

Geometrie rotoriche per motori sincroni a magneti permanenti

Lorenzo Mantione, Lucia Frosini, Marcello Minervini *Università di Pavia*
Tommaso Emanuelli *Ecotechno Srl* - Gianpietro Pacinotti *Comer Srl*

L'articolo presenta i risultati della progettazione di un motore sincrono a magneti permanenti interni per un banco prova ad alta velocità. Lo studio si concentra sulla ricerca di una geometria di rotore che, attraverso la disposizione dei magneti permanenti al suo interno, conferisca al motore le migliori prestazioni sia a velocità nominale che in deflussaggio. L'analisi delle diverse geometrie di rotore è stata vincolata alla effettiva realizzabilità industriale

Nel settore automobilistico dei veicoli elettrici e ibridi, la maggior parte dei motori elettrici per la trazione è del tipo sincrono a magneti permanenti interni (IPMSM) a terre rare [1,2]. Sebbene altre tecnologie più economiche siano state valutate e siano attualmente oggetto di ricerca (motori asincroni, sincroni a riluttanza, a riluttanza commutata [3]), gli IPMSM offrono tuttora le migliori prestazioni in un ampio intervallo di velocità, con una maggiore densità di potenza e di coppia rispetto alle dimensioni e al peso.

Per consentire l'effettiva realizzabilità industriale, in termini sia tecnici che economici, è opportuno impiegare per lo statore gli stessi lamierini utiliz-

zati per i motori asincroni e scegliere lamierini e magneti di rotore con geometrie e dimensioni che permettano una standardizzazione e un assemblaggio relativamente semplice.

Caso di studio

Lo studio ha riguardato la modellizzazione e progettazione di un IPMSM per un banco prova ad alta velocità, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- potenza nominale: 350 kW.
- campo di regolazione: a coppia costante fino a 5.000 giri/min; a potenza costante fino a 8.000 giri/min; a potenza decrescente da 8.000 giri/min in su.
- velocità massima: almeno 15.000 giri/min.
- coppia nominale: 670 N×m.
- altezza d'asse: 160 mm.

In prima analisi, occorre determinare il numero di poli che meglio si adatta ad un motore con tali caratteristiche. In questo caso di studio, si è eseguito un confronto tra motori a 6 e a 8 poli, in quanto è stato possibile escludere a priori soluzioni con un numero di poli maggiore di 8 a causa delle elevate perdite che si genererebbero all'elevata frequenza con cui circola la corrente. Allo stesso modo è stato possibile escludere soluzioni con un numero di poli inferiore a 6 grazie ai risultati di precedenti ricerche [4]. Contemporaneamente, sono state valutate due possibili geometrie di rotore, ossia le configurazioni a "V" o a "Delta"; la motivazione di questa scelta risiede nella facilità di inserimento dei magneti all'interno del pacco rotorico durante la fase di costruzione dei rotori che presentano queste configurazioni.

Il fattore che influenza maggiormente le prestazioni di un IPMSM è la disposizione dei magneti mentre il volume dei magneti ne determina i costi di produzione [5-7]. Alcune automobili elettriche ed ibride in commercio fanno uso di questo tipo di motori ma la struttura dei magneti al loro

