



## Il motore brushless (2° parte): caratteristiche costruttive

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

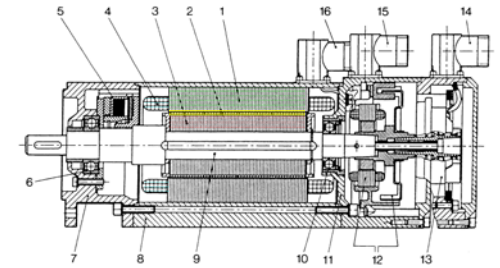
1

L. Frosini

## Caratteristiche costruttive

Organi elettrici e meccanici di un motore brushless:

1. pacco statorico di lamierini;
2. magneti permanenti rotorici;
3. pacco rotorico di lamierini;
4. avvolgimenti statorici;
5. freno di stazionamento;
6. cuscinetto a sfere e relativo anello di bloccaggio;
7. flangia per montaggio orizzontale;
8. carcassa;
9. albero;
10. cuscinetto a sfere precaricato;
11. scudo posteriore;
12. trasduttore primario (nell'esempio, dinamo tachimetrica e datore di posizione ad effetto Hall);
13. trasduttore secondario (encoder opzionale);
14. connettore per trasduttore secondario;
15. connettore per trasduttore primario;
16. connettore scatola morsettiera di potenza.



2

L. Frosini

## Caratteristiche costruttive

Un motore brushless è essenzialmente costituito da uno statore ed un rotore, entrambi di materiale ferromagnetico laminato.

**Statore:** sede degli avvolgimenti trifase.

**Rotore:** sede dei magneti permanenti responsabili del flusso di eccitazione.

Sono quindi presenti due sorgenti differenti ed indipendenti di forza magnetomotrice:

- di rotore, sempre presente;
- di statore, presente solo quando alimentato.

Nota: se la corrente statorica fosse priva di armoniche temporali (imputabili al convertitore), il rotore non richiederebbe di essere laminato; infatti, in tal caso, la reazione d'armatura ruoterebbe alla velocità di sincronismo e quindi risulterebbe "ferma" rispetto al rotore (così come accade per tutte le macchine sincrone).

3

L. Frosini

## Caratteristiche costruttive

**Pacco di lamierini rotorico:** ha il compito di consentire la richiusura del flusso magnetico e, nelle macchine a magneti interni, di alloggiare i magneti permanenti. Nel rotore possono essere praticati dei canali, per ridurre il momento di inerzia.

I poli magnetici possono essere fissati al pacco rotorico tramite delle resine (incollati) e trattenuti con dei bandaggi di fibre di vetro o di carbonio.

Nei motori estremamente veloci, per evitare il distacco centrifugo durante la rotazione dell'albero, fra il nucleo ed il polo si realizza l'attacco a coda di rondine oppure i magneti sono avvolti con un nastro di Kevlar o contenuti in un cilindro (*retaining can*) di sottile acciaio inossidabile non magnetico o di altra lega ad alta resistività (per minimizzare le perdite per correnti parassite).

**Pacco di lamierini statorico:** lamierini Fe-Si, di basso spessore, isolati tra loro con vernice. La cifra di perdita del pacco statorico di lamierini è circa 1,3÷2 W/kg (a 50 Hz), ridotta del 50% rispetto ai motori asincroni standard, perché l'alimentazione può avvenire anche a frequenze maggiori di 50 Hz, con conseguenti maggiori perdite.

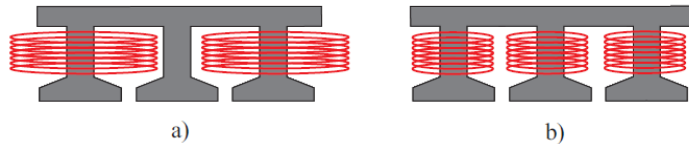
4

## Avvolgimenti concentrati

L'avvolgimento di statore può essere distribuito, ossia analogo a quello delle macchine sincrone e asincrone tradizionali, oppure concentrato (*non-overlapping concentrated winding*).

In un avvolgimento distribuito, una bobina presenta un'ampiezza pari a un passo polare o poco inferiore a questo (nel caso di passo raccorciato).

In un avvolgimento concentrato, ogni bobina è avvolta attorno a un dente: anche in questo caso, si possono avere avvolgimenti a singolo strato (a) e a doppio strato (b):



Diversamente dagli avvolgimenti distribuiti, che normalmente presentano un numero di cave per polo e per fase  $q$  intero (eccetto gli avvolgimenti a cave frazionarie), **nell'avvolgimento concentrato  $q$  è sempre minore di 1.**

5

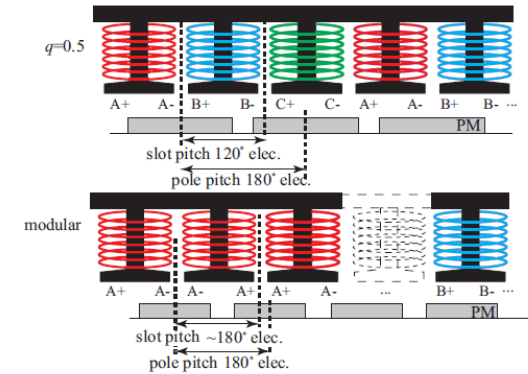
## Avvolgimenti concentrati

In particolare, gli avvolgimenti concentrati tradizionali trifase presentano un rapporto tra numero cave e numero poli pari a  $Q/p = 3/2$ , ossia  $q = 0,5$  (dato che  $q = Q/3p$ ).

