ELECTRIC AIRCRAFT" SONO IMMAGINATE COME LE SOLUZIONI PIÙ ECONOMICHE ED ECOLOGICHE PER I NUOVI AEROMOBILI ED ELICOTTERI. IL PRESENTE STUDIO ANALIZZA LE POSSIBILITÀ DI ADOTTARE UNA SOLUZIONE COMPATTA DI ATTUATORE ELETTROMECCANICO PER IL ROTORE DI CODA DEGLI ELICOTTERI

Moreno D'Andrea Umbragroup S.p.A.

Giuseppe Fabri, Marco Villani Università degli Studi dell'Aquila,
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia

Flavio D'Innocenzo R13 Technology

UN MOTORE ELETTRICO AD ALTA AFFIDABILITÀ PER IL ROTORE DI CODA DEGLI ELICOTTERI

Negli ultimi anni l'industria aerospaziale si sta muovendo rapidamente verso l'elettrificazione dei velivoli; le architetture "More Electric Aircraft" (MEA) e "All Electric Aircraft" (AEA) sono considerate come le soluzioni più economiche ed ecologiche per i nuovi aeromobili [1]. Questa tendenza sta generando una graduale trasformazione nell'industria degli attuatori meccanici che punta a soluzioni sempre più elettrificate. Importanti miglioramenti nei motori e negli azionamenti elettrici possono essere ottenuti introducendo sistemi

multifase alimentati da convertitori elettronici di potenza, in cui sia il motore, sia l'azionamento soddisfino specifiche molto severe riducendo al minimo la probabilità di guasto [2]. L'adozione dei cosiddetti "Attuatori Elettromeccanici" (AE) garantisce ottime prestazioni dinamiche associate a soluzioni progettuali più compatte con alta densità di potenza. Gli AE stanno iniziando ad essere adottati in sistemi caratterizzati da condizioni ambientali critiche con vincoli stringenti in termini di affidabilità, strettamente necessari in applicazioni

critiche come quelle aerospaziali. Gli AE vengono introdotti nel settore aerospaziale non solo in sostituzione dei tradizionali attuatori idraulici, ma grazie al loro "design" compatto e alle ottime prestazioni dinamiche ne consentono l'utilizzo in una nuova generazione di applicazioni legate al miglioramento dei sistemi di controllo del volo e delle apparecchiature di bordo. Il presente lavoro analizza le possibilità di adottare un attuttore elettromeccanico compatto per azionare il rotore di coda degli elicotteri di tipo "Fenestron®".

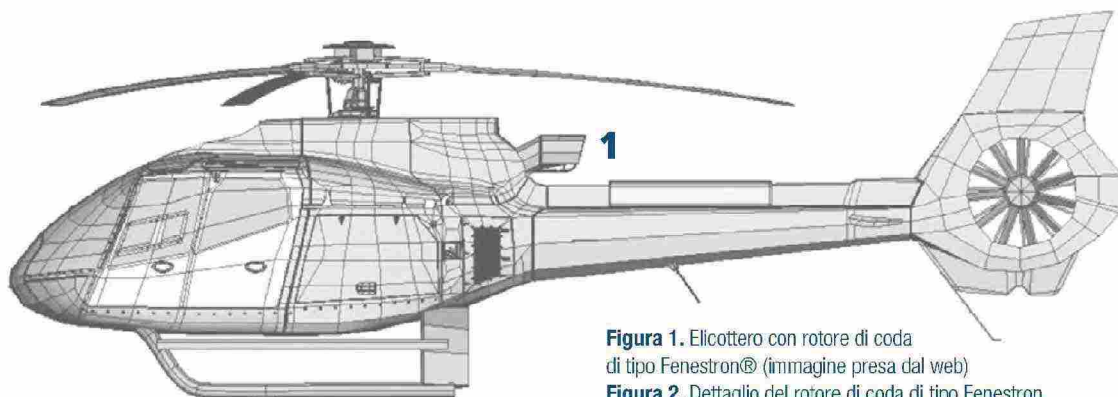
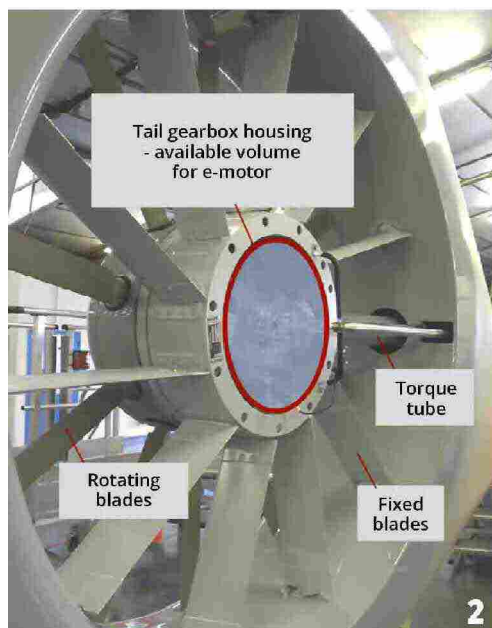