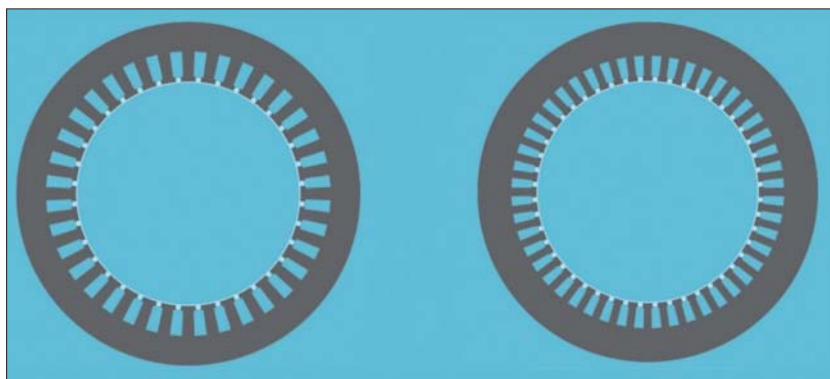


Figura 1

Configurazioni di statore: a sinistra, a 6 poli; a destra, a 8 poli

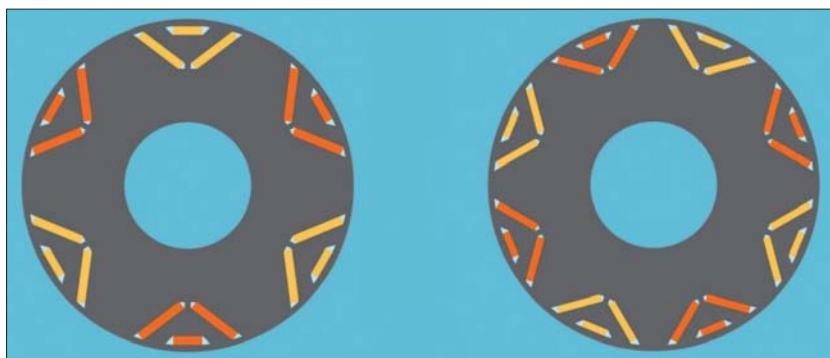


Figura 2

Configurazioni di rotore a "Delta": a sinistra, a 6 poli; a destra, a 8 poli

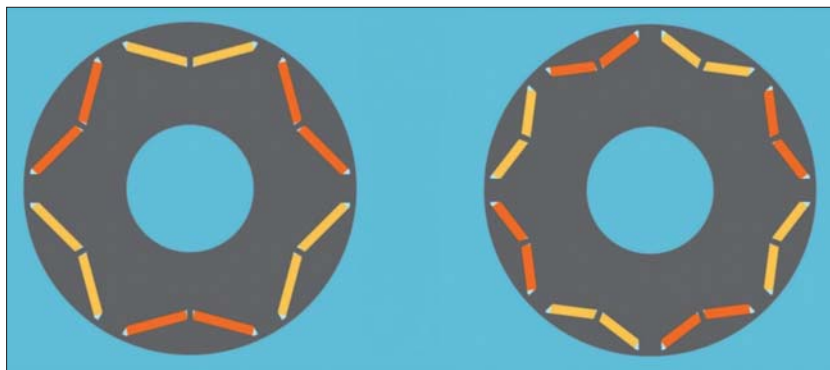


Figura 3

Configurazioni di rotore a "V": a sinistra, a 6 poli; a destra, a 8 poli

interno è piuttosto diversa; per esempio, la Chevy Bolt monta un motore con magneti disposti a "doppia V", invece la Prius utilizza una struttura a singola "V". Entrambe le configurazioni hanno pregi e difetti e non esiste una configurazione migliore in assoluto; per questo motivo è fondamentale svolgere uno studio approfondito in modo da trovare la disposizione migliore per ogni singolo progetto. In letteratura esistono diversi studi riguardanti la configurazione dei magneti all'interno di un IPMSM, dove sono state confrontate molte configurazioni diverse fra loro, ad es. [8-10].

Durante l'analisi svolta in questo caso di studio sono stati modellizzati due tipi di statore: uno per la macchina a 6 poli e uno per la macchina a 8 poli; per cambiare il minor numero di parametri possibile e rendere meno rilevante l'influenza

dello statore, sono stati scelti due statore con lo stesso numero di cave per polo e per fase: più precisamente, statore con 2 cave per polo e per fase, ovvero 36 cave per il motore a 6 poli e 48 cave per quello a 8 poli. La geometria delle cave di statore utilizzate è rappresentata in figura 1.

Infine, è stata scelta la lunghezza del pacco di lamierini statorico e il tipo di collegamento tra le fasi. Per il pacco statorico sono stati utilizzati lamierini NO20-1350N di spessore 0,2 mm, che presentano perdite specifiche relativamente basse anche ad alta frequenza di alimentazione, essenziali per un motore sincrono a magneti permanenti ad alta velocità.

I quattro rotori che sono stati modellizzati e accoppiati ai rispettivi statore sono:

- rotore a 6 poli con configurazione a "V" accoppiato allo statore con 36 cave;
- rotore a 6 poli con configurazione a "Delta" accoppiato allo statore con 36 cave;
- rotore a 8 poli con configurazione a "V" accoppiato allo statore con 48 cave;
- rotore a 8 poli con configurazione a "Delta" accoppiato allo statore con 48 cave.

Nella modellizzazione dei rotori con struttura a "V", si è cercato di rendere le geometrie proporzionalmente uguali in modo tale da rendere il numero di poli l'unico parametro a variare. Anche il peso dei magneti è rimasto costante. Lo stesso principio è stato utilizzato per modellizzare i due rotori che presentano una configurazione a "Delta". In figura 2 e in figura 3 sono rappresentate le geometrie di rotore utilizzate nella prima fase dell'analisi.

Per il rotore sono stati utilizzati gli stessi lamierini utilizzati per lo statore e i magneti permanenti N45SH, composti da una lega di neodimio ferro e boro, che presentano un'induzione residua nominale pari a 1.350 mT, offrendo una combinazione di ottime prestazioni magnetiche e costi moderati.

Per svolgere anche un'analisi termica, oltre a quella elettromagnetica, è stato modellizzato il sistema di raffreddamento, che prevede un raffreddamento ad aria forzata interno al motore generato da una ventola posta sull'albero e un raffreddamento ad acqua forzata esterno al motore.

Definizione dei punti di lavoro

Per eseguire un adeguato confronto di prestazioni tra le diverse configurazioni proposte, è necessario definire una serie di punti di lavoro a cui deve operare la macchina, stabilendo tre parametri principali: la densità di corrente di statore, il "control angle" e la velocità di rotazione del rotore. Il valore efficace della densità di corrente nominale è stato scelto pari a $9,5 \text{ A/mm}^2$ perché grazie a questo valore la macchina è dimensionata correttamente dal punto di vista termico, per cui né l'isolante né i magneti raggiungeranno temperature critiche.

Quando la macchina lavora a velocità superiori a quella nominale, le perdite per correnti parassite che si instaurano all'interno dei magneti permanenti fanno aumentare la temperatura all'interno di essi; infatti, se esposti a temperature elevate perdono parzialmente o totalmente la loro magnetizzazione con ovvie ripercussioni negative dal punto di vista delle prestazioni del motore. I magneti permanenti al neodimio di tipo N45SH perdono in modo permanente una parte della loro magnetizzazione a una temperatura superiore a circa $120\text{-}150^\circ\text{C}$: non conoscendo il comportamento reale della macchina ma solo quello simulato via software, durante la progettazione è stato imposto un valore massimo cautelativo pari a 75°C .

