



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	102015000011758
Data Deposito	14/04/2015
Data Pubblicazione	14/10/2016

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	02	K		

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	02	K		

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	02	K		

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	02	K		

Titolo

METODO DI REALIZZAZIONE DI UNA STRUTTURA DI ROTORE DI UNA MACCHINA ELETTRICA SINCRONA A RILUTTANZA, E RELATIVA MACCHINA ELETTRICA SINCRONA A RILUTTANZA

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"METODO DI REALIZZAZIONE DI UNA STRUTTURA DI ROTORE DI UNA
MACCHINA ELETTRICA SINCRONA A RILUTTANZA, E RELATIVA
MACCHINA ELETTRICA SINCRONA A RILUTTANZA"

di GE AVIO S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA I MAGGIO 99

RIVALTA DI TORINO (TO)

Inventori: RONCHETTO Davide, CIPRIANI Marco

La presente invenzione è relativa ad un metodo di realizzazione di una struttura di rotore di una macchina elettrica sincrona a riluttanza, e ad una corrispondente macchina elettrica sincrona a riluttanza.

Sono noti dispositivi elettromagnetici, o macchine elettriche, del tipo a riluttanza (cosiddette "switched or synchronous reluctance machine"), che presentano strutture rotoriche anisotrope, costituite dall'alternanza di porzioni magnetiche e di porzioni di materiale amagnetico.

Le porzioni di materiale amagnetico costituiscono delle barriere di flusso elettromagnetico e possono essere costituite anche da vuoti (in tal caso, l'aria costituendo il materiale amagnetico), di forma e dimensione opportuna all'interno delle strutture rotoriche; le porzioni

magnetiche, aventi elevata permeabilità magnetica, costituiscono i poli magnetici della struttura di rotore.

Esempi di macchine elettriche a riluttanza sono descritti nel documento US 5,818,140, che discute alcune regole generali per la realizzazione di una macchina elettrica con ridotte ondulazioni di coppia, in particolare per quanto riguarda il numero e la disposizione delle barriere di flusso nella struttura di rotore, e nei documenti WO 2012/000561 A1, WO 2012/000544 A1, WO 2011/154045 A1, US 6,239,526 e US 6,769,167, che descrivono possibili realizzazioni alternative, basate in ogni caso sulla struttura descritta in generale nel suddetto documento US 5,818,140.

A titolo di esempio, la figura 1 mostra una sezione di una macchina elettrica sincrona a riluttanza, di tipo noto, in particolare realizzata secondo gli insegnamenti contenuti nel documento US 5,818,140, ed indicata nel suo complesso con 1.

La macchina elettrica 1 comprende una struttura di rotore 2, avente simmetria radiale intorno ad un asse di estensione longitudinale A (tipicamente, la struttura di rotore 2 è costituita da una pluralità di dischi, uno dei quali è mostrato in figura 1, impilati lungo l'asse longitudinale L); ed una struttura di statore 3, disposta in posizione radialmente esterna rispetto alla struttura di

rotore 2, e magneticamente accoppiata alla stessa struttura di rotore 2.

La struttura di statore 3 comprende una pluralità di espansioni polari 4a (cosiddetti "denti"), intorno alle quali sono avvolte rispettive bobine (o avvolgimenti), non illustrate in figura 1, atte a generare il campo magnetico, e collegabili elettricamente a sorgenti di alimentazione elettrica (non illustrate), quando la macchina elettrica 1 opera da motore elettrico trasformando energia elettrica in energia meccanica, o ad utilizzatori, o carichi elettrici, quando la macchina elettrica 1 opera da generatore trasformando energia meccanica in energia elettrica. Tra le espansioni polari 4a sono presenti aperture di statore 4b, cosiddette "cave di statore".

La struttura di rotore 2 è dotata di un foro centrale 5 avente centro O, destinato ad essere impegnato da un albero di rotazione (qui non illustrato), e presenta una conformazione anulare intorno allo stesso foro centrale 4.

La struttura di rotore 2 presenta in particolare una pluralità di porzioni magnetiche 6, costituite di un opportuno materiale ferromagnetico, ed una pluralità di barriere di flusso 8, interposte tra, e che separano tra loro, le porzioni magnetiche 6.

Le barriere di flusso 8 possono ad esempio essere realizzate per asportazione di materiale, mediante taglio,

ad esempio laser, o per trattamenti termici localizzati, e comprendere regioni vuote; in alternativa, le barriere di flusso 8 possono essere costituite di un opportuno materiale non ferromagnetico.

Le barriere di flusso 8 sono configurate per generare anisotropia nella struttura di rotore 2, in modo da definire percorsi di minima riluttanza (i cosiddetti "assi d") e percorsi di massima riluttanza (i cosiddetti "assi q"), per i poli della stessa struttura di rotore 2 (in numero pari a quattro nell'esempio mostrato in figura 1).