Esistono anche avvolgimenti concentrati modulari, con  $0,25 < q < 0,5$ : ad esempio un avvolgimento trifase a 24 cave e 28 poli o a 66 poli e 72 cave:

$$q = Q/3p = 72/(3 \cdot 66) = 0,36$$

Questi avvolgimenti sono generalmente utilizzati **per ottenere un elevato numero di poli, ossia un'elevata coppia.**



Two categories of concentrated windings of: a) Traditional brushless PM machines ( $q = 0.5$ ); b) Modular PM machines ( $0.25 < q < 0.5$ ).

F. Meier, "Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications", PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2008.

6

## Avvolgimenti concentrati

Esempio di configurazione a 12 cave, avvolgimento trifase, a doppio strato:

Le matasse possono essere avvolte direttamente attorno alle sporgenze tramite macchinari specializzati oppure, se la conformazione dei denti lo consente, pre-avvolte e poi inserite.

Con una configurazione ad avvolgimenti concentrati si ha un gran numero di armoniche, con elevata ampiezza, nella f.m.m. di statore. Questo è il principale svantaggio, perché causano maggiori perdite addizionali e rumore acustico.

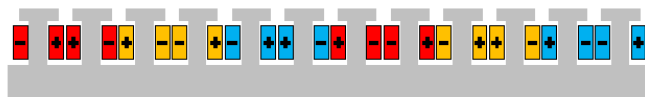


Fig. 15.2. Winding layout of a machine with concentrated coils ("wound-off" representation of the stator lamination); red: phase u, yellow: phase v, blue: phase w.

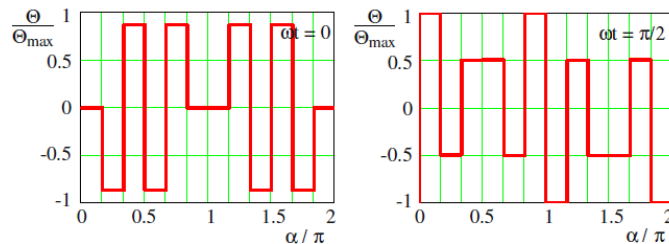


Fig. 15.3. MMF distribution of the winding shown in Fig. 15.2 versus circumference coordinate, functions normalized to a maximum value of 1;  $\omega t = 0$  (left),  $\omega t = \pi/2$  (right).

7

## Avvolgimenti concentrati

Un vantaggio che si ottiene con gli avvolgimenti concentrati è la riduzione della lunghezza delle testate, con conseguente risparmio in materiale conduttore (rame) e riduzione delle perdite per effetto Joule, in quanto queste sono proporzionali al volume di materiale conduttore. Lo statore risulta di minore dimensione e minor peso.

Di contro, le perdite nel ferro, sia di statore che di rotore, possono essere superiori rispetto agli avvolgimenti distribuiti, a causa di una diversa distribuzione dei flussi.

È possibile dimostrare che gli avvolgimenti concentrati consentono di aumentare l'affidabilità del motore nei confronti dei cortocircuiti di statore (perché il contatto tra conduttori appartenenti a diverse fasi è drasticamente ridotto e addirittura eliminato nel caso di avvolgimento a singolo strato) e, in molti casi, di ridurre la coppia di cogging. Quest'ultima conclusione non è sempre vera, anzi, talvolta si verifica il contrario, in particolare nel caso in cui le cave di statore siano di tipo aperto, per consentire un facile inserimento delle bobine in cava.

8

## Avvolgimenti concentrati

Possiamo riassumere i vantaggi e gli svantaggi degli avvolgimenti concentrati, rispetto a quelli distribuiti, nella seguente tabella:

PRO	CONTRO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>dimensioni minori a parità di potenza</b></li> <li>• <b>risparmio di materiale e costi contenuti</b></li> <li>• <b>perdite per effetto Joule minimizzate</b></li> <li>• <b>basso ripple di coppia e vibrazioni ridotte (alle basse velocità)</b></li> <li>• <b>perdite nel ferro contenute (alle basse velocità)</b></li> <li>• <b>resistenza ai guasti</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• presenza di armoniche nel traferro</li> <li>• maggiori perdite nel ferro e nei magneti</li> <li>• ripple di coppia potenzialmente elevato alle alte velocità</li> <li>• riduzione dell'efficienza</li> <li>• necessità di apportare modifiche e soluzioni per ridurre le perdite (alle alte velocità)</li> </ul>

E. Funaro, "Aspetti progettuali e criteri di scelta dei componenti elettrici negli impianti mini-eolici", relazione di laurea triennale in Ingegneria Industriale, a.a. 2016-17, Università di Pavia.

9

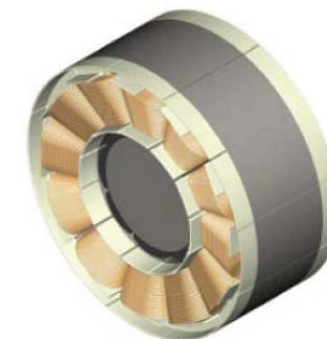
## Avvolgimenti concentrati e nucleo di statore a segmenti



Using segmented lamination stator technology instead of traditional brushless dc motor design can deliver greater efficiency and potentially longer operational life.



A motor using segmented lamination stator technology (right) features significantly reduced end turns in comparison to a traditional brushless motor (left) and results in increased thermal efficiency.



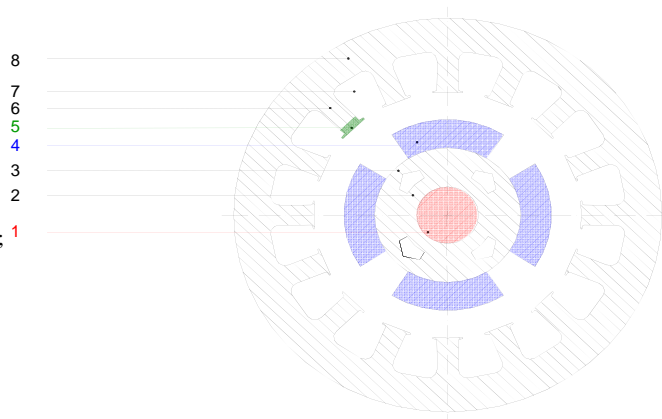
Polyester resin lamination caps and flame-resistant insulation for the stator's slots, combined with a thermally conductive epoxy coating, ensure that a segmented lamination stator delivers a higher motor temperature rating than alternative technologies.

