



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

UIBM

DOMANDA NUMERO	101996900491309
Data Deposito	18/01/1996
Data Pubblicazione	18/07/1997

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	02	K		

Titolo

MOTORE ELETTRICO BRUSHLEES DI TIPO PERFEZIONATO.

Descrizione a corredo di una domanda di brevetto per
Invenzione Industriale dal titolo: Motore elettrico
brushless di tipo perfezionato.

Titolare: BITRON S.p.A.

5 di nazionalità italiana
con sede in Cormanò (MI)/IT.

Inventori designati: 1) MAGGI Flavio

2) FASOLA Giancarlo

3) DEFILIPPIS Pietro

10 Depositata il 18 Gennaio 1996. n°

TO 96A000022

Descrizione

La presente invenzione si riferisce ad un motore elettrico "brushless" di tipo perfezionato.

Descrizione dello stato della tecnica

15 Per macchine elettriche ad alto numero di poli,
gli obiettivi da perseguire per ottimizzare il rapporto prestazioni/costo sono fondamentalmente tre:

- 1) ridurre la coppia di riluttanza (*cogging*) che, dato il grande numero di magneti e di discontinuità
20 al traferro, causa rumori e vibrazioni inaccettabili se non si adottano accorgimenti particolari;
- 2) utilizzare in modo ottimale il rame, il ferro ed il materiale magnetico;
- 3) ridurre l'ondulazione della coppia attiva su
25 valori dell'ordine dell'1% per minimizzare problemi

di vibrazioni e rumore.

Nei motori elettrici di tipo tradizionale finalizzati a risolvere il punto 2) solitamente ogni fase è avvolta intorno ad un singolo dente. Normalmente il rapporto tra il numero di denti avvolti ed il numero di poli è compreso fra 0,75 e 1,5; ad esempio nelle FIGG. 1 e 2 sono illustrate schematicamente macchine trifase a $3/4$ e a $3/2$, rispettivamente; in FIG. 3 è riportato lo schema di una macchina monofase 1/1. La configurazione di FIG. 1 risponde alle esigenze di costo e all'obiettivo della ondulazione di coppia ridotta, ma non risponde all'esigenza di *cogging*. Le configurazioni di FIGG. 2 e 3 sono invece inaccettabili per l'eccessiva ondulazione sulla coppia attiva generata.

È noto che per minimizzare l'ondulazione della coppia attiva ed ottenere una forma d'onda il più possibile trapezoidale, il passo polare si deve avvicinare quanto più al passo dei denti avvolti; occorre inoltre ridurre al minimo lo spazio interpolare ed avere poli con grande passo angolare. Una tale configurazione è quella che permette un utilizzo ottimale di rame, ferro e magneti.

Per ottenere lo sfasamento delle fasi, è nota l'aggiunta (FIG. 5) di denti parassiti (non attivi)

in posizioni intermedie tra i denti avvolti, in modo che il magnete affacciato si trovi con la fasatura voluta rispetto alla fase successiva (120 gradi nel caso del trifase). I denti utili si alternano così
5 ai denti parassiti; perciò, se il motore elettrico ha un alto numero di poli, anche il numero di denti parassiti è notevole. Ciò comporta uno spreco di ferro ed un mancato utilizzo di parte del flusso magnetico che non contribuisce alla coppia attiva.

10 Sintesi dell'invenzione

Scopo della presente invenzione è di realizzare un motore elettrico brushless che consegua i tre obiettivi enunciati nell'introduzione, in particolare per un motore trifase, fermo restando che i principi dell'invenzione possono estendersi a motori con
15 un numero di fasi qualsiasi.

Questi ed altri scopi e vantaggi, che saranno compresi meglio in seguito, sono raggiunti secondo la presente invenzione da un motore elettrico in cui
20 i denti avvolti che appartengono ad una medesima fase sono raggruppati e i denti sfasatori sono collocati solo tra due gruppi consecutivi di denti di fasi diverse. Preferibilmente tra due gruppi vi è un solo dente sfasatore. In aggiunta, affinché la
25 variazione di riluttanza complessiva sui magneti del

rotore risulti sostanzialmente nulla, è preferibile che nella parte periferica dei denti avvolti si ricavino una pluralità di cave ausiliarie in numero e posizioni opportune.