Figura 1. Elicottero con rotore di coda di tipo Fenestron® (immagine presa dal web)

Figura 2. Dettaglio del rotore di coda di tipo Fenestron



Questo è un sistema di controllo di volo primario che muove il rotore di coda utilizzato per bilanciare la coppia risultante dall'azione del rotore principale. Si tratta essenzialmente di una versione "chiusa" del classico rotore di coda che utilizza due serie di pale racchiuse all'interno di una coda verticale (figura 1); i vantaggi introdotti da questa scelta progettuale possono essere riassunti in:

- un notevole aumento della sicurezza complessiva;
- una riduzione dei rischi di impatto con oggetti estranei, soprattutto durante le operazioni di atterraggio e decollo;
- una notevole riduzione dell'impatto acustico dell'elicottero;
- una riduzione dell'incidenza della turbolenza dell'aria intorno alla coda, che consente un flusso d'aria più uniforme all'interno del rotore di coda.

I lunghi alberi di trasmissione del rotore di coda sono supportati da cuscinetti a sfera e altri dispositivi e necessitano di programmi di manutenzione intensivi e sofisticati durante tutto il ciclo di vita dell'elicottero in modo da evitare guasti con conseguenze catastrofiche. Un motore elettrico direttamente accoppiato alle pale (soluzione "direct-drive") potrebbe rappresentare un

passo avanti nell'azionamento del rotore di coda, consentendo un'ottimizzazione del progetto dell'intero elicottero.

I principali vantaggi sono:

- tutti i noti benefici dei sistemi "Power by Wire";
- un'ottimizzazione del sistema e della gestione energetica;
- una minore manutenzione, diagnostica elettronica;
- prestazioni migliorate e nuove funzionalità;
- una minore rumorosità.

L'articolo presenta l'attuatore elettromeccanico, con particolare attenzione agli aspetti progettuali del motore elettrico ed alle relative prestazioni, sia in assenza che in presenza di guasti, attraverso accurate analisi agli Elementi Finiti.

Progettazione del motore

Lo studio è riferito all'elicottero EC130 equipaggiato con Fenestron; il motore deve essere compatibile con il piccolo volume disponibile in modo da essere completamente intercambiabile al sistema tradizionale, (figura 2). Anche i vincoli di peso sono stringenti poiché il nuovo azionamento di tipo "direct-drive" sposta tutto il peso del sistema sulla parte posteriore dell'elicottero con possibile impatto sulla stabilità.

Le principali specifiche del motore elettrico sono riportate in tabella 1. I livelli di potenza (alta e bassa) corrispondono alle peggiori condizioni di volo: consentendo al pilota di ruotare l'elicottero attorno al suo asse verticale, il funzionamento a bassa potenza corrisponde alla rotazione dell'elicottero nel senso opposto a quello del rotore principale, mentre il funzionamento ad alta potenza è richiesto durante l'inversione della direzione nello stesso senso della rotazione del rotore principale. I requisiti di affidabilità impongono che la perdita di una o due fasi non influisca sulla capacità di erogare la potenza dell'attuatore. Per questa applicazione i motori a Magnet Permanenti (MP) rappresentano la soluzione più interessante grazie a caratteristiche di elevata efficienza, buone prestazioni ed elevata densità di potenza.