In particolare, ciascun polo comprende un certo numero (tipicamente, da tre a cinque) di porzioni magnetiche 6 e di interposte barriere di flusso 8, aventi forma corrispondente. Un asse di simmetria radiale di ciascun polo coincide con l'asse q di massima riluttanza.

Considerando una coppia di assi ortogonali d-q, in modo tale che l'asse d coincida con una direzione di minima riluttanza e l'asse q coincida con una regione di massima riluttanza della struttura di rotore 2, si definisce come "rapporto di anisotropia" il valore L_d/L_q , dove L_d e L_q indicano il valore di induttanza lungo le due direzioni.

È proprio questa anisotropia all'interno della struttura di rotore 2 che permette alla macchina elettrica 1 (operante da motore o generatore) la produzione di coppia elettromagnetica, il cui valore è tanto maggiore quanto più

elevato è il rapporto di anisotropia L_d/L_q .

In particolare, in funzionamento da motore elettrico, l'applicazione di opportune correnti di eccitazione alle bobine della struttura di statore 3 origina un movimento della struttura di rotore 2 per allineare la direzione di massima permeabilità magnetica (ovvero l'asse d) con la direzione del risultante flusso magnetico statorico. Tale movimento risulta in una rotazione complessiva della struttura di rotore 2 della macchina elettrica 1, intorno all'asse di rotazione. Analogamente, durante il funzionamento da generatore della macchina elettrica 1, una rotazione della struttura di rotore 2 provoca una variazione del flusso magnetico statorico e la generazione di una risultante corrente elettrica nelle relative bobine.

Come descritto in dettaglio nel suddetto documento US 5,818,140 (a cui si rimanda per ulteriori dettagli), al fine di ottenere le desiderate prestazioni elettromagnetiche, il numero di barriere di flusso 8 (che definiscono le "cave equivalenti di rotore") è scelto opportunamente in funzione del numero di espansioni polari 4 della struttura di rotore 3 (che definiscono le "cave di statore"). In particolare, alle estremità delle barriere di flusso 8 si definiscono cave reali della struttura di rotore 2, indicate con dei cerchi nella figura 1, distanziate di un passo di rotore p_r ; replicando in maniera

angolarmente uniforme tale passo di rotore p_r intorno all'asse centrale, si identificano inoltre sulla circonferenza della struttura di rotore 2 le cosiddette cave virtuali della stessa struttura di rotore 2, indicate con delle x.

In particolare, si richiede preferibilmente che il numero complessivo di cave equivalenti di rotore, reali e virtuali, n_r , per ciascuna coppia di poli magnetici della struttura di rotore 2, soddisfi la seguente relazione con il numero n_s di cave di statore: $n_s - n_r = \pm 4$.

Dal soddisfacimento di tale relazione, discende la disposizione delle barriere di flusso 8 all'interno della struttura di rotore 2.

In particolare, nella forma di realizzazione illustrata in figura 1, le barriere di flusso 8 presentano (nella sezione illustrata, trasversale all'asse longitudinale L) conformazione a semi-ellissi concentriche, simmetriche intorno all'asse q e ad asse crescente, dalla superficie esterna alla superficie interna della struttura di rotore 2, con l'asse maggiore di ciascuna ellisse che congiunge una coppia di cave reali di rotore. In generale, le barriere di flusso 8 presentano conformazione regolare, convessa rispetto al centro O del foro centrale 5 della struttura di rotore 2.

La struttura di rotore 2 comprende inoltre una

pluralità di elementi di collegamento meccanico, nel seguito semplicemente definiti come "ponti", atti ad accoppiare tra loro porzioni magnetiche 6 radialmente adiacenti, al fine di ottenere una adeguata tenuta meccanica per la struttura di rotore 2, in particolare nei confronti della forza centrifuga dovuta alla rotazione.

In dettaglio, sono presenti ponti circonfenziali 10, in corrispondenza delle estremità delle barriere di flusso 8 e della superficie laterale esterna della struttura di rotore 2 (ovvero, in prossimità del traferro nell'accoppiamento magnetico tra la struttura di statore 3 e la struttura di rotore 2); ed inoltre ponti radiali 12, che attraversano le barriere di flusso 8.

In particolare, come mostrato nella figura 1, può essere previsto un ponte radiale 12 per ciascuna barriera di flusso 8, o, come illustrato nella forma di realizzazione di figura 2 (anch'essa di tipo noto), possono essere previsti due (o più) ponti radiali 12 per ciascuna barriera di flusso 8, al fine di incrementare la tenuta meccanica.

I ponti radiali 12 possono inoltre essere utilizzati per alloggiare dei magneti all'interno della struttura di rotore 2.

La presente Richiedente ha constatato che, dal punto di vista della tenuta meccanica, aumentare lo spessore dei

ponti circonfenziali 10 e/o dei ponti radiali 12, consente di ottenere una riduzione globale della sollecitazione massima a cui la struttura di rotore 2 è sottoposta.