5 Breve descrizione dei disegni

Verranno ora descritte le caratteristiche strutturali e funzionali di una forma di realizzazione preferita ma non limitativa del dispositivo secondo l'invenzione; si fa riferimento ai disegni
10 allegati, in cui:

le FIGG. da 1 a 4 illustrano schematicamente diverse configurazioni tradizionali di denti di statore affacciati ai magneti di rotore;

la FIG. 5 è un grafico dell'andamento della coppia
15 di riluttanza al passaggio di un polo magnetico davanti ad una cava di statore;

le FIGG. da 6 a 8 illustrano schematicamente una parte del motore elettrico secondo la presente invenzione.

20 Descrizione dettagliata dell'invenzione

Per una migliore comprensione dei principi che costituiscono la base di questa invenzione, si fa inizialmente riferimento alla FIG. 5. È noto che la coppia di riluttanza provocata dal passaggio di un
25 polo di fronte ad una cava ha l'andamento illustrato

nel grafico. La funzione che regola questo fenomeno ha valore medio nullo ed ha uno sviluppo in serie di Fourier in cui sono presenti infinite armoniche; le armoniche di ordine elevato hanno modulo decrescente. Il periodo T della funzione è 180 gradi elettrici. Agli effetti della coppia di riluttanza, contrariamente a quanto accade per le forze elettromotrici, i poli Nord e Sud si comportano allo stesso modo; nella trattazione che segue, gli angoli elettrici si intenderanno quindi riportati ai primi 180 gradi elettrici. (Per la coppia di *cogging*, una cava a 200 gradi elettrici si comporta esattamente, in modulo e fase, come una cava a 20 gradi elettrici).

Ciò premesso, è anche noto che, data una funzione del tempo con valore medio nullo e periodo T , la somma di N funzioni identiche sfasate di T/N sarà uguale a N volte l'armonica di ordine N più i suoi multipli. Da questa relazione è evidente che tanto più grande è il numero N tanto più piccolo, in generale, sarà il residuo della somma di N funzioni.

Secondo la presente invenzione, il problema della riduzione della coppia di riluttanza è risolto nel modo che segue.

Considerando la coppia risultante dal passaggio di un polo su una singola cava, (FIG. 5) essa avrà

un contenuto armonico che si può calcolare con una
analisi di Fourier. Imponendo che nella macchina
elettrica vi sia un certo numero N di cave che pro-
ducono questo effetto e che tali cave siano equispa-
5 ziate angolarmente, i loro effetti si sommeranno al-
gebricamente. Quindi con N cave disposte opportuna-
mente si otterrà la cancellazione delle prime $N-1$
armoniche del singolo fenomeno. Affinché vi sia can-
cellazione non è necessario che le cave siano equi-
10 spaziate rispetto ai poli secondo un angolo meccani-
co, ma che lo siano secondo un angolo elettrico.

Come detto, per quanto riguarda il *cogging* è
irrilevante se il flusso sia entrante od uscente,
quindi il polo SUD ed il polo NORD si comportano al-
15 lo stesso modo. Gli N fenomeni da cancellare devono
quindi essere equispaziati elettricamente solo una
volta, avendo ridotto il loro angolo elettrico ai
primi 180 gradi.

Ad esempio, se si vuole cancellare il *cogging*
20 con $N = 4$ cave, si possono scegliere i seguenti an-
goli elettrici in cui posizionare le cave: $0^\circ-45^\circ-$
 $90^\circ-135^\circ$, ma andrebbero bene anche cave a $0^\circ-45^\circ-$
 $270^\circ-135^\circ$, poiché la cava a 270° elettrici si com-
porta esattamente come quella a 90° , sia in modulo
25 che in fase.