L'alta densità di coppia, la semplificazione del sistema e la ridotta manutenzione sono alcuni dei principali vantaggi che portano

i motori a MP a essere considerati una soluzione interessante per le applicazioni aerospaziali. Inoltre, per soddisfare i requisiti di affidabilità, si è optato per una soluzione multifase in cui ogni fase può essere considerata come un singolo modulo: questa scelta comporta numerosi vantaggi rispetto ai tradizionali azionamenti per motori trifase e sfrutta al meglio la possibilità di avere avvolgimenti a fasi indipendenti. L'avvolgimento è di tipo "concentrato" e le bobine appartenenti a fasi diverse non sono mai in contatto; ciò evita che un possibile guasto coinvolga le fasi sane. Viene proposto un motore brushless a MP a 6 fasi raffreddato ad aria a fasi indipendenti. Per ottenere una coppia elevata mantenendo un ingombro ridotto e semplificare il montaggio del motore all'interno dell'elicottero, si è scelta una soluzione con magneti disposti radialmente all'interno del rotore. Partendo dalle specifiche e dagli ingombri (tabella 1), il motore è stato progettato utilizzando una procedura di ottimizzazione combinata con un software agli Elementi Finiti. Il motore è stato dimensionato con riferimento al funzionamento ad alta potenza che rappresenta la condizione di carico più critica. La figura 3 mostra una sezione del progetto finale mentre la figura 4 una vista 3D del motore; le dimensioni principali sono elencate in tabella 2. Una delle priorità in fase di progettazione è stata la riduzione

Funzionamento in assenza di guasti		Alta potenza 120 kW	Bassa potenza 5 kW
Coppia	Nm	320	23
Velocità	rpm	3600	2100
Tensione V_{dc}	V	540	
Peso del motore	kg	< 30	
Diametro esterno	mm	380	
Lunghezza assiale	mm	< 100	
Rendimento	%	> 94	
Raffreddamento		Aria	
Condizioni di guasto			
1 fase guasta	Nessun degrado delle prestazioni		
2 fasi guaste	85 kW su tutto il range di velocità		

TABELLA 1 - PRINCIPALI SPECIFICHE

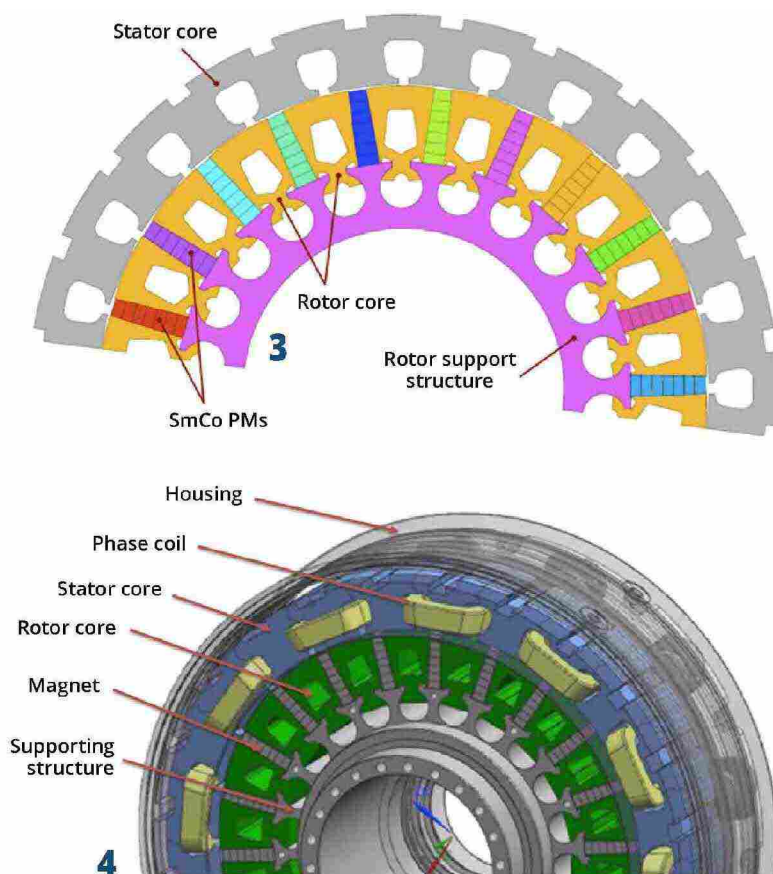


Figura 3. Sezione del motore (metà macchina)