Tuttavia, l'aumento dello spessore degli stessi ponti circonfenziali 10 e/o radiali 12 provoca una riduzione delle prestazioni elettromagnetiche della macchina elettrica 1, in particolare una riduzione di potenza meccanica prodotta a parità di potenza elettrica immessa nella macchina elettrica (oppure, se il funzionamento è da generatore, una riduzione di potenza elettrica generata, a parità di potenza meccanica assorbita).

La presente Richiedente ha constatato che, a parità di prestazioni elettromagnetiche, le soluzioni note per le macchine elettriche sincrone a riluttanza non consentono di ottimizzare le caratteristiche di tenuta o resistenza meccanica.

Scopo della presente invenzione è pertanto quello di fornire una soluzione perfezionata di macchina elettrica, che consenta di risolvere gli inconvenienti precedentemente discussi.

Secondo la presente invenzione vengono dunque forniti un metodo di realizzazione di una struttura di rotore di una macchina elettrica sincrona a riluttanza ed una relativa struttura di rotore di una macchina elettrica

sincrona a riluttanza, come definiti nelle rivendicazioni allegate.

Per una migliore comprensione della presente invenzione, ne vengono ora descritte forme di realizzazione preferite, a puro titolo di esempio non limitativo e con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 è una vista schematica in sezione di una macchina elettrica sincrona a riluttanza di tipo noto;

- la figura 2 è una vista schematica in sezione di una variante della macchina elettrica sincrona a riluttanza di tipo noto di figura 1;

- la figura 3a è una vista schematica in sezione di una macchina elettrica sincrona a riluttanza secondo una forma di realizzazione della presente soluzione;

- le figure 3b, 4a e 4b sono relative ad una porzione ingrandita di una struttura di rotore della macchina elettrica, in accordo con differenti forme di realizzazione della presente soluzione;

- le figure 5-6 sono viste schematiche in sezione di una macchina elettrica sincrona a riluttanza, in accordo con differenti forme di realizzazione della presente soluzione;

- la figura 7 è una vista prospettica della macchina elettrica di figura 6; e

- la figura 8 è una vista schematica in sezione di una

macchina elettrica sincrona a riluttanza secondo ancora una ulteriore forma di realizzazione della presente soluzione.

Come sarà descritto in dettaglio in seguito, la presente Richiedete, mediante estensive prove sperimentali e simulazioni, ha individuato una metodologia di ottimizzazione congiunta delle caratteristiche elettromagnetiche e di tenuta o resistenza meccanica di una struttura di rotore di una macchina elettrica sincrona a riluttanza, che prevede una opportuna modifica della disposizione delle barriere di flusso e/o dei ponti di collegamento meccanico della stessa struttura di rotore; tale modifica consente di migliorare la tenuta strutturale della macchina elettrica, senza inficiarne le prestazioni elettromagnetiche.

La figura 3a mostra una macchina elettrica, indicata in generale con 20, realizzata secondo una forma di realizzazione della presente soluzione.

La figura 3b mostra in dettaglio una porzione della struttura di rotore 22 della macchina elettrica 20, avente nell'esempio quattro poli, in particolare una porzione riferita ad un singolo polo della stessa macchina elettrica 20, compresa tra due assi d tra loro ortogonali, un primo asse d supposto orizzontale, ed un secondo asse d supposto verticale, con l'asse q disposto a 45° rispetto agli stessi assi d orizzontale e verticale.

In particolare, nella figura 3b viene mostrata con linea tratteggiata una configurazione nota della struttura di rotore (ad esempio del tipo discusso con riferimento alla suddetta figura 1), con le barriere di flusso, indicate nuovamente con 8, ed i relativi ponti radiali, indicati nuovamente con 12; mentre con linea continua viene mostrata la geometria delle barriere di flusso 8' (interposte alle porzioni magnetiche 6') e dei ponti radiali 12' realizzata secondo una forma di realizzazione della presente soluzione.

Al fine di descrivere le caratteristiche che contraddistinguono la presente soluzione, si definisce in primo luogo il profilo delle barriere di flusso 8, 8', individuando le relative linee di mezzeria A, A' per ciascuna barriera di flusso 8, 8', senza considerare la presenza dei ponti radiali 12, 12'. Tali profili di barriera A, A' possono essere tracciati congiungendo i centri delle infinite circonferenze tangenti ai bordi superiore ed inferiore delle barriere di flusso 8, 8' (tali bordi superiore ed inferiore risultano dunque sostanzialmente equidistanti rispetto al profilo di barriera A, A').

Come è possibile osservare in figura 3b, la geometria delle barriere di flusso 8' secondo la soluzione proposta rispetta la posizione angolare delle cave equivalenti di

rotore, sia di quelle reali e che di quelle virtuali; in altre parole, i profili di barriera A' delle barriere di flusso 8' partono e terminano, così come i profili di barriera A di tipo noto, in corrispondenza di una rispettiva coppia di cave equivalenti di rotore, qui indicate con 24.