Le simulazioni sono quindi state effettuate monitorando costantemente la temperatura, abbassando il valore di densità di corrente in quei punti di lavoro dove la temperatura dei magneti superava i 75°C .

Per conoscere il miglior valore di "control angle" con il quale controllare la macchina ad ogni velocità, nel caso in esame ci si è basati sulla sezione *Performance mapping* del software FluxMotor®, all'interno della quale è possibile ricavare la curva che esprime il miglior valore di *control angle* in funzione della velocità di rotore.

Per quanto riguarda la velocità di rotazione del rotore, è stato preso un intervallo di valori che va da 5.000 giri/min a 15.000 giri/min con un passo di 1.000 giri/min .

Una volta inseriti i tre parametri che definiscono il punto di lavoro, sono state inserite le temperature iniziali dei magneti, dei conduttori, dell'aria esterna e del liquido refrigerante, pari a 25°C .

Risultati delle simulazioni

Per favorire il confronto fra i due motori con la configurazione a "V" e i due motori con la configurazione a "Delta" sono stati creati dei grafici che raffigurano la coppia, la tensione di linea, il fattore di potenza ed il rendimento in funzione della velocità del rotore.

Per quanto riguarda la configurazione a "V", tutte le grandezze analizzate presentano valori migliori nel motore a 6 poli. La coppia rimane superiore lungo tutti i punti di lavoro fino a raggiungere praticamente lo stesso valore a 15.000 giri/min ; lo stesso vale per il rendimento, con l'unica differenza che intorno a 14.500 giri/min diventa leggermente inferiore. I valori del fattore di potenza risultano pressoché uguali lungo tutti i punti di lavoro. Per quanto riguarda la tensione di linea, le differenze sono più marcate: nel motore a 6 poli la tensione ha valori più contenuti rispetto al motore a 8 poli.

Anche per quanto riguarda la configurazione a "Delta", i risultati mettono in evidenza le migliori prestazioni del motore a 6 poli in praticamente tutti i punti di lavoro.

È possibile concludere che 6 sia il numero di poli ideale per la macchina in fase di progetto; per questo motivo, nel seguito verranno analizzati solamente motori con questo numero di poli.

Analisi delle prestazioni delle diverse geometrie di rotore nel punto di lavoro a velocità nominale

È stato analizzato come ogni singolo parametro geometrico del rotore influenzi le prestazioni della macchina: a turno, è stato preso in esame un parametro geometrico e lo si è fatto variare di piccoli intervalli cercando di mantenere costanti tutti gli altri parametri. In questo modo, tramite un'attenta lettura dei risultati, è stato possibile capire quali modifiche dei parametri influiscono positivamente sulle prestazioni e quali negativamente e da qui ricavare le geometrie più adatte al funzionamento nel punto di lavoro a velocità nominale. In tutte le simulazioni, il peso dei magneti è stato mantenuto costante, pari a 6 kg .

La densità di corrente e la velocità di rotazione sono state mantenute costanti in tutte le simulazioni e sono state poste rispettivamente pari a $9,5 \text{ A/mm}^2$ e a 5.000 giri/min (velocità nominale). Il control angle è stato calcolato prima di ogni simulazione, in quanto variando la geometria è possibile che il suo valore si modifichi.

In prima analisi, sono stati considerati i seguenti due parametri geometrici, per il rotore con i magneti disposti a "V" e poi per quello con configurazione "Delta":

a. angolo formato dai magneti;

b. spessore dei magneti.

Dalle simulazioni con la configurazione a “V”, si è verificato che il rendimento, la coppia, la potenza meccanica e il fattore di potenza aumentano all’aumentare dell’angolo formato dai magneti.

Inoltre, considerando che, per mantenere costante il peso dei magneti, un aumento del loro spessore ne comporta un accorciamento e viceversa, è risultato che una riduzione dello spessore accompagnata da un loro allungamento migliora le prestazioni elettromagnetiche del motore.

Nella configurazione a “Delta”, per variare l’angolo formato dai magneti, è necessario modificare leggermente anche lo spessore e la lunghezza dei magneti. I risultati ottenuti confermano che, anche con questa configurazione, l’aumento dell’angolo formato dai magneti migliora le prestazioni del motore. Tuttavia, l’aumento di coppia, rendimento, potenza meccanica e fattore di potenza è molto inferiore rispetto all’aumento nel caso del rotore a “V”: questo fenomeno può essere attribuito all’aumento dello spessore dei magneti. Infatti, come precedentemente dimostrato per la configurazione a “V”, più i magneti sono stretti e lunghi, maggiori saranno le prestazioni nel punto di lavoro a velocità nominale. In pratica si hanno due effetti contrastanti: da un lato l’aumento dell’angolo compreso fra i magneti fa migliorare le prestazioni e dall’altro l’aumento dello spessore le peggiora.

Per quanto riguarda la variazione dello spessore dei magneti con la configurazione a “Delta”, sono stati modellizzati due rotori dove gli unici parametri modificabili sono lo spessore e la lunghezza dei

due magneti laterali, mantenendo invariata la geometria del magnete centrale. I risultati delle simulazioni confermano anche per il rotore a “Delta” che la diminuzione dello spessore e l’aumento della lunghezza dei magneti provocano un miglioramento delle prestazioni.

Successivamente, è stato condotto uno studio sui seguenti tre parametri geometrici relativi ad un rotore con i magneti disposti a “Delta”:

a. spessore del “ponte” tra i magneti (W3 in figura 4);

b. arco polare occupato dai magneti (ossia quanti gradi elettrici sono occupati dai magneti all’interno dei 180° elettrici di un polo);

c. spessore del magnete centrale.