Figura 4. Vista 3D del motore con MP interni (metà macchina)

del peso del motore senza comprometterne le prestazioni. Questo obiettivo è stato raggiunto eliminando il materiale "superfluo" che incide sul peso complessivo. A tal fine, la struttura del rotore è stata accuratamente alleggerita introducendo supporti in alluminio (figure 3 e 4). Questo ha permesso di ottenere anche un canale di raffreddamento aggiuntivo in direzione assiale. I MP sono posizionati direttamente sulla struttura in alluminio. Per quanto riguarda il pacco statorico e rotorico ed il magnete permanente, sono stati scelti materiali ad alte prestazioni e in particolare: lamierino FeCo (spessore 0,10 mm) sia per il nucleo dello statore, sia del rotore e il magnete a terre-rare SmCo. La scelta del nucleo in ferro al cobalto è dettata principalmente da esigenze di densità di coppia e di efficienza. Questa lega è stata sviluppata specificamente per applicazioni ad alte prestazioni

ed è caratterizzata da un livello di saturazione notevolmente più elevato rispetto ai materiali convenzionali (fino a 2,4 T) con perdite specifiche ridotte a frequenze relativamente elevate (meno di 15 W/kg a 1,5 T - 400 Hz). Queste caratteristiche rendono il lamierino FeCo particolarmente adatto alle applicazioni aerospaziali. I magneti sono stati segmentati assialmente e radialmente (figure 3 e 4) per ridurre le perdite.

Prestazioni del motore

Le prestazioni del motore sono elencate in tabella 3. È stata imposta una temperatura di 130°C per l'avvolgimento statorico e una temperatura di 120°C per i magneti. La superficie interna dello statore e quella esterna del rotore sono state accuratamente sagomate per creare un traferro variabile: questa scelta ha permesso di avere una forma d'onda della forza-elettromotrice indotta

N. fasi	6
N. poli	22
N. cave statoriche	24
Tipo di rotore	MP annegati
Lunghezza pacco	mm 50
Diametro esterno motore	mm 380
Diametro esterno statore	mm 350
Diametro interno statore	mm 285
Traferro minimo	mm 0.6
N. spire per fase	25
Sezione conduttore nudo	mm ² 6.75
Peso motore (materiali attivi)	kg 25

TABELLA 2 - DATI DEL MOTORE

		Alta potenza	Bassa potenza
Corrente di fase	Amax	100	7.0
Coppia media	Nm	320	25
Velocità	rpm	3600	2100
Potenza utile	kW	121	5.5
Rfase @ 130°C	mΩ	40.1	
Perdite totali	W	3534	295
Rendimento	%	97.2	94.9

TAB. 3 - PRESTAZIONI DEL MOTORE (SENZA GUASTI)

(BEMF) abbastanza sinusoidale. La coppia media ad alta potenza è di 320 Nm con una corrente di 100 A e un rendimento superiore al 97%. Le perdite totali comprendono anche le perdite legate alle correnti parassite nei MP, che sono drasticamente ridotte grazie alla segmentazione dei magneti lungo le direzioni radiali e assiali. Le perdite nei magneti permanenti sono di circa 100 W alla velocità nominale e di 250 W alla velocità massima di 4600 giri/min (che è anche la velocità massima richiesta per questa applicazione). A bassa potenza le perdite Joule scendono a pochi Watt e le perdite più significative sono quelle nel nucleo e le perdite per attrito. Il motore ha un peso della parte attiva di circa 25 kg. I vincoli sul volume e sul peso hanno influito sulle dimensioni del nucleo dello statore e quindi sui valori di densità di flusso, che sono compresi nell'intervallo 2,1-2,2 T; la Fig. 5 mostra