Come evidenziato nella stessa figura 3b, la soluzione di ottimizzazione proposta prevede una traslazione in direzione radiale esterna, in particolare lungo l'asse q, dei profili di barriera A' delle barriere di flusso 8' (e, di conseguenza, delle stesse barriere di flusso 8'), supposti fissi gli estremi, coincidenti con la posizione prefissata delle relative cave equivalenti di rotore 24.

In dettaglio, si individuino le intersezioni dei profili A, A' delle barriere di flusso 8, 8' con l'asse q, indicate con 25.

La posizione ottimizzata delle barriere di flusso 8' si ottiene traslando le suddette intersezioni 25 in direzione radiale, lungo l'asse q e verso la superficie esterna della struttura di rotore 22, di una prima quantità di traslazione d_1 , ottenendo in tal modo la posizione delle intersezioni, indicate con 25', dei profili A' delle stesse barriere di flusso 8'.

Al fine di mantenere sostanzialmente inalterata la sezione di passaggio nel materiale ferromagnetico, è

conveniente traslare tutte le barriere di flusso 8 della stessa prima quantità di traslazione d_1 (come illustrato nella figura 3b); tuttavia, non si esclude il caso in cui ogni barriera di flusso 8 sia traslata di una quantità diversa rispetto alle altre.

In ogni caso, il limite teorico di traslazione (dunque il valore massimo della quantità di traslazione d_1) è raggiunto quando il bordo superiore della barriera di flusso 8' radialmente più esterna raggiunge la superficie esterna, indicata con S, della struttura di rotore 22; il valore massimo della quantità di traslazione d_1 è dunque funzione della distanza tra il suddetto bordo superiore della barriera di flusso 8' radialmente più esterna e la superficie esterna S della struttura di rotore 22.

La soluzione di ottimizzazione proposta prevede inoltre, in aggiunta o in alternativa alla suddetta traslazione dei profili A delle barriere di flusso 8, una opportuna roto-traslazione della posizione dei ponti radiali 12.

In dettaglio, si individuino le bisettrici B dei ponti radiali 12 e i rispettivi punti di mezzzeria 26, definiti come intersezioni delle stesse bisettrici B con i profili di barriera A delle relative barriere di flusso 8; la bisettrice B può essere definita come una retta parallela ai bordi laterali, o fianchi, del ponte radiale 12 passante

per il centro del ponte radiale 12 stesso.

La posizione ottimizzata dei ponti radiali 12' si ottiene effettuando una roto-traslazione dei ponti radiali 12 con riferimento sui punti di mezzeria 26; in particolare, la posizione delle bisettrici B' dei ponti radiali 12' è determinata da una traslazione del punto di mezzeria 26 lungo il profilo A' della barriera di flusso 8', ed inoltre di una rotazione della bisettrice B di un angolo α rispetto all'asse q.

Il valore di roto-traslazione, come anche il raggio di raccordo r dei punti di mezzeria 26, 26' dei ponti radiali 12, 12', può essere determinato sulla base di un'ottimizzazione strutturale agli elementi finiti che minimizzi lo stress all'interno della struttura di rotore 22.

In una possibile forma di realizzazione, che fa riferimento ad una struttura di rotore 22 del tipo mostrato in figura 3b, avente un numero di poli pari a quattro, la traslazione delle barriere di flusso 8, 8' può essere espressa in valore relativo rispetto al raggio massimo della struttura di rotore 22 (indicato con R in figura 3b), con la prima quantità di traslazione d_1 variabile tra il 2% ed il 10% del raggio R.

Il valore della prima quantità di traslazione d_1 può alternativamente essere espresso come rapporto della

traslazione effettiva sulla traslazione massima eseguibile (funzione della suddetta distanza tra il bordo superiore della barriera di flusso 8' radialmente più esterna e la superficie esterna S della struttura di rotore 22); in tal caso, la prima quantità di traslazione d_1 è variabile tra il 30% ed il 100% (quest'ultimo, indicando il caso limite in cui la barriera di flusso 8' raggiunge la superficie esterna S e dunque il traferro).

La traslazione dei ponti radiali 12 lungo il profilo A' della barriera di flusso 8' può essere espressa mediante una seconda quantità di traslazione d_2 , in relazione alla semi-lunghezza dello stesso profilo A', ovvero in funzione della distanza tra la relativa intersezione 25' e la posizione della relativa cava di rotore 24; la seconda quantità di traslazione d_2 , misurata lungo il profilo di barriera A' tra l'intersezione 25' ed il punto di mezzeria 26', è variabile tra il 30% ed il 55% di tale semi-lunghezza.

Inoltre, l'angolo α di rotazione della bisettrice B' del ponte radiale 12' rispetto all'asse q è compreso tra 0° e 45° .

Le operazioni di ottimizzazione precedentemente descritte comportano alcune caratteristiche peculiari, immediatamente rilevabili e caratterizzanti, nella configurazione risultante della struttura di rotore 22, in

particolare per quanto riguarda la configurazione delle barriere di flusso 8' e/o dei ponti radiali 12'.