La sequenza in cui si posizionano le N cave non è significativa in quanto il motore nel suo complesso somma gli effetti allo stesso modo, sia che provengano da cave adiacenti sia da cave distanti.

5 Secondo la presente invenzione, le N cave sono realizzate non solo aggiungendo alla struttura denti finti, che non partecipano nella generazione della forza elettromotrice, ma anche aprendo cave ausiliarie sia sui denti avvolti, sia su quelli non avvol-
10 ti; il numero di tali cave ausiliarie e le loro posizioni vengono stabiliti in base ad un criterio descritto più avanti.

Nel progettare un motore secondo la presente invenzione, si deve ottenere una configurazione di
15 macchina trifase elementare (come ad esempio quella illustrata in FIG. 6), in cui:

- (a) ciascuna fase è avvolta su un gruppo di denti adiacenti (almeno due); e
- (b) ciascun gruppo di denti consecutivi su cui è
20 avvolta una singola fase è separato dal gruppo adiacente di denti di un'altra fase da un solo dente sfasatore non avvolto.

Si fissa a priori il numero D di denti avvolti per ciascuna fase. Indicando con f il numero delle
25 fasi, dall'espressione

(1)
$$M = (D + 1) \times f$$

si ottiene immediatamente il numero M complessivo dei denti e quindi delle cave tra i denti. Tali cave in questo contesto verranno definite "principali" per distinguerle dalle cave ausiliarie, descritte più avanti. Imponendo che:

(c) il rapporto fra il passo polare ed il passo del dente sia $N/(N+1)$, dove N è un numero intero maggiore di M,

si avrà che gli assi delle M cave principali andranno posizionati ad angoli elettrici diversi, i cui valori sono multipli interi di $180^\circ/N$.

Al fine di ottenere una distribuzione di cave uniforme in gradi elettrici, è necessario ricavare in aggiunta N-M cave ausiliarie ad angoli elettrici multipli interi di $180^\circ/N$.

Per le condizioni sopra stabilite, la posizione angolare dell'ultima cava di un gruppo di denti appartenenti alla medesima fase non coinciderà con la posizione angolare della prima cava del gruppo seguente; in questa zona si colloca il dente sfasatore non avvolto che riempie lo spazio lasciato vuoto.

Grazie a tale configurazione, le singole cave generano *cogging* sfasati di $180^\circ/N$ gradi elettrici, e quindi nella loro combinazione rimarrà solo

l'armonica di ordine N, ed i suoi multipli, del cogging di una singola cava moltiplicata per N.

Per bilanciare le forze radiali e tangenziali che si scambiano rotore e statore, la macchina elementare descritta viene ripetuta ciclicamente per tutta la circonferenza del motore.

Nell'esempio seguente i concetti appariranno più chiari.

Esempio

10 Applicazione ad una macchina trifase elementare con 9 denti avvolti.

Facendo riferimento alla FIG. 7, si descrive un esempio di applicazione della presente invenzione su una macchina trifase elementare.

15 Si scelgono i seguenti parametri base:

D = 3 denti avvolti; f = 3 fasi; numero poli p = 10.

Ne deriva che $M = (3 + 1) \times 3 = 12$; rispettando la condizione $N > M$, si sceglie $N = 24$. I valori di N opportuni verranno discussi in seguito.

20 Dalla condizione imposta (c) consegue che l'estensione E di un dente avvolto viene calcolata:

$$(4) \quad E = 180^\circ - 180^\circ / N$$

cioè $180^\circ - 180^\circ / 24 = 172,5$ gradi elettrici;

- l'estensione E' di un dente passivo di sfasamento

25 viene calcolata come

(5)
$$E' = [p \times 180 - (f \times D \times 172,5)]/f$$

e risulta $E' = [10 \times 180 - (9 \times 172,5)]/3 = 82,5$ gradi elettrici.