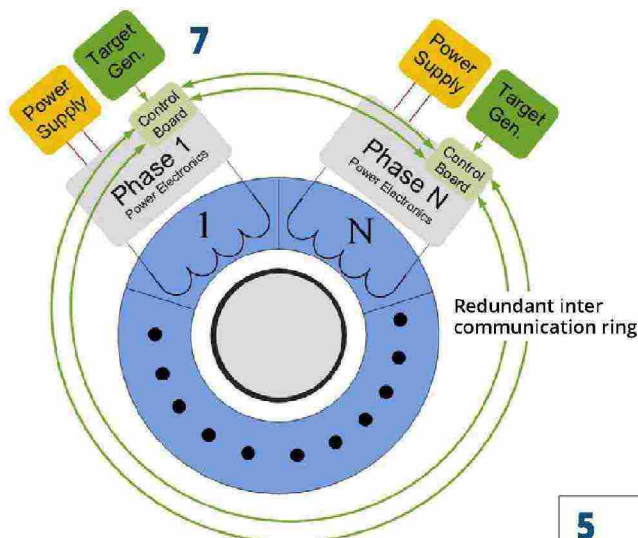


Figura 5. Analisi 3D agli Elementi Finiti: densità di flusso (100 Amax)

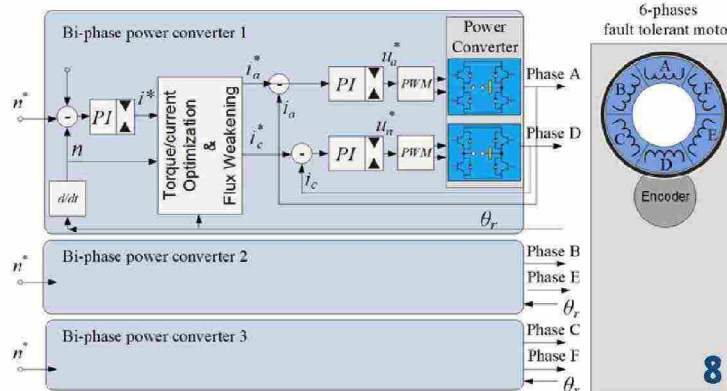
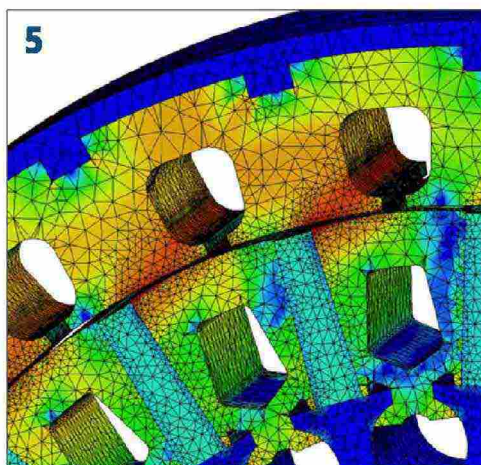
Figura 6. Prototipo del motore

Figura 7. Motore multifase con fasi indipendenti

Figura 8. Schema a blocchi semplificato del controllo e del convertitore di potenza per un motore a n fasi indipendenti

		1 fase guasta	2 fasi guaste
Corrente di fase	Amax	125	105
Coppia media	Nm	327	226
Velocità	rpm	3600	3600
Potenza utile	kW	123	85.2

TABELLA 4 - PRESTAZIONI DEL MOTORE (CON GUASTI)



una mappa 3D della densità di flusso ad alta potenza. Questi valori si possono ritenere accettabili grazie all'utilizzo del lamierino FeCo. La "Coppia per unità di Volume rotorico" (TRV) è pari a 100 kNm/m³ e indica che il motore proposto rappresenta una soluzione ad alta densità di coppia. L'analisi agli Elementi Finiti ha fornito un valore di ripple di coppia molto basso (circa l'1%), senza inclinazione del rotore, e ciò è dovuto non solo all'impiego di un avvolgimento di tipo "concentrato" ma anche a una giusta scelta del numero di cave e del numero di poli. La tabella 4 presenta le prestazioni del motore nel funzionamento in condizioni di guasto (con una e due fasi guaste). Le correnti di fase sono più alte rispetto al valore nominale in modo da soddisfare le specifiche. Sulla base dei risultati dell'ottimizzazione è stato realizzato un prototipo, mostrato in figura 6.