Il parametro W3 è stato modificato partendo da un valore di 4 mm fino ad arrivare a 2,5 mm con un passo di 0,15 mm: questo spessore non è stato ridotto ulteriormente perché, essendo un motore progettato per funzionare a velocità elevate, uno spessore inferiore potrebbe rendere il “ponticello” troppo fragile dal punto di vista meccanico. I risultati mostrano che, stringendo il “ponticello”, le prestazioni del motore complessivamente migliorano. Analoghi miglioramenti si ottengono anche riducendo questo parametro nella configurazione a “V”.

Per quanto riguarda la modifica dell’arco polare occupato dai magneti, sono state dapprima svolte le simulazioni con la configurazione a “V”, dalle quali è emerso che il rendimento, la coppia, la potenza meccanica e il fattore di potenza aumentano al diminuire dell’arco polare.

Nella configurazione a “Delta”, è possibile variare l’arco polare occupato dai magneti modificando anche lo spessore e la lunghezza dei magneti. Dai risultati si nota come, diminuendo l’arco polare e di conseguenza rendendo i magneti più corti e stretti, la potenza meccanica, la coppia ed il rendimento diminuiscano. È possibile ipotizzare quindi che il contributo positivo della diminuzione dell’arco polare non sia sufficiente a contrastare il contributo negativo dato dall’accorciamento e l’aumento di spessore dei magneti. Inoltre, la presenza del terzo magnete potrebbe essere la causa di un ulteriore peggioramento delle prestazioni perché riducendo di molto l’arco polare occupato dai magneti la porzione di ferro direttamente affacciata al traferro diventa molto piccola e soggetta a saturazione. È quindi possibile affermare che a differenza del rotore a “V”, in questo caso, la riduzione dell’arco polare occupato dai magneti non produca effetti positivi sulle prestazioni del motore.

Per studiare l’influenza dello spessore del magnete centrale sulle prestazioni del motore, sono stati modificati i parametri TM1 (spessore) e WM1 (lunghezza). È stato necessario modificare anche

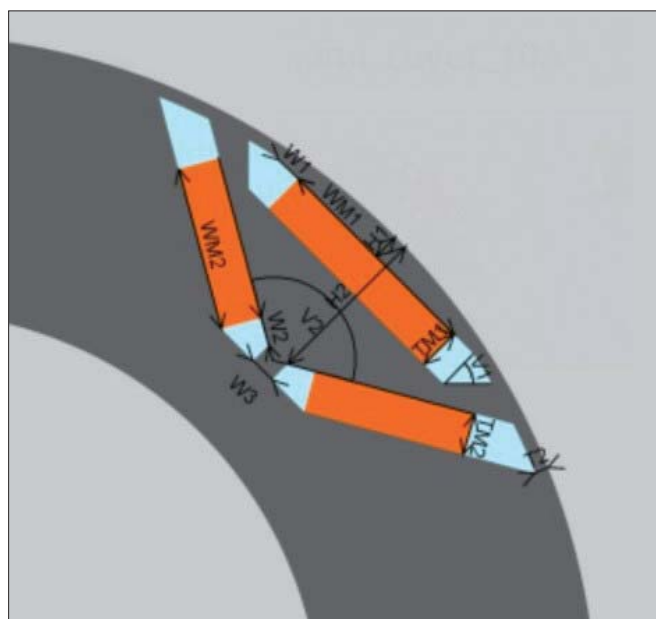


Figura 4
Parametri modificabili della geometria di rotore a “Delta”

il parametro H1 che regola la distanza del magnete centrale dal traferro per mantenere costante lo spessore dei “ponticelli” che dividono il traferro dalla barriera d’aria dove sono alloggiati i magneti ed evitare che il flusso non si concateni ade-

guatamente con l’avvolgimento. In figura 5 sono illustrate le due estreme geometrie simulate. I risultati dimostrano come un magnete più sottile e lungo produca un aumento di coppia, potenza meccanica, fattore di potenza e rendimento.