Si faccia riferimento dapprima alla figura 4a, che mostra una porzione della struttura di rotore 22 compresa fra un solo asse d e un solo asse q, con asse d posto in orizzontale e asse q ruotato in senso antiorario rispetto all'asse d.

Si traccino, per ciascuna semibarriera all'interno della porzione individuata, delle rette di riferimento R_1 perpendicolari all'asse q, con origine in corrispondenza dell'intersezione 25 tra il profilo A' della barriera di flusso 8' e l'asse q (come discusso in precedenza, il profilo A' della semibarriera può essere ottenuto congiungendo i centri delle circonferenze ideali tangenti i bordi superiore ed inferiore della semibarriera stessa).

Si traccino quindi, per ciascuna barriera di flusso 8', delle rette R_2 congiungenti i punti P che costituiscono il profilo A' con l'intersezione 25 tra lo stesso profilo A' e l'asse q.

Si definisca β l'angolo formato tra le rette R_2 e le rette di riferimento R_1 , considerando positivo lo stesso angolo β , come indicato dalle frecce di figura 4a, in senso orario con centri nei punti di intersezione 25.

La configurazione della struttura di rotore 22 è contraddistinta dal fatto che per uno o più dei punti P, il

suddetto angolo β risulta maggiore di 0° .

Al contrario, risulta agevole dimostrare che, nelle soluzioni note (ad esempio la soluzione mostrata in figura 1), per uno o più dei punti P (definiti nella stessa maniera) l'angolo β risulta essere $\leq 0^\circ$.

Da quanto illustrato, risulta inoltre che il profilo di barriera A' delle barriere di flusso 8' presenta porzioni laterali, che terminano in corrispondenza della superficie esterna S della struttura di rotore 22 e delle cave equivalenti di rotore 24; ed una porzione centrale, che attraversa l'asse q. Le porzioni laterali presentano conformazione convessa rispetto al centro O dell'apertura centrale 5, mentre la porzione centrale presenta, a differenza delle strutture note, una conformazione che è strettamente concava rispetto allo stesso centro O.

Tale caratteristica discende infatti dalla traslazione verso l'esterno delle barriere di flusso 8'. In particolare, per ciascuna barriera di flusso 8', la quantità di traslazione d_1 può dunque essere analogamente riferita ad una direzione ortogonale all'asse q (in figura 4a definita con T), passante sostanzialmente per gli estremi laterali della porzione centrale del corrispondente profilo di barriera A'.

Facendo ora riferimento alla figura 4b, nella stessa porzione della struttura di rotore 22 precedentemente

individuata, si tracci, per ciascun ponte radiale 12', la relativa bisettrice B', che incontra il profilo A' in corrispondenza del punto di mezzeria 26'.

Si traccino inoltre, per ciascun ponte radiale 12', delle rette di riferimento R_3 parallele all'asse q e passanti per il corrispondente punto di mezzeria 26'.

Si definisca γ l'angolo formato tra le rette R_3 e le bisettrici B', considerando positivo lo stesso angolo γ , come indicato dalle frecce di figura 4b, in senso antiorario con centri nei punti di mezzeria 26'.

La configurazione della struttura di rotore 22 è contraddistinta dal fatto che per uno o più dei ponti radiali 12', il suddetto angolo γ risulta maggiore di 0° .

Al contrario, risulta agevole dimostrare che, nelle soluzioni note (ad esempio la soluzione mostrata in figura 1), per tutti i ponti radiali 12 l'angolo γ risulta essere $\leq 0^\circ$.

In altre parole, i ponti radiali 12' risultano convergere rispetto all'asse di massima riluttanza q nella direzione della superficie laterale esterna S della struttura di rotore 22.

Si sottolinea inoltre nuovamente che la struttura di rotore 22 secondo la presente soluzione può presentare anche una sola delle caratteristiche discusse, per quanto riguarda il posizionamento delle barriere di flusso 8' o

dei ponti radiali 12', o, vantaggiosamente, entrambe le caratteristiche in maniera congiunta.

La Figura 5 mostra una ulteriore forma di realizzazione della struttura di rotore 22, che implementa il metodo di ottimizzazione precedentemente descritto, in cui le barriere di flusso 8' sono ulteriormente traslate verso la superficie esterna S della struttura di rotore 22 (ovvero, verso il traferro della macchina elettrica 20); in altre parole, la prima quantità di traslazione d_1 è in questo caso maggiore rispetto alla soluzione mostrata nelle figure 3a e 3b.

La Figura 6 evidenzia un'ulteriore forma di realizzazione della macchina elettrica 20, in cui la struttura di rotore 22 risulta dal metodo di ottimizzazione precedentemente descritto, in particolare per quanto riguarda la variazione della geometria delle barriere di flusso 8'.