Si è stabilito in partenza che nella macchina
5 si avranno $M = 12$ cave principali; dalla scelta $N = 24$ ne è conseguito che si dovranno ricavare altre $N - M = 12$ cave ausiliarie: occorre quindi determinare le posizioni di tutte le cave, principali ed ausiliarie. La FIG. 7 illustra qualitativamente la configurazione che risulterà dai calcoli che seguono.
10

Come si comprenderà, determinante è la posizione di angolo elettrico dell'asse della cava, mentre la larghezza e la profondità della cava dipendono dalla geometria del dente.

15 Nella prima riga di tabella I sono riportate le posizioni angolari a , in angoli elettrici, in cui si devono trovare le $M = 12$ cave principali. La tabella I va considerata congiuntamente alla FIG. 8, dove si è scelto all'estremo sinistro come origine (angolo elettrico 0°) la mezzeria di un dente della fase 1. Partendo da 0, il primo valore a è di $86,25$ gradi (elettrici), ottenuto dividendo per 2 l'ampiezza o estensione del dente di $172,5$ gradi elettrici. Per
20 ottenere il valore della cava principale successiva, al valore appena calcolato si aggiungerà
25

l'estensione E del dente avvolto (172,5), o
l'estensione E' del dente passivo, a seconda del
dente considerato.

Nella seconda riga di tabella I sono riportati
5 i valori degli angoli meccanici m delle cave princi-
pali; tali valori vengono ricavati da quelli della
prima riga, dividendo per $p = 10$ ed aggiungendo pro-
gressivamente 180° ad ogni cava successiva.

Nella colonna di sinistra di tabella II sono
10 riportati i valori e in angoli elettrici che corri-
spondono alle posizioni delle 12 cave ausiliarie.
Per ricavare questi $N-M = 12$ valori si parte da uno
qualunque dei valori a della aggiunge il valore di
 $180^\circ/N = 180/24 = 7,5$ gradi elettrici ad uno qualun-
15 que dei valori a degli angoli elettrici delle cave
principali (prima riga di tabella I), fino a coprire
un periodo di 180 gradi. Si ottengono così N valori
(in questo esempio $N = 24$) spazati di 7,5 gradi,
dei quali 12 ($M = 12$) coincideranno con valori a già
20 trovati, e perciò non verranno presi in considera-
zione. I rimanenti 12 valori corrispondono perciò
agli angoli elettrici delle cave ausiliarie. Questi
valori sono ordinati progressivamente come nella co-
lonna di sinistra di tabella II. Le possibili posi-
25 zioni delle cave ausiliarie sono ricavate dai valori

della colonna di sinistra, dividendo per $p = 10$ ed aggiungendo progressivamente 180° .

I valori sottolineati indicano le posizioni meccaniche di una possibile soluzione costruttiva.

5 La scelta della posizione meccanica in cui
aprire le cave ausiliarie è influenzata da conside-
razioni di resistenza meccanica e di riluttanza ma-
gnetica delle teste dei denti; è buona norma aprire
le cave ausiliarie il più possibile vicino all'asse
10 del dente per non indebolire le estremità della
"scarpa" polare. La profondità della cava ausilia-
ria è preferibilmente maggiore o uguale della sua
larghezza (preferibilmente circa 1,5 volte), in modo
che il flusso magnetico si possa dividere sulle pa-
15 reti laterali.

Il numero N va opportunamente scelto entro li-
miti ragionevoli: deve essere maggiore di M , e deve
comunque essere sufficientemente elevato da permet-
tere che il rapporto fra passo polare e passo cave
20 $N/(N \pm 1)$ consenta di concatenare quanto più possibile
il flusso dei magneti e sfruttare al massimo il ma-
teriale utilizzato; d'altra parte, N non deve essere
troppo grande per non richiedere la creazione di un
numero di cave ausiliarie eccessivo sulla periferia
25 dei denti dello statore. Nei motori secondo

l'invenzione, le cave ausiliarie conferiranno alla periferia dei denti un aspetto dentellato.