Figura 5 ▶

Due configurazioni rotoriche con diverso spessore del magnete centrale

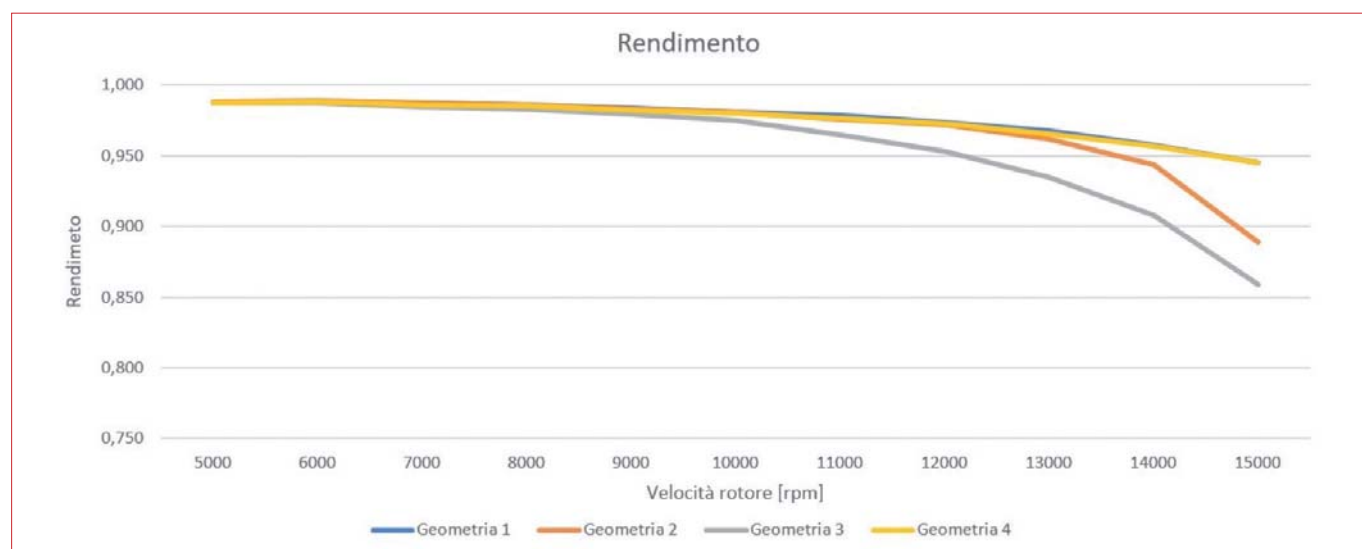
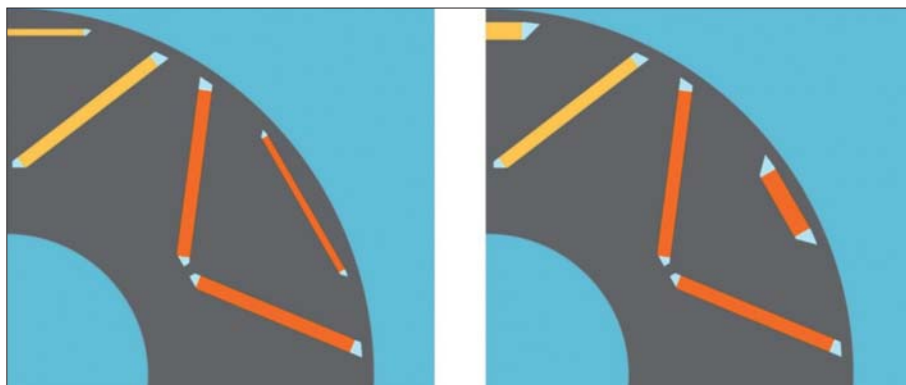


Figura 6

Rendimento in funzione della velocità di rotore per i motori a “V”

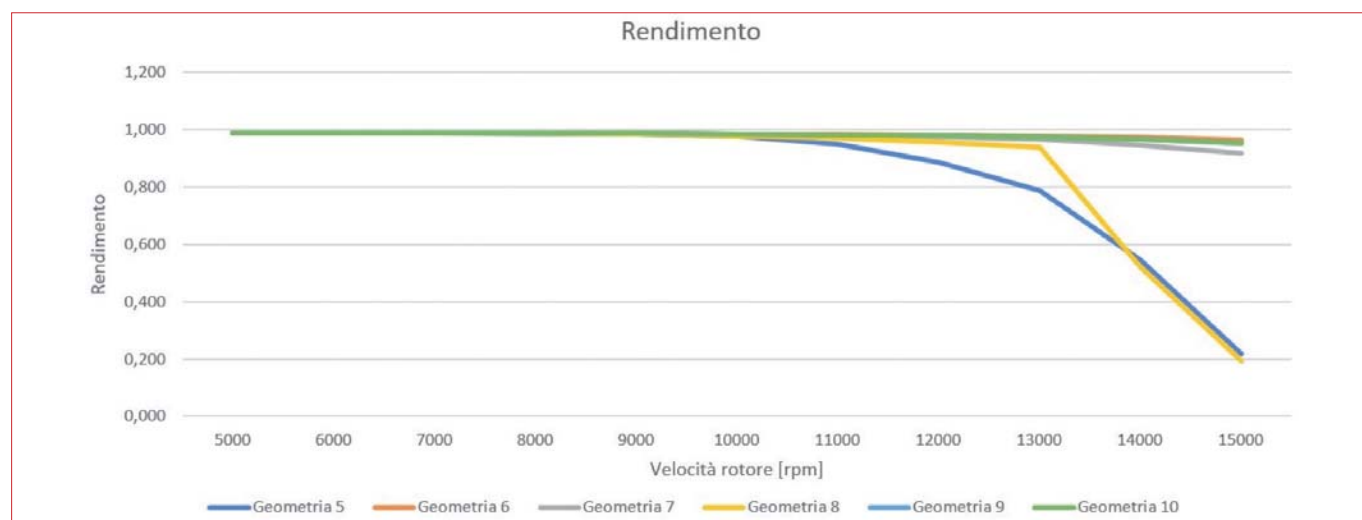


Figura 7

Rendimento in funzione della velocità di rotore per i motori a “Delta”

Analisi delle prestazioni delle diverse geometrie di rotore in regime di deflussaggio

A seguito delle analisi svolte nel punto di lavoro a velocità nominale, sono state selezionate quattro configurazioni rotoriche a “V” e sei a “Delta”.

Tali geometrie sono state simulate in diversi punti di lavoro con velocità comprese fra 5.000 giri/min e 15.000 giri/min, con un passo di 1.000 giri/min, per studiare il comportamento della macchina in regime di deflussaggio. La densità di corrente è stata mantenuta pari a 9,5 A/mm².