10

## Caratteristiche costruttive: S.P.M.



Le macchine a magneti superficiali hanno i magneti direttamente affacciati sulla superficie esterna del rotore.



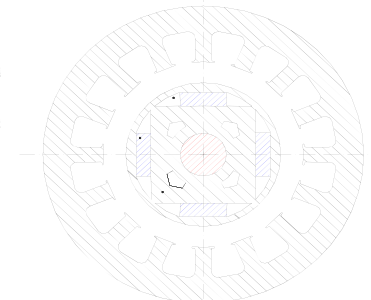
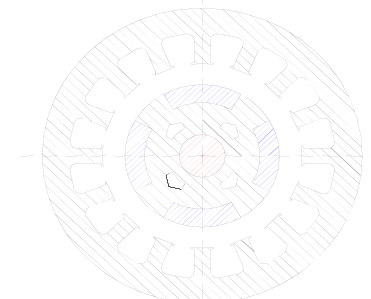
1. **albero;**
2. **lamierino rotorico sfinestrato;**
3. **corona rotorica;**
4. **magnete rotorico;**
5. **testa del dente statorico;**
6. **base del dente statorico;**
7. **cava statorica;**
8. **corona statorica.**

11

## Caratteristiche costruttive: I.P.M.

Nelle macchine a **magneti interni inseriti (inset)**, i magneti affacciano al traferro una sola delle loro superfici.

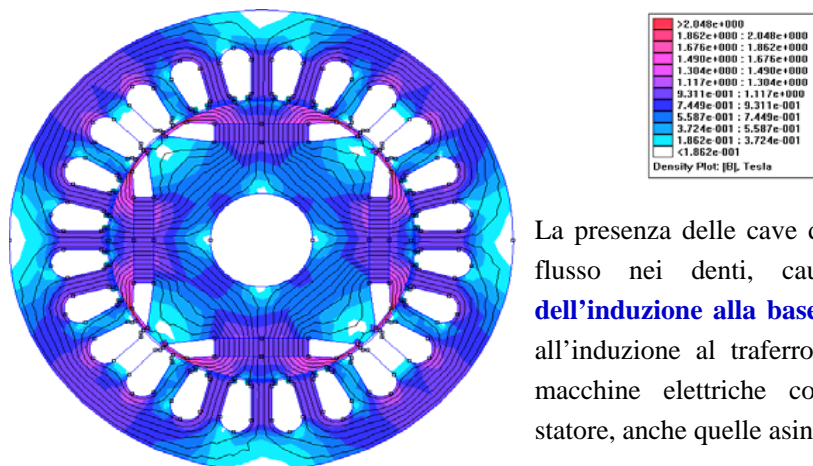
Nei motori IPM con **magneti annegati (buried)**, invece, i magneti sono posti completamente dentro al rotore e non affacciano nessuna superficie al traferro.



12

## Caratteristiche costruttive: I.P.M.

Distribuzione dell'induzione magnetica e delle linee di flusso per una macchina IPM a magneti in NdFeB annegati:

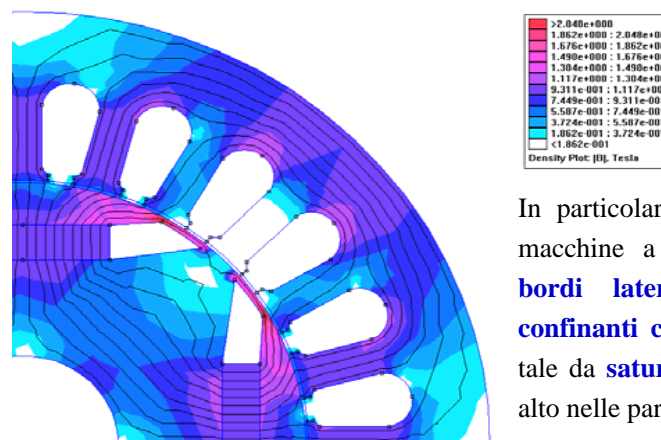


La presenza delle cave di statore confina il flusso nei denti, causando l'**aumento dell'induzione alla base del dente** rispetto all'induzione al traferro (come in tutte le macchine elettriche con questo tipo di statore, anche quelle asincrone).

13

## Caratteristiche costruttive: I.P.M.

Nelle macchine a magneti interni, si verifica la concentrazione dell'induzione magnetica anche nel lamierino rotorico:

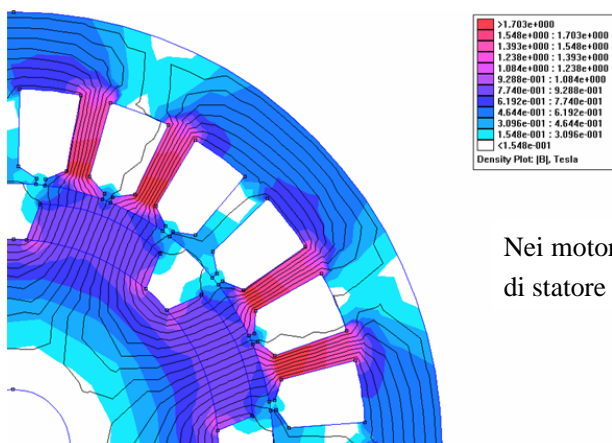


In particolare questo fenomeno riguarda le macchine a **magneti interni**: avviene nei **bordi laterali del lamierino rotorico confinanti con i magneti permanenti** ed è tale da **saturare** il lamierino (il flusso è più alto nelle parti di rotore vicine ai magneti).