Come si potrà apprezzare, gli accorgimenti sopra descritti consentono di progettare macchine trifase con il rapporto fra numero di denti e numero di poli quasi unitario unendo i vantaggi delle macchine trifase (coppia attiva con bassa variazione percentuale) ai vantaggi delle macchine monofase (rapporto denti/poli = 1, quindi ottimo sfruttamento dei materiali e piccola coppia di riluttanza) senza ereditarne gli inconvenienti.

Le considerazioni precedenti offrono la possibilità di scegliere quante armoniche cancellare, dove posizionare le cave ed i denti finti ed ottenere un basso *cogging* ed una bassa ondulazione della coppia attiva, e consentono inoltre una utilizzazione ottimale di rame, ferro e materiale magnetico, nonché di raggiungere una ondulazione della coppia attiva dell'ordine dell'1% per minimizzare problematiche di vibrazioni e rumorosità a carico.

In macchine tradizionali, l'utilizzo di rame e ferro è, per un motore trifase, dei 2/3 e per i magneti del 3/4. Infatti solo 2 avvolgimenti su 3 partecipano alla formazione della coppia attiva e, nella macchina tipo "3/4" solo i tre quarti dei magneti

si trovano affacciati ai denti avvolti.

Nella configurazione dell'invenzione, invece, l'utilizzo dei magneti viene incrementato con un risparmio notevole a parità di prestazioni. Raggrup-
5 pando le fasi su molti poli consecutivi, il numero dei denti parassiti viene ridotto al minimo. Si può ad esempio realizzare una macchina con 30 denti avvolti e solo 3 denti parassiti, secondo lo schema:
10 denti consecutivi della prima fase, 1 dente pa-
10 rassita, 10 denti consecutivi della seconda fase, 1 dente parassita, 10 denti consecutivi della terza fase, 1 dente parassita.

Il dente sfasatore è collocato dopo un certo numero ($n \geq 2$) di denti che hanno avvolgimenti in
15 fase tra di loro.

Si intende che l'invenzione non è limitata alla forma di realizzazione qui descritta ed illustrata, che è da considerarsi come un esempio di attuazione del motore, il quale è invece suscettibile di modi-
20 fiche relative a forma e disposizioni di parti, dettagli costruttivi e di funzionamento. L'invenzione è intesa ad abbracciare tutte le varianti comprese nel proprio ambito, così come definito dalle seguenti rivendicazioni.

RIVENDICAZIONI

1. Motore elettrico brushless multifase a magneti permanenti comprendente una pluralità di denti di statore avvolti intervallati da denti sfasatori
5 non avvolti, caratterizzato dal fatto che i denti avvolti appartenenti ad una medesima fase sono raggruppati adiacenti tra loro, e che i denti sfasatori sono disposti solo tra gruppi consecutivi di denti avvolti di fasi diverse.

10 2. Motore elettrico secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che i denti sfasatori sono disposti solo in numero di uno tra due gruppi consecutivi di denti avvolti di fasi diverse.

3. Motore elettrico secondo la rivendicazione
15 1, caratterizzato dal fatto che nella parte periferica dei denti sono ricavate cave ausiliarie in numero e posizioni opportune affinché la variazione di riluttanza complessiva sui magneti del rotore risulti sostanzialmente nulla.

20 4. Motore elettrico secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che:

- scelto il numero D di denti avvolti per ciascuna fase;
- scelto il numero f di fasi del motore;
- 25 - calcolato $M = (D + 1) \times f$ il numero complessivo

di denti avvolti e sfasatori;

- scelto il numero complessivo N di cave, con $N > M$; e

- imposto che il rapporto fra il passo polare ed

5 il passo del dente sia $N/(N \pm 1)$,

gli assi delle M cave principali sono posizionati secondo angoli elettrici multipli interi di $180^\circ/N$;

e gli assi di un numero $N-M$ di cave ausiliarie sono disposti ad angoli elettrici multipli interi di

10 $180^\circ/N$.

p. inc. BITRON S.p.A.