Le diverse configurazioni sono state confrontate in base all'andamento di coppia, tensione di linea, fattore di potenza e rendimento in funzione della velocità di rotazione del rotore. Il primo confronto è avvenuto fra i motori con configurazione a “V” e il secondo fra i motori a “Delta”. Dalla lettura di questi grafici sono state selezionate le due geometrie che offrono le migliori prestazioni: la migliore fra i rotor a “V” e la migliore fra i rotor a “Delta”. Infine, i risultati delle simulazioni relative a queste due geometrie selezionate sono stati confrontati tra loro. In figura 6, figura 7 e figura 8 sono riportati rispettivamente i confronti dei rendimenti delle configurazioni a “V”, a “Delta” e delle due migliori configurazioni “V” e “Delta”.

Modellizzazione e simulazione della geometria finale

Successivamente è stata studiata in dettaglio la geometria rotorica che ha fornito i risultati migliori in regime di deflussaggio (geometria 6) e che, di conseguenza, rappresenta la configurazione che

meglio si adatta al funzionamento di un motore sincrono a magneti permanenti interni con le caratteristiche richieste. Per svolgere uno studio più accurato, è stato utilizzato il software Flux® di Altair, che permette di implementare nel modello alcune non idealità come, ad esempio, una geometria di rotore che non trascuri la presenza di aria fra la parete della cava dove sono alloggiati i magneti permanenti e i magneti stessi.

Le geometrie delle cave dove sono alloggiati i magneti permanenti sono state leggermente modificate per assicurare un gioco d'aria di 0,15 mm per lato (Figura 9), in modo tale da permettere l'inserimento dei magneti in fase di montaggio: questo spessore di aria non è modellizzato nelle geometrie simulate in FluxMotor ma potrebbe influire

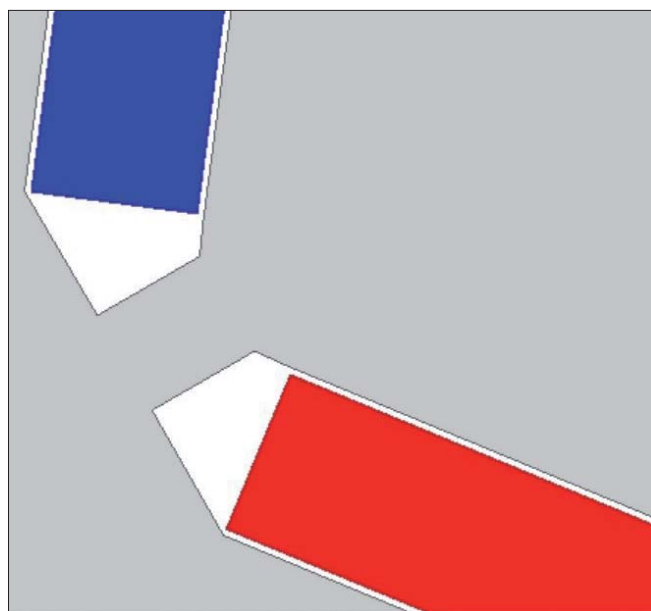


Figura 9
Gioco d'aria presente fra lamierini di rotore e magneti permanenti

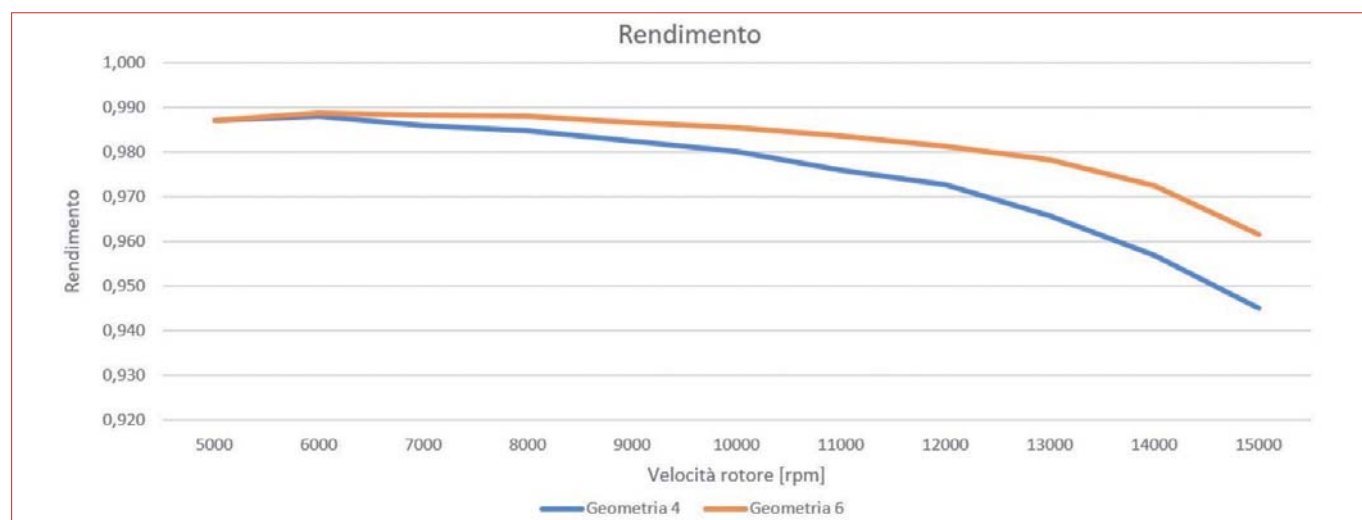


Figura 8
Rendimento in funzione della velocità di rotore per le due migliori geometrie