14

## Caratteristiche costruttive

Nelle macchine a **magneti superficiali** il problema della concentrazione dell'induzione magnetica nel lamierino rotorico **non sussiste**.



Nei motori SPM il flusso è più alto nei denti di statore (come nei motori tradizionali).

15

## Caratteristiche costruttive: S.P.M.

Configurazioni a flusso radiale con rotore interno e magneti superficiali:

- preferibili se è maggiore la richiesta di potenza erogata come generatore, perché l'induzione al traferro risulta solitamente più elevata ed è maggiore la tensione indotta;
- per il funzionamento alle velocità più elevate è necessario dimensionare un sistema di ritenuta dei magneti (bandaggio, anelli, ecc.) che va ad aumentare il traferro magnetico;
- presentano, in generale, meno ripple di coppia rispetto ai motori con magneti interni.



16



## Caratteristiche costruttive: I.P.M.

Configurazioni a flusso radiale con rotore interno e magneti interni:

- la minore coppia di allineamento è compensata dalla presenza delle coppia di riluttanza (praticamente assente nei motori con magneti superficiali);
- di norma preferiti quando si vogliono raggiungere coppia e potenza rese maggiori anche alle velocità più elevate (eletto-mandrini ed automobili ibride), perché richiedono meno energia per il deflussaggio;
- magneti meno soggetti alla smagnetizzazione;
- i magneti interni sono anche meno soggetti alla formazione di correnti parassite, causate dalla variazione di induzione innescata dalle armoniche spaziali della F.M.M., dalle armoniche di corrente dovute all'alimentazione, dal passaggio sotto le cave alle velocità più elevate.

17

## Caratteristiche costruttive

### Motori SPM

- Relativamente semplici da realizzare
- Bassi costi di realizzazione
- Riluttanza magnetica costante al traferro
- Induzione al traferro e tensione indotta elevate
- Necessitano di sistemi di ritenzione dei magneti per funzionare a velocità elevate (il che provoca un aumento di spessore del traferro magnetico)

### Motori IPM

- Caratterizzati da induttanze più elevate (perché il traferro è più sottile)
- Riluttanza magnetica non costante al traferro ( $L_d < L_q$ )
- Coppia di riluttanza (o di anisotropia) elevata
- Ampio range di funzionamento a potenza costante (ossia in deflussaggio)
- Traferro meccanico sottile
- Meccanicamente molto robusti

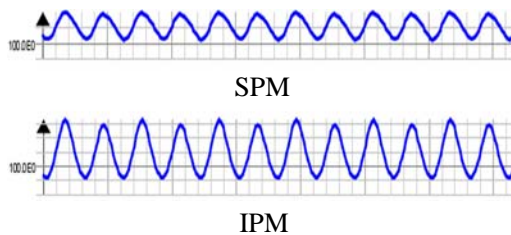
N.B.: il motore IPM ha un traferro effettivo più sottile di quello SPM

18

## Caratteristiche costruttive

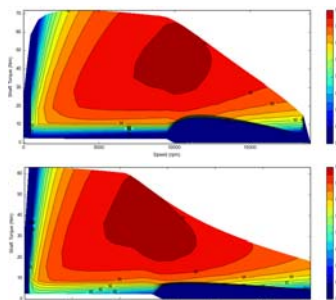
### Motori SPM

- Coppia costantemente maggiore a pari velocità di rotazione
- Ripple di coppia basso



### Motori IPM

- Possibilità di lavorare in un range di velocità molto ampio con efficienza massima
- Elevata capacità di funzionamento nella regione a potenza costante



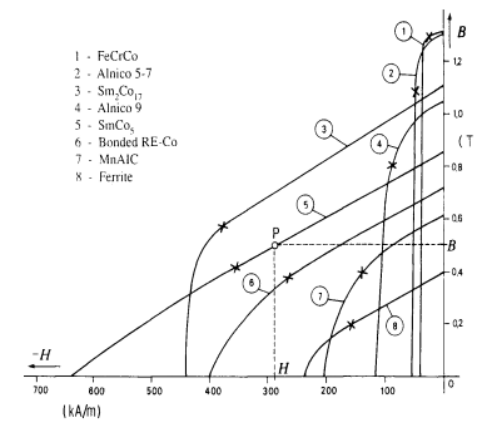
A. Quantelli, *Analisi elettromagnetiche e termiche e calcolo delle mappe d'efficienza di due motori brushless*, Tesi di Laurea Magistrale, Università di Pavia, A.A. 2014-15.

19

## Magneti

I magneti permanenti delle macchine brushless sono realizzati con **materiali magnetici duri**, caratterizzati da **elevato valore di induzione residua  $B_r$**  e del parametro  **$(B \cdot H)_{max}$** .

Per la determinazione del punto di lavoro dei magneti rotorici è necessario conoscere il **ciclo di isteresi  $B = f(H)$**  del materiale in esame ed in particolare del secondo quadrante del piano B-H (**caratteristica di smagnetizzazione**).



Curve B-H di alcuni tipi di magneti permanenti

20

## Reazione di indotto coi magneti permanenti

Riprendiamo le considerazioni fatte su una macchina in c.c. a magneti permanenti. Avevamo considerato la legge di circuitazione magnetica, ipotizzando che l'induzione al traferro fosse uguale a quella nel magnete: in generale, è il flusso che rimane costante (l'induzione si conserva solo se le superfici di traferro  $S_t$  e di magnete  $S_m$  sono uguali):

$$\begin{cases} H_m l_m + H_t l_t = 0 & \Rightarrow H_t = -\frac{H_m l_m}{l_t} \\ \Phi = B_m S_m = B_t S_t & \Rightarrow B_m = B_t \frac{S_t}{S_m} = \mu_0 H_t \frac{S_t}{S_m} = -\mu_0 H_m \frac{l_m \cdot S_t}{l_t \cdot S_m} \end{cases}$$

Si osserva che:

- Un aumento della lunghezza del traferro  $l_t$  comporta un abbassamento dell'induzione e del flusso forniti dal magnete.
- Valori elevati di campo coercitivo  $H_c$  o di lunghezze di magnete  $l_m$  consentono una maggiore stabilità dell'induzione prodotta da variazioni di lunghezza di traferro.