Azionamento multifase ed affidabilità

Negli azionamenti industriali viene comunemente adottata un'architettura con inverter trifase, basata su una struttura a tre rami/sei interruttori: l'uscita di ciascun ramo dell'inverter è collegata al terminale positivo della fase ed i terminali negativi delle fasi del motore sono collegati a stella. Quando l'inverter deve alimentare un motore con requisiti di affidabilità, il collegamento a stella viene evitato, poiché rappresenta un punto critico di guasto. Di solito si adotta il principio della modularità, che suggerisce che ogni fase deve essere alimentata da un sottosistema elettronico di potenza dedicato e completamente indipendente, come schematizzato in figura 7. Ogni sottosistema comprende l'alimentazione, il controllo e la regolazione, il sistema di controllo e la generazione di comando e può operare

in modo autonomo rispetto agli altri. Spesso è necessario un anello di intercomunicazione ridondante tra i sottosistemi per assicurare un corretto scambio di informazioni sulle funzionalità richieste e per consentire capacità di diagnostica reciproca. Questa architettura modulare a fasi completamente indipendenti è ritenuta come la migliore per soddisfare i requisiti di affidabilità, ma introduce inefficienze nel sistema a causa di ridondanze debolmente integrate. Pertanto, per migliorare l'integrazione del sistema, l'architettura di cui sopra può essere semplificata raggruppando alcune funzionalità in base ai requisiti di affidabilità del sistema ed in base all'affidabilità dell'alimentazione fornita e degli altri ingressi del sistema (ad esempio se l'alimentazione principale garantisce una affidabilità adeguata, i vincoli di "fault tolerant" lato convertitore possono essere meno

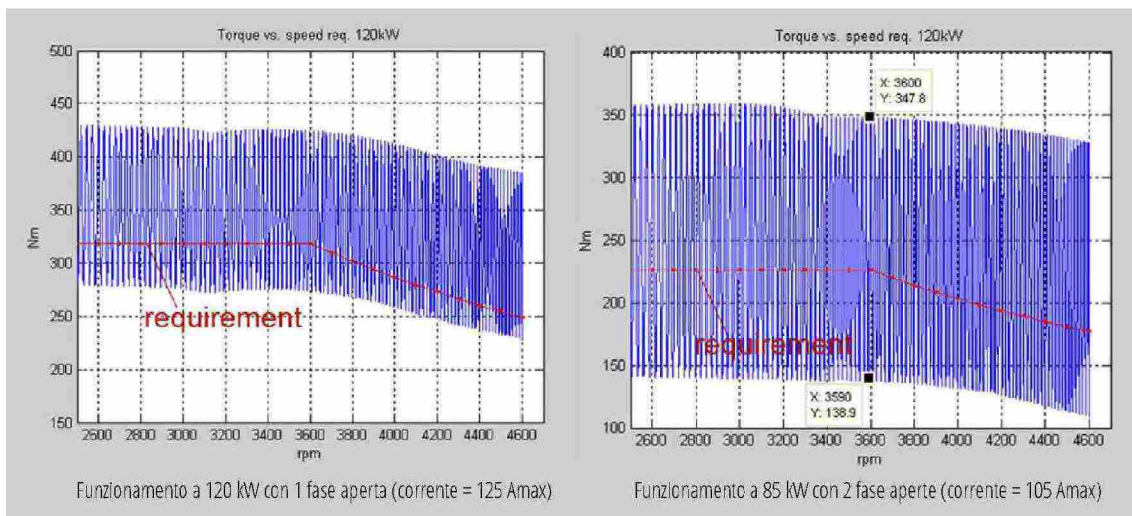


Figura 9. Funzionamento in condizioni di guasto: prestazioni dinamiche

stringenti e si può prevedere che la stessa alimentazione sia utilizzata su tutti i moduli del convertitore). Per quanto riguarda l'hardware dell'elettronica di potenza, una configurazione a ponte H può essere utilizzata in modo efficace per alimentare ciascuna fase di una macchina PM a fasi indipendenti e garantire una corretta gestione dei guasti e il loro isolamento quando necessario. Le macchine a fasi indipendenti, con i loro requisiti di modularità, prevedono l'alimentazione indipendente di ciascuna fase del motore per preservare il