MANDATARI NOMINATI

G. Zonardo - R. Coletti - G. Lotti - R. Appoloni

A. De Gregori - G. Di Francesco - C. Fioravanti

M. Giuli - A. Zappella

(firma)

(per sè e per gli altri)

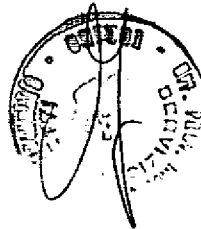


TABELLA I

angolo elettrico delle cave principali ridotto a 180 gradi											
86,25	78,75	161,25	153,75	146,25	138,75	41,25	33,75	26,25	18,75	101,25	93,75
angolo meccanico cave principali											
8,625	25,875	34,125	51,375	68,625	85,875	94,125	111,375	128,625	145,875	154,125	171,375

FIG.8

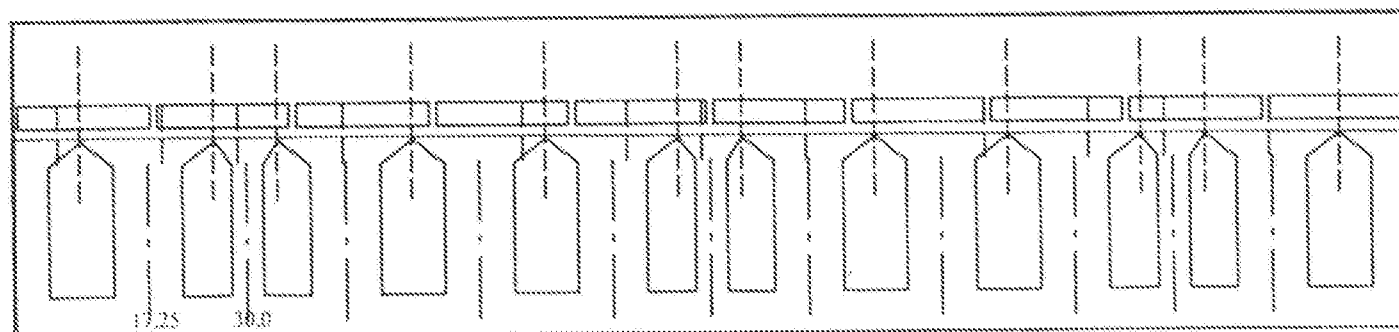


TABELLA II

angolo elettrico cave ausiliarie	possibili angoli meccanici delle cave ausiliarie										
3,75	0,375	18,375	36,375	54,375	72,375	90,375	108,375	126,375	144,375	162,375	
11,25	1,125	19,125	37,125	55,125	73,125	91,125	109,125	127,125	145,125	163,125	
48,75	4,875	22,875	40,875	58,875	76,875	94,875	112,875	130,875	148,875	166,875	
56,25	5,625	23,625	41,625	59,625	77,625	95,625	113,625	131,625	149,625	167,625	
63,75	6,375	24,375	42,375	60,375	78,375	96,375	114,375	132,375	150,375	168,375	
71,25	7,125	25,125	43,125	61,125	79,125	97,125	115,125	133,125	151,125	169,125	
108,75	10,875	28,875	46,875	64,875	82,875	100,875	118,875	136,875	154,875	172,875	
116,25	11,625	29,625	47,625	65,625	83,625	101,625	119,625	137,625	155,625	173,625	
123,75	12,375	30,375	48,375	66,375	84,375	102,375	120,375	138,375	156,375	174,375	
131,25	13,125	31,125	49,125	67,125	85,125	103,125	121,125	139,125	157,125	175,125	
168,75	16,875	34,875	52,875	70,875	88,875	106,875	124,875	142,875	160,875	178,875	
176,25	17,625	35,625	53,625	71,625	89,625	107,625	125,625	143,625	161,625	179,625	

p.l. BITRON S.p.A.

MANUTENZIONE NOMINATA
 G. Caracciolo - R. Caputo - G. Lotti - R. Appoloni
 A. De Caputo - G. Di Francesco - G. Ferravanti
 M. Gatti - A. Zampella
 (firma) *Graciano*
 per sé e per gli altri