21

## Rotori a magneti permanenti

Fissati i valori  $B_m, H_m$  sulla curva caratteristica del magnete, si possono determinare le dimensioni  $S_m, l_m$  necessarie a produrre un determinato valore di flusso  $\Phi$  in un traferro di lunghezza  $l_t$  e sezione  $S_t$ :

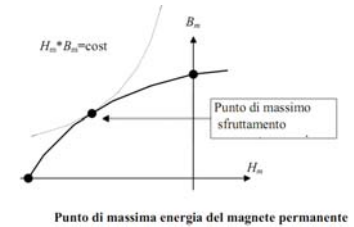
$$S_m = \frac{B_t S_t}{B_m} \quad l_m = \frac{H_t l_t}{-H_m} = \frac{B_t l_t}{-\mu_0 H_m}$$

Il volume di magnete  $V_m$  necessario allo scopo risulta dato da:

$$V_m = S_m l_m = \frac{B_t S_t}{B_m} \cdot \frac{H_t l_t}{-H_m} = \frac{B_t^2 V_t}{-\mu_0 H_m B_m}$$

dove  $V_t = S_t l_t$  è il volume del traferro.

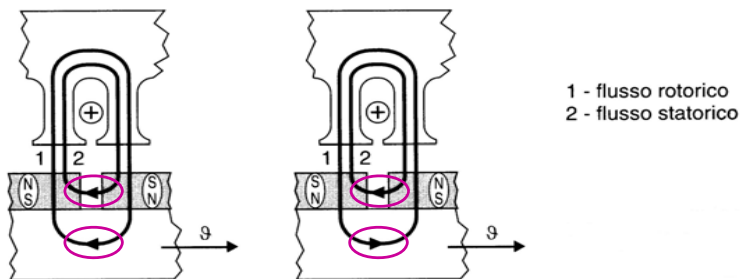
Quindi, per ridurre al minimo il volume di magnete, la scelta del punto di lavoro va eseguita in modo che sia massimo il prodotto  $B_m H_m$ .



22

## Magneti

Quando gli avvolgimenti del motore sono percorsi da corrente, il campo magnetico statorico generato si rafforza e si indebolisce a seconda della posizione del rotore; la reazione d'armatura originata è quindi funzione della posizione dei magneti.

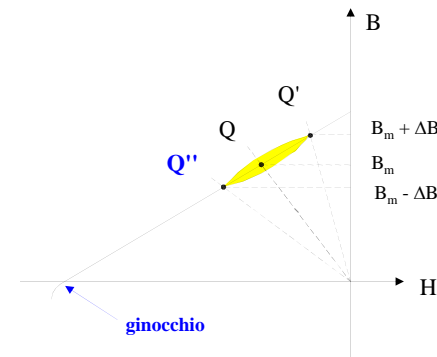


I materiali per magneti permanenti devono avere un **elevato campo coercitivo  $H_c$**  per conservare l'induzione residua nel tempo e rendere la macchina meno sensibile ai fenomeni di reazione di indotto.

23

## Magneti

Con la macchina alimentata, il punto di lavoro si sposta dinamicamente su cicli di isteresi minori  $Q'-Q''$  centrati sul punto di lavoro statico  $Q$ . Il rischio di smagnetizzazione, dovuta alla reazione d'armatura, è evitato facendo in modo che il punto di lavoro  $Q''$  non cada nel [ginocchio di smagnetizzazione](#).



Nota: questa semplificazione vale solo se la permeabilità del lamierino è considerata infinita e il circuito magnetico è assimilato a due tratti (il primo corrispondente al traferro e l'altro corrispondente al tratto nel magnete).

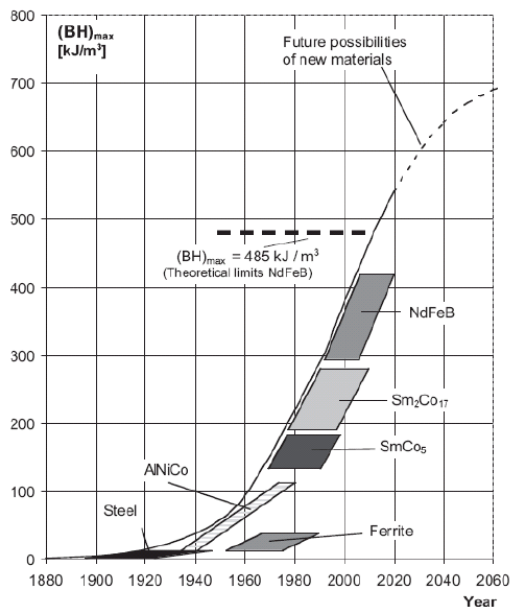
Con la formula della circuitazione completa non si ha più una retta e il calcolo del punto di lavoro viene fatto per approssimazioni successive con programmi di calcolo.

24

## Materiali per magneti permanenti

Sono quattro le famiglie di materiali magnetici che possono essere impiegati nella costruzione dei magneti permanenti dei motori brushless:

- leghe Alnico,
- ferriti,
- leghe Samario-Cobalto,
- leghe NdFeB.