La figura 7 mostra una rappresentazione prospettica tridimensionale, che mostra come la struttura di rotore 22 sia, in questa forma di realizzazione, costituita da una pluralità di dischi impilati, indicati con 30, disposti lungo l'asse longitudinale L, ciascuno avente le caratteristiche precedentemente descritte in dettaglio.

In alternativa, si evidenzia in ogni caso che la struttura di rotore 22 può essere costituita da materiali

ferromagnetici compositi (sinterizzati) in un blocco unico.

La Figura 8 mostra ancora una ulteriore forma di realizzazione della struttura di rotore 22 della macchina elettrica 20, avente in questo caso un numero maggiore di barriere di flusso 8', nell'esempio pari a quattro.

I vantaggi della soluzione descritta emergono in maniera evidente dalla discussione precedente.

In particolare, si evidenzia nuovamente che la struttura di rotore 22 risulta congiuntamente ottimizzata sia per quanto riguarda le caratteristiche elettromagnetiche, sia per quanto riguarda le caratteristiche di tenuta o resistenza meccanica, consentendo ad esempio di aumentare la resistenza agli sforzi centrifughi.

La soluzione descritta risulta quindi particolarmente vantaggiosa nel caso in cui si debba progettare una macchina elettrica 20, cui sia richiesto di lavorare ad alta velocità di rotazione e/o ad elevata potenza.

Test e simulazioni svolte dalla Richiedente hanno verificato la possibilità di incrementare la velocità di rotazione della macchina elettrica 20 dal 20% al 30% rispetto a soluzioni tradizionali, senza compromettere la resistenza, in particolare agli sforzi centrifughi.

In altri termini ancora, rispetto a soluzioni note, lo spessore dei ponti radiali 12' e/o dei ponti

circonferenziali 10' (a chiusura delle cave equivalenti di rotore), può essere ridotto senza superare i limiti di tensione meccanica ammissibile (a parità di velocità di rotazione della macchina elettrica 20) a beneficio delle prestazioni elettromagnetiche.

Risulta infine chiaro che a quanto qui descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito di protezione della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, si sottolinea nuovamente che il numero di ponti radiali 12' può variare rispetto a quanto illustrato a titolo esemplificativo, così come anche il numero e la forma geometrica delle barriere di flusso 8'. Ad esempio, ai fini dell'applicabilità del metodo proposto, i ponti radiali 12' delle barriere di flusso 8' possono essere presenti, non essere presenti, o essere presenti in numero differente.

In maniera di per sé nota, i ponti radiali circonferenziali 10' e radiali 12' possono essere ricavati dallo stesso materiale ferromagnetico che costituisce la struttura di rotore 22, oppure possono essere realizzati a partire dallo stesso materiale ferromagnetico con trattamento localizzato (ad esempio tramite laser) in modo da aumentarne le proprietà meccaniche (snervamento) e ridurre le proprietà ferromagnetiche. Inoltre, i ponti circonferenziali 10' e radiali 12' possono essere

realizzati in materiale diverso dal materiale ferromagnetico costituente il corpo principale della struttura di rotore 22 e ancorati al corpo principale stesso con metodi opportuni.

All'interno delle barriere di flusso 8' possono inoltre essere inseriti dei magneti, in maniera analoga a quanto implementato in soluzioni note.

Una ulteriore variante può inoltre prevedere, così come descritto nel documento W0 2011/018119 A1, che la struttura di rotore 22 sia realizzata mediante segmenti di materiale ferromagnetico, opportunamente distanziati e fissati tra loro, attraverso mezzi di fissaggio e distanziatori di varia natura, i vuoti tra i vari segmenti così disposti creando in tal caso le barriere di flusso 8'.

Le geometrie a riluttanza possono inoltre essere convenientemente ricavate sfruttando materiali bifasici (ad esempio come descritto in US 2008/0296994 A1) ed in quest'ultimo caso risultare particolarmente compatte, resistenti e affidabili.

Si evidenzia infine che la macchina elettrica 20 può vantaggiosamente essere configurata per essere accoppiata in maniera integrata ad una macchina fluidodinamica.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo di realizzazione di una struttura di rotore (22) di una macchina elettrica sincrona a riluttanza (20), in cui la struttura di rotore (22) presenta una conformazione anulare intorno ad un'apertura centrale (5) destinata ad essere impegnata da un albero di rotazione, e comprende una pluralità di porzioni magnetiche (6') ed una pluralità di barriere di flusso elettromagnetico (8') interposte alle porzioni magnetiche (6'), dette barriere di flusso elettromagnetico (8') definendo almeno un percorso a massima riluttanza magnetica lungo un asse di massima riluttanza (q) ed un percorso a minima riluttanza lungo un asse di minima riluttanza (d),

comprendente la fase di definire la disposizione di dette barriere di flusso elettromagnetico (8') in modo tale da ottimizzare congiuntamente prestazioni elettromagnetiche di detta macchina elettrica sincrona a riluttanza (20) e caratteristiche di tenuta meccanica, in particolare a sforzi centrifughi dovuti alla rotazione intorno a detto albero di rotazione.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, in cui la struttura di rotore (22) comprende inoltre elementi radiali di connessione (12'), per la connessione meccanica tra porzioni magnetiche (6') radialmente adiacenti, ed in cui la fase di definire comprende inoltre definire la

disposizione di detti elementi radiali di connessione (12') in modo tale da ottimizzare congiuntamente dette prestazioni elettromagnetiche di detta macchina elettrica sincrona a riluttanza (20) e dette caratteristiche di tenuta meccanica.