disaccoppiamento (figura 8). I principi di modularità possono essere estesi allo schema di controllo, dove, in dettaglio, l'anello di controllo della corrente viene replicato in modo indipendente per ciascuna fase dell'azionamento. Tuttavia, per ridurre la complessità del sistema, sono stati realizzati tre convertitori di potenza con architettura bifase invece di sei convertitori indipendenti. Con questa architettura, un convertitore di potenza alimenta due fasi, anche se è organizzato internamente con un controllo di corrente e un'elettronica di potenza indipendenti per ogni singola fase. All'interno dello stesso alloggiamento, un'unica scheda di controllo esegue un algoritmo sulla base del riferimento di velocità. L'algoritmo di controllo del motore genera due richieste di corrente per i loop di controllo indipendenti, che vengono sintetizzate attraverso i due ponti H. Ciascuna delle fasi del motore è alimentata in modo indipendente, ma con tre convertitori di potenza anziché sei. Ulteriori vantaggi in termini di funzionamento in caso di guasto si ottengono collegando fasi opposte allo stesso convertitore di potenza bifase; questo suggerimento evita che un guasto a un convertitore di potenza possa interrompere due fasi motore adiacenti, con conseguente forte degrado delle capacità di generare coppia. La figura 9 riporta i risultati della simulazione relativi alle operazioni

in modalità "guasto" in termini di coppia nell'intervallo di velocità. In dettaglio, la figura 9 riporta a sinistra il funzionamento con una fase guasta, mentre a destra le fasi guaste sono due adiacenti. Nonostante l'aumento del ripple di coppia, il sistema è ancora in grado di fornire la coppia richiesta.

Conclusioni

È stato progettato un motore Brushless a MP a 6 fasi raffreddato ad aria per il rotore di coda di un elicottero di tipo Fenestron® [3], [4], [5]. È stata scelta una soluzione con magneti interni al rotore e disposti radialmente per ottenere una coppia elevata nel rispetto degli ingombri imposti. Inoltre, è stata adottata una soluzione multifase, con avvolgimenti "concentrati", in cui ogni fase può essere considerata come un singolo modulo. Le prestazioni del progetto proposto soddisfano pienamente le specifiche a bassa e alta potenza. Il motore ha un peso della parte attiva di circa 25 kg e rendimenti soddisfacenti a bassa e ad alta potenza: ciò consente di sostituire l'attuale sistema per azionare il rotore di coda degli elicotteri. È stato realizzato un prototipo.

Riconoscimenti

La ricerca è stata finanziata dal Sottoprogramma Quadro dell'Unione Europea (7° PQ/2007-2013) per l'iniziativa tecnologica congiunta CleanSky, con l'accordo di sovvenzione n. 632565. •

Riferimenti

1. M. D'Andrea, F. Fiume, D. Macera and M. Villani, "PM brushless motor for Aileron/Spoiler system of a Regional aircraft", Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2019.
2. G. Fabri, M. Tursini, M. Villani and L. Castellini "Multi-phase PM motor drives for fault-tolerant applications", IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011, pp. 1351-1356.
3. G. Fabri, F. Parasiliti Collazzo, M. Tursini, M. Villani and L. Castellini, "PM brushless motor design for helicopter tail rotor", International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016.
4. L. Castellini, M. D'Andrea and M. Villani "Electric powertrain for helicopter tail rotor", 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2016.
5. G. Fabri, F. Parasiliti Collazzo, M. Tursini, M. Villani and L. Castellini, "PM brushless motor for helicopter electric tail rotor drive system", IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017.