sensibilmente nelle prestazioni del motore. Per eseguire l'analisi agli elementi finiti, è infine stata scelta la creazione automatica da parte di Flux della maglia o *mesh* (Figura 10). Ad ogni nodo formato dai vertici dei triangoli che compongono la maglia, vengono effettuati i calcoli della simulazione. Per una maggiore accuratezza, sarebbe ottimale una maglia fitta, che eseguirebbe un numero maggiore di calcoli. Per contro, si avrebbe un costo computazionale elevato e il tempo delle simulazioni aumenterebbe. La maglia deve comunque essere più fitta in determinati punti, nei quali si ha una elevata concentrazione di energia magnetica e, nel caso dei lamierini, si rischia la saturazione. Pertanto, in prossimità dei vertici delle cave dove sono inseriti i magneti per-

manenti, dei vertici dei magneti permanenti e dei "ponticelli" tangenziali e radiali, è necessario avere una buona accuratezza delle simulazioni e infatti la maglia è più fitta rispetto alle altre zone del rotore. Infine, la maglia è più fitta al traferro, in quanto è il mezzo che trasferisce l'energia magnetica tra statore e rotore.

La simulazione nel punto di lavoro a velocità nominale ha fornito i seguenti risultati:

- Coppia media: 665,2 N×m;
- Perdite nel ferro: 1819 W;
- Perdite nei magneti: 119 W;
- Potenza elettrica in ingresso: 362,6 kW;
- Potenza meccanica in uscita: 349,5 kW;
- Rendimento: 96,9%.

Si osserva che la simulazione in Flux restituisce

Figura 10 
Illustrazione della maglia (mesh) creata automaticamente da Flux

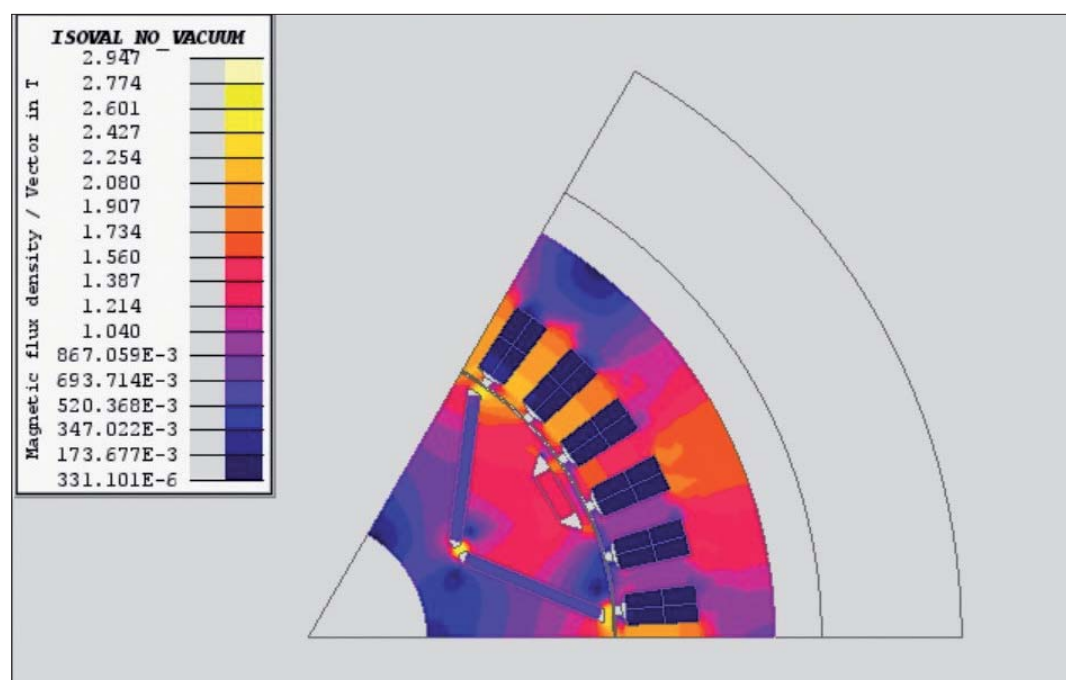
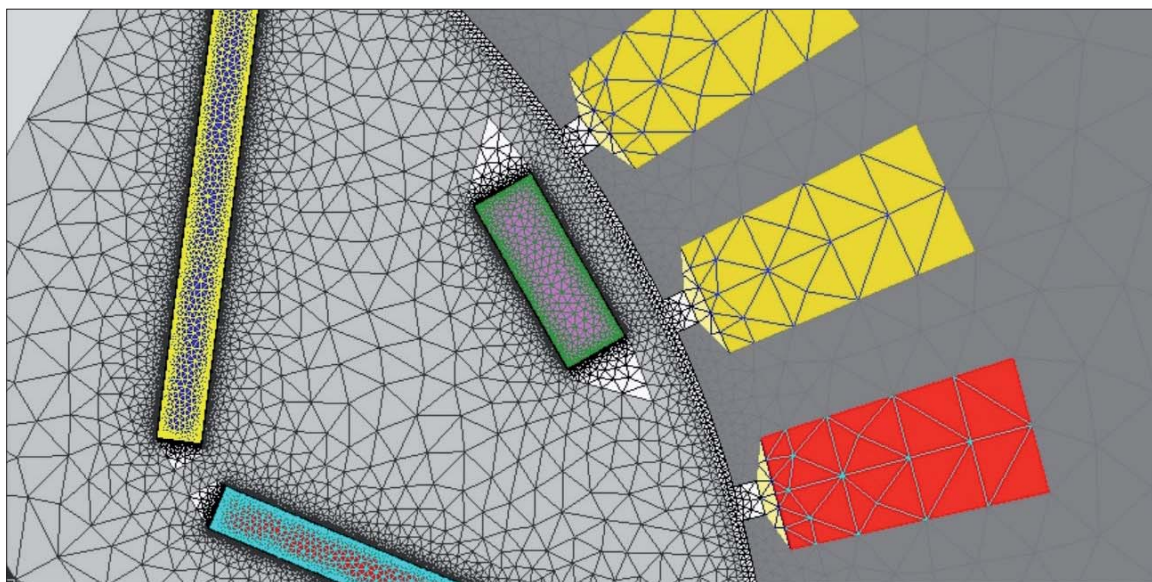