<http://www.vacuumschmelze.de>

25

## Materiali per magneti permanenti

I processi per produrre questi magneti sono principalmente:

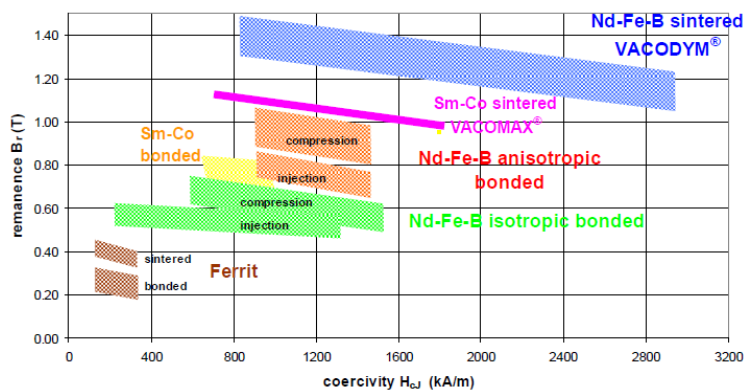
- ✓ **Sinterizzazione** (tecnica della polvere metallurgica): trattamento termico ad elevata temperatura che trasforma un materiale polverulento in un materiale indivisibile; la sinterizzazione può essere svolta a pressione atmosferica o a pressione elevata;
- ✓ **Pressofusione** (colata in stampo): usata per un tipo di Alnico;
- ✓ **Bonded magnet process**, ossia un processo di rapida solidificazione che utilizza materiali leganti plastici: impiegato per alcune ferriti e alcune leghe NdFeB.

Le caratteristiche principali che portano alla scelta di un materiale sono:

- elevata induzione residua  $B_r$  [T];
- elevata energia specifica  $(B \cdot H)_{\max}$  [kJ/m<sup>3</sup>];
- elevato campo coercitivo  $H_c$  [kA/m];
- elevata temperatura di Curie [°C];
- minor costo, maggiore resistenza ad ossidazione e corrosione, minore fragilità.

26

## Materiali per magneti permanenti



Per ottenere un materiale con elevata forza coercitiva è necessario fare in modo che i contorni dei domini magnetici di Weiss trovino difficoltà nel movimento.

Si ricorda che la **temperatura di Curie** è la temperatura critica sopra la quale il materiale ferromagnetico si comporta come paramagnetico.

27

## Materiali per magneti permanenti

**Leghe Alnico:** sviluppate dagli anni '30, sono leghe a base di ferro, alluminio, nichel e cobalto; quest'ultimo elemento viene aggiunto per migliorare le caratteristiche magnetiche e metallurgiche della lega.

Il metodo di produzione più usato è la **sinterizzazione**: polverizzazione finissima del materiale, che è tenuto assieme attraverso opportuni leganti, il cui ulteriore scopo è di rendere impura e disomogenea la sostanza. Fondamentale è il trattamento termico che può essere differente per ciascun materiale prodotto. Le notevoli tensioni interne dovute al rapido raffreddamento, ostacolano il movimento dei domini garantendo un elevato campo coercitivo. Per distribuire le tensioni interne in modo omogeneo, occorre limitare il contenuto di alluminio che può essere sostituito dal titanio.

Le leghe Alnico presentano una temperatura di Curie molto elevata (800° C): possono essere impiegate in applicazioni in cui la temperatura supera anche i 500 °C.

Hanno elevata induzione residua, ma bassa forza coercitiva e costo elevato.

28

## Materiali per magneti permanenti

**Ferriti:** sviluppate dagli anni '50, sono economiche, ma con bassa induzione residua e bassa energia specifica, e quindi utilizzate principalmente per il loro costo contenuto.

Le ferriti possono essere prodotte sia sinterizzate sia legate con vari tipi di resina: le prime hanno migliori proprietà meccaniche mentre le seconde possono anche essere rese flessibili. Contengono ossidi di ferro e carbonato di stronzio e di bario; talvolta sono denominate **magneti ceramici**.

Presentano un comportamento termico anomalo rispetto agli altri materiali magnetici: la loro forza coercitiva tende a salire all'aumentare della temperatura, fino a circa 180°C, al contrario di tutti gli altri materiali, dove  $H_c$  diminuisce costantemente.

Possono essere impiegate in applicazioni con temperature di lavoro fino ai 300 °C (ferriti sinterizzate) o inferiori (ferriti plastiche), ma sempre  $> 100^\circ\text{C}$ .

Inoltre le ferriti sotto la temperatura di Curie, a differenza degli altri materiali, hanno elevata resistività elettrica e quindi perdite per correnti parassite notevolmente ridotte.

29

## Materiali per magneti permanenti

Le **ferriti** presentano inoltre grande resistenza all'ossidazione e all'attacco chimico, che le rende adatte ad applicazioni dove sia frequente o continuo il contatto con l'acqua o liquidi aggressivi.

**Leghe Samario-Cobalto:** si tratta di leghe a base di cobalto (Co); l'unico elemento concretamente utilizzabile per ottenere un'alta forza coercitiva è il samario. Commercialmente, le leghe terra rara/cobalto disponibili sono  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  e  $\text{SmCo}_5$ .

Il processo produttivo dei magneti Sm-Co è lungo e complesso: ciò si traduce in alti costi di produzione, che sono compensati dalle elevate prestazioni (elevata  $B_r$ , elevata energia specifica, elevato  $H_c$ ).

La lega Sm-Co può essere utilizzata con temperature di lavoro elevate (fino a 350°C), ha un'alta resistenza alla corrosione e all'ossidazione, ma è poco impiegata in ambito industriale a causa dei suoi elevati costi. È inoltre relativamente fragile. Le sue principali applicazioni sono in ambito elettromedicale, aerospaziale e militare.

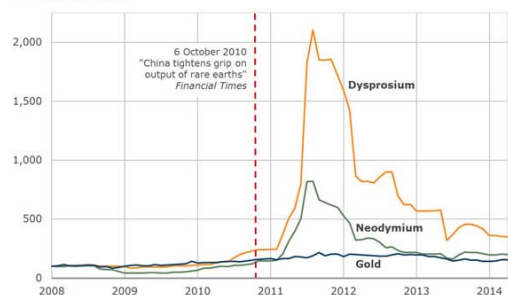
30

## Materiali per magneti permanenti

**Leghe neodimio-ferro-boro:** dal punto di vista metallurgico, sono simili alle leghe Sm-Co, mentre per quanto riguarda le proprietà magnetiche e meccaniche sono in assoluto le migliori.

Il loro principale svantaggio è la tendenza alla corrosione; inoltre, sebbene presentino una migliore caratteristica di smagnetizzazione rispetto al Sm-Co, questa proprietà si perde alle alte temperature (possono essere utilizzati fino a 200°C circa).

% of January 2008 price



In generale, per i magneti a terre rare, vi è anche un problema di forte variabilità dei costi, dovuto soprattutto al fatto che la Cina detiene quasi il monopolio mondiale di questi materiali.

31

## Perdite nei magneti permanenti

Si osserva che, contrariamente a quanto spesso riportato in trattazioni semplificate, i magneti permanenti non sono esenti da perdite, sebbene le perdite ad essi associate siano inferiori a quelle dovute all'effetto Joule negli avvolgimenti percorsi da corrente.

Queste perdite sono dovute alle armoniche ad alta frequenza presenti nello spettro della forza magnetomotrice di statore, che sono sempre rilevanti per i motori brushless e lo sono in particolare per quelli ad avvolgimenti concentrati.

Poiché i magneti sono materiali con una resistività finita, in essi si inducono correnti parassite e conseguenti perdite, analogamente a quanto accade nei nuclei di materiale ferromagnetico (sebbene la resistività dei magneti permanenti sia molto più elevata di quella dei materiali ferromagnetici dolci): maggiore è la resistività dei magneti, minori saranno le correnti parassite in essi indotti e le conseguenti perdite.

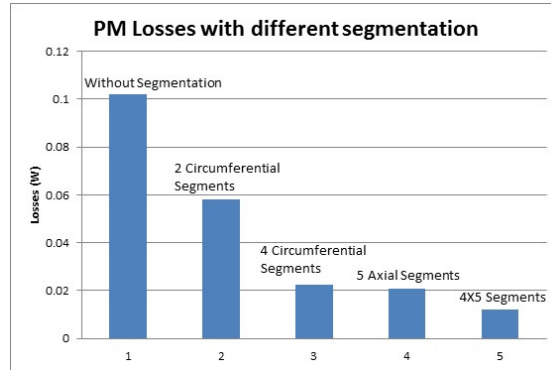
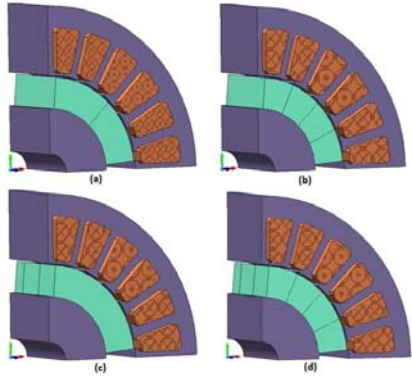
Tra i magneti considerati, le ferriti sono quelle a più alta resistività. Inoltre, i magneti *bonded* (legati) hanno in generale maggiore resistività rispetto a quelli sinterizzati.

32



## Perdite nei magneti permanenti

Un metodo per ridurre le perdite nei magneti permanenti è la loro segmentazione (*segmentation*) assiale o circonferenziale, analoga alla laminazione dei nuclei ferromagnetici.



<http://www.infolytica.com/en/applications/ex0199/>

33

## Materiali per magneti permanenti

TIPO DI MAGNETE PERMANENTE	TEMPERATURA DI SMAGNETIZZ. (°C)	INDUZIONE RESIDUA [T]	CAMPO COERCITIVO [kA/m]	(B-H)max [kJ/m³]
Alnico 2	>150	1,2	580	41
Alnico 4	>150	0,92	132	44
Alnico 5	>150	0,72	40	152
Ferrite F1 isotropa	-150	0,2	136	6,4
Ferrite F2 anisotropa	-150	0,43	200	34,4
Ferrite F3 anisotropa	-150	0,4	292	30,4
Ferrite F4 legata, flessibile, isotropa	-150	0,17	128	5,6
Ferrite F5 legata, flessibile, anisotropa	-150	0,25	176	12
SmCo5 sinterizzato (R1)	>250	0,7	480	96
Sm2Co17 (R3)	>250	1	480	192
SmCo5 legato (R5)	>250	0,65	460	80
Sm2Co 17 legato (R6)	>250	0,86	500	130
NdFeB 27	-150	1,08	776	216
NdFeB 27H	-150	1,05	768	216
NdFeB 30	-150	1,14	800	240
NdFeB 30H	-150	1,13	808	240
NdFeB 35	-150	1,22	840	280

34

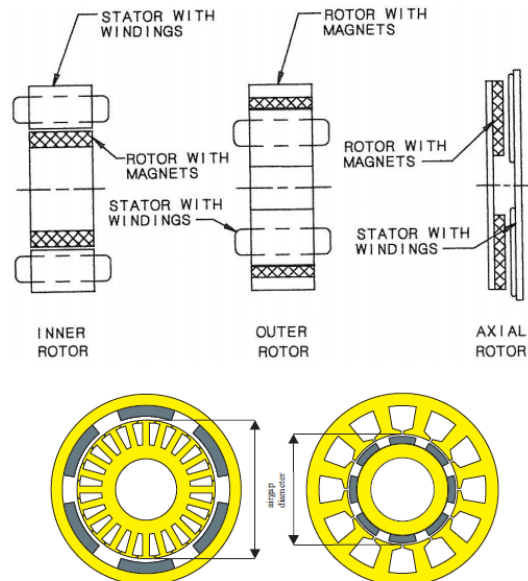
## Caratteristiche costruttive

I motori brushless possono avere:

- rotore interno (flusso radiale),
- rotore esterno (flusso radiale);
- rotore a disco (flusso assiale).

Il rotore interno è maggiormente usato per i servomotori perché:

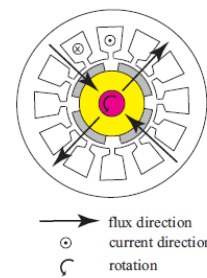
- ✓ il diametro inferiore del rotore riduce l'inerzia;
- ✓ è più facile asportare il calore derivante dalle perdite per effetto Joule di statore.



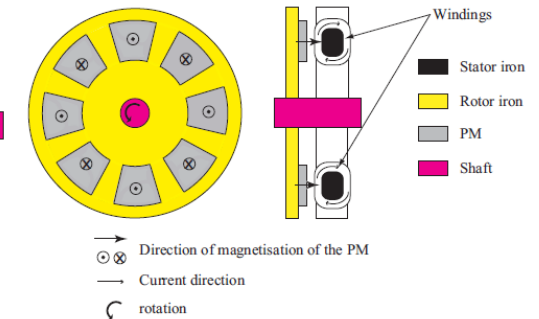
35

## Caratteristiche costruttive

### FLUSSO RADIALE (RFPM)



### FLUSSO ASSIALE (AFPM)



AFPM machines feature a large diameter and a relatively short axial length compared to RFPM machines. As suggested by its name and Figure A.3, the flux flows axially through the airgap while the current flows in the radial direction.

F. Meier, "Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications", PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2008.

36

## Rotore esterno

Il rotore esterno può essere usato in applicazioni in cui è conveniente collegare direttamente il carico meccanico al rotore, come nei ventilatori e nelle turbine eoliche. Il vantaggi che si ottengono sono:

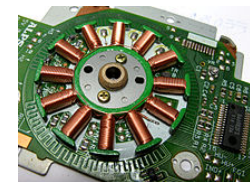
- dimensioni complessive (motore + ventilatore) più compatte, specialmente in direzione assiale,
- raffreddamento del motore assicurato dal movimento d'aria del ventilatore,
- coppia più elevata a parità di lunghezza della parte attiva del motore;
- possibilità di ottenere le stesse prestazioni impiegando ferriti al posto di magneti a terre rare, dato il maggiore spazio a disposizione.



Nota: per i ventilatori si usano anche motori asincroni a rotore esterno.

## Rotore esterno

Inoltre, piccoli motori brushless a rotore esterno sono impiegati per gli hard-disk drive dei computer: in questo caso, l'ampio diametro aiuta ad aumentare l'inerzia, che a sua volta aiuta a mantenere costante la velocità di rotazione.

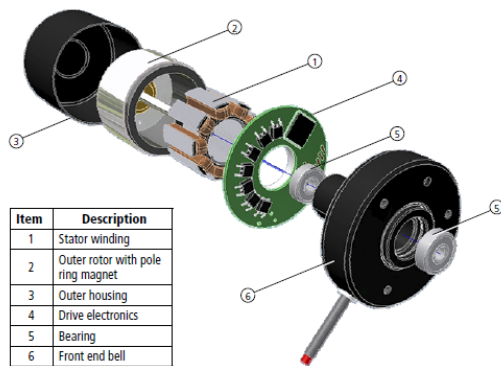


Altro esempio di motore brushless a rotore esterno:



## Rotore esterno

Altri esempi di motori brushless a rotore esterno:



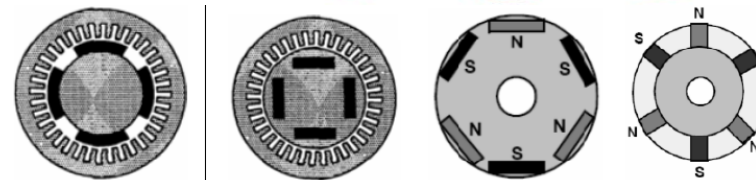
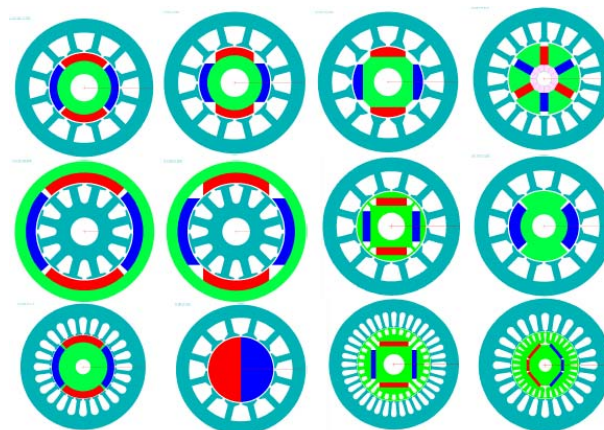
Item	Description
1	Stator winding
2	Outer rotor with pole ring magnet
3	Outer housing
4	Drive electronics
5	Bearing
6	Front end bell



Questo motore è usato per una bicicletta elettrica.

## Caratteristiche costruttive

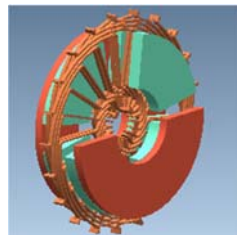
I magneti possono essere in varie forme (strisce, archi, dischi) e possono essere pre-magnetizzati (o meno): generalmente, i magneti ad alta energia sono assemblati già pre-magnetizzati, mentre i magneti a bassa energia possono essere magnetizzati dopo l'assemblaggio.



## Rotore a disco

Esistono anche **motori brushless a disco**, che presentano un traferro assiale.