3. Metodo secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detta fase di definire comprende eseguire una traslazione di dette barriere di flusso elettromagnetico (8') verso una superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22).

4. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta fase di definire comprende progettare dette barriere di flusso elettromagnetico (8') in modo tale che presentino un profilo di mezzeria (A'), disposto tra un relativo bordo superiore ed inferiore, avente porzioni laterali disposte in corrispondenza di una superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22), ed una porzione centrale, che attraversa detto asse di massima riluttanza (q); detta porzione centrale avendo una conformazione strettamente concava rispetto al centro (O) di detta apertura centrale (5).

5. Metodo secondo la rivendicazione 4, in cui dette porzioni laterali presentano una conformazione convessa rispetto al centro (O) di detta apertura centrale (5); ed in cui i profili di mezzeria (A') delle barriere di flusso

elettromagnetico (8') definiscono un passo costante (p_r) di aperture equivalenti di rotore (24), in corrispondenza di detta superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22), dette aperture equivalenti di rotore (24) essendo atte ad accoppiarsi magneticamente con corrispondenti aperture di statore di detta macchina elettrica (20).

6. Metodo secondo la rivendicazione 4 o 5, in cui detta fase di definire comprende inoltre progettare ciascuna barriera di flusso elettromagnetico (8') in modo tale che: definita una retta di riferimento (R_1) perpendicolare all'asse di massima riluttanza (q), con origine in corrispondenza dell'intersezione (25') tra il profilo di mezzzeria (A') di detta barriera di flusso (8') e l'asse di massima riluttanza (q); definite delle rette (R_2) congiungenti i punti (P) che costituiscono il profilo di mezzzeria (A') di detta barriera di flusso (8') con detta intersezione (25'); definito l'angolo (β) formato tra dette rette (R_2) e la retta di riferimento (R_1), e considerando positivo detto angolo (β) in senso orario con centro nei punti di intersezione (25'), per uno o più di detti punti (P) il rispettivo angolo (β) è maggiore di 0° .

7. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-6, in cui detta fase di definire comprende inoltre progettare ciascuna barriera di flusso elettromagnetico

(8') in modo tale che: la porzione centrale di detto profilo di mezzeria (A') presenta estremi laterali ed è traslata di una prima quantità di traslazione (d_1) lungo l'asse di massima riluttanza (q) rispetto ad una retta ortogonale (T), perpendicolare a detto asse di massima riluttanza (q) e passante per detti estremi laterali.

8. Metodo secondo la rivendicazione 7, in cui la prima quantità di traslazione (d_1) tra detta porzione centrale e detta retta ortogonale (T), in corrispondenza di detto asse di massima riluttanza (q), è compresa tra il 2% ed il 10% del raggio (R) di detta struttura di rotore (22) riferito al centro (O) di detta apertura centrale (5).

9. Metodo secondo la rivendicazione 7 o 8, in cui la prima quantità di traslazione (d_1) tra detta porzione centrale e detta retta ortogonale (T), in corrispondenza di detto asse di massima riluttanza (q) è compresa tra il 30% ed il 100% di una distanza tra il bordo superiore della barriera di flusso elettromagnetico (8') radialmente più esterna e la superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22).

10. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-9, in cui detto profilo di mezzeria (A') per ciascuna barriera di flusso elettromagnetico (8') è ottenuto congiungendo i centri di circonferenze ideali tangenti i bordi superiore ed inferiore della barriera di flusso

elettromagnetico (8').

11. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-10, in cui detta fase di definire comprende inoltre eseguire una roto-traslazione di detti elementi radiali di connessione (12') rispetto a detto asse di massima riluttanza (q).

12. Metodo secondo la rivendicazione 11, in cui dette barriere di flusso elettromagnetico (8') presentano un profilo di mezzeria (A'), disposto tra un relativo bordo superiore ed inferiore; ed in cui detta fase di eseguire una roto-traslazione di detti elementi radiali di connessione (12') rispetto a detto asse di massima riluttanza (q) comprende traslare una bisettrice (B') di detti elementi radiali di connessione (12') lungo detto profilo di mezzeria (A'), e ruotare detta bisettrice (B') rispetto a detto asse di massima riluttanza (q) di un angolo di rotazione (α).

13. Metodo secondo la rivendicazione 12, in cui detta fase di traslare è tale per cui la traslazione (d_2) di detta bisettrice (B') lungo il profilo di mezzeria (A') a partire dalla sua intersezione (25') con l'asse di massima riluttanza (q) è compresa tra il 30% ed il 55% di una semi-lunghezza di detto profilo di mezzeria (A'), ed in cui detto angolo di rotazione (α), per uno o più di detti elementi radiali di connessione (12') è compreso tra 0° e

45°.

14. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-13, in cui detta fase di definire comprende progettare almeno alcuni di detti elementi radiali di connessione (12') in modo tale che convergano verso detto asse di massima riluttanza (q) nella direzione della superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22).

15. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-14, in cui, definito l'angolo (γ) tra una bisettrice (B') di detti elementi radiali di connessione (12') e detto asse di massima riluttanza (q), detto angolo (γ), per uno o più di detti elementi radiali di connessione (12') è maggiore di 0°.

16. Metodo di realizzazione di una macchina elettrica sincrona a riluttanza, comprendente realizzare una struttura di rotore (22), secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, ed inoltre realizzare una struttura di statore (3), operativamente accoppiata alla struttura di rotore (22) e disposta in posizione radialmente esterna a detta struttura di rotore (22), rispetto a detta apertura centrale (5).

17. Struttura di rotore (22) di una macchina elettrica sincrona a riluttanza (20), avente una conformazione anulare intorno ad un'apertura centrale (5) destinata ad essere impegnata da un albero di rotazione, e comprendente

una pluralità di porzioni magnetiche (6') ed una pluralità di barriere di flusso elettromagnetico (8') interposte alle porzioni magnetiche (6'), dette barriere di flusso elettromagnetico (8') definendo almeno un percorso a massima riluttanza magnetica lungo un asse di massima riluttanza (q) ed un percorso a minima riluttanza magnetica lungo un asse di minima riluttanza (d),

in cui la disposizione di dette barriere di flusso elettromagnetico (8') è tale da ottimizzare congiuntamente prestazioni elettromagnetiche di detta macchina elettrica sincrona a riluttanza (20) e caratteristiche di tenuta meccanica, in particolare a sforzi centrifughi dovuti alla rotazione intorno a detto albero di rotazione.

18. Struttura secondo la rivendicazione 17, comprendente inoltre elementi radiali di connessione (12'), per la connessione meccanica tra porzioni magnetiche (6') radialmente adiacenti; in cui la disposizione di detti elementi radiali di connessione (12') è tale da ottimizzare congiuntamente dette prestazioni elettromagnetiche di detta macchina elettrica sincrona a riluttanza (20) e dette caratteristiche di tenuta meccanica.

19. Struttura secondo la rivendicazione 17 o 18, in cui dette barriere di flusso elettromagnetico (8') presentano un profilo di mezzeria (A'), disposto tra un relativo bordo superiore ed inferiore, avente porzioni

lateralì disposte in corrispondenza di una superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22), ed una porzione centrale, che attraversa detto asse di massima riluttanza (q) avente una conformazione strettamente concava rispetto al centro (O) di detta apertura centrale (5).

20. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 17-19, in cui, per ciascuna barriera di flusso (8'): definita una retta di riferimento (R_1) perpendicolare all'asse di massima riluttanza (q), con origine in corrispondenza dell'intersezione (25') tra un profilo di mezzeria (A') di ciascuna barriera di flusso (8') e l'asse di massima riluttanza (q); definite delle rette (R_2) congiungenti i punti (P) che costituiscono il profilo di mezzeria (A') con l'intersezione (25') tra detto profilo di mezzeria (A') e l'asse di massima riluttanza (q); definito l'angolo (β) formato tra dette rette (R_2) e la retta di riferimento (R_1), e considerando positivo detto angolo (β) in senso orario con centri nei punti di intersezione (25), per uno o più di detti punti (P), il rispettivo angolo (β) è maggiore di 0° .

21. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 17-20, comprendente inoltre elementi radiali di connessione (12'), per la connessione meccanica tra porzioni magnetiche (6') radialmente adiacenti; in cui

almeno alcuni di detti elementi radiali di connessione (12') sono configurati in modo da convergere verso detto asse di massima riluttanza (q) nella direzione della superficie laterale esterna (S) di detta struttura di rotore (22).

22. Struttura secondo la rivendicazione 21, in cui, definito l'angolo (γ) tra la bisettrice (B') di detti elementi radiali di connessione (12') e detto asse di massima riluttanza (q), detto angolo (γ), per uno o più di detti elementi radiali di connessione (12') è maggiore di 0° .

23. Macchina elettrica, comprendente una struttura di rotore (22) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 17-22, ed inoltre una struttura di statore (3), operativamente accoppiata alla struttura di rotore (22) e disposta in posizione radialmente esterna a detta struttura di rotore (22), rispetto a detta apertura centrale (5).

p.i.: GE AVIO S.R.L.

Lorenzo NANNUCCI