Figura 11 
Mappa di induzione magnetica del motore

un valore di coppia medio che, confrontato con il valore ottenuto in FluxMotor (688,706 N×m), risulta essere inferiore, come era logico aspettarsi, a causa dell'inserimento dello spessore d'aria fra i magneti e le cave dove sono alloggiati.

È inoltre presente un'oscillazione (*ripple*) di coppia percentuale elevata (45%), che peggiora sensibilmente le prestazioni del motore. Una possibile soluzione per ridurre questa oscillazione consiste nella tecnica dello *skewing* (inclinazione) del rotore [11,12]: tale tecnica costruttiva ridurrebbe il valore di coppia medio che potrebbe essere riportato al valore desiderato tramite un allungamento del motore.

Lo studio condotto ha portato alla luce una geometria di rotore che permette di ottenere ottime prestazioni, soprattutto in termini di coppia, fattore di potenza e rendimento. Dalla mappa di induzione in figura 11 è possibile notare la presenza di alcuni punti soggetti a saturazione concentrati in prossimità dei "ponticelli" radiali e tangenziali del rotore [13].

L'induzione magnetica nei punti di saturazione evidenziati dall'immagine potrebbe essere diminuita conducendo un ulteriore studio modificando

leggermente la forma geometrica dei ponticelli radiali e tangenziali del rotore.

Conclusioni

In questo articolo è stata illustrata una procedura per la progettazione di un motore sincro a magneti permanenti interni, utilizzando due software che permettono di analizzarne le prestazioni dal punto di vista elettromagnetico e termico, attraverso il metodo agli elementi finiti. Una prima analisi ha riguardato la scelta del numero di poli ottimale per la specifica applicazione. Successivamente sono state analizzate, nel punto di lavoro a velocità nominale, diverse geometrie di rotore con lo scopo di trovare la disposizione dei magneti che meglio si adatta alle caratteristiche richieste al motore. In seguito, sono state studiate le migliori geometrie trovate nell'analisi precedente, con riferimento al loro comportamento in regime di deflussaggio. Quest'ultimo studio ha messo in evidenza la geometria migliore che, successivamente, è stata modellizzata ed analizzata con maggiore dettaglio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Villani: High performance electrical motors for automotive applications - Status and future of motors with low cost permanent magnets, *WMM 2018 International Conference on Magnetism and Metallurgy*.
- [2] A.M. El-Refai: Motors/generators for traction/propulsion applications: A review, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, n. 1, marzo 2013.
- [3] D.G. Dorrell, A.M. Knight, M. Popescu, L. Evans, D.A. Staton: Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles, *ECCE*, 2010.
- [4] L. Mantione: Progettazione di motori sincroni a riluttanza mirata al miglioramento del rendimento e del fattore di potenza, *Tesi di laurea magistrale, Università di Pavia*, 2020.
- [5] J.R. Hendershot Jr., T.J.E. Miller: *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Clarendon Press, 1st edition, 15 giugno 1995.
- [6] M.H. Hwang, J.H. Han, D.H. Kim, H.R. Cha: Design and analysis of rotor shapes for IPM motors in EV power traction platforms, *Energies*, 11, 2018, p. 2601.
- [7] T. Husain, S.T. Lee: Design considerations for magnet configurations in IPM rotor for high speed traction applications, *ECCE*, 2019.
- [8] A. Wang, Y. Jia, W.L. Soong: Comparison of five topologies for an interior permanent-magnet machine for a hybrid electric vehicle, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, n. 10, ottobre 2011, pp. 3606-3609.
- [9] S. Zhu, W. Chen, M. Xie, C. Liu, K. Wang: Electromagnetic performance comparison of multi-layered interior permanent magnet machines for EV traction applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, n. 11, novembre 2018, pp. 1-5.
- [10] Y. Yang *et al.*: Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, n. 1, marzo 2017, pp. 86-97.
- [11] W. Fel, Z.Q. Zhu: Comparison of cogging torque reduction in permanent magnet brushless machines by conventional and herringbone skewing techniques, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, settembre 2013, pp. 664-674.
- [12] L. Mantione, L. Frosini, M. Minervini: Evaluation of different magnet materials and skewed geometries for IPMSM at high speed, *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Valencia, Spain, 2022, pp. 2297-2303.
- [13] T. Emanuelli: Progettazione elettromagnetica e termica di un motore sincro a magneti permanenti interni per banco prova ad elevata velocità, *Tesi di laurea magistrale, Università di Pavia*, 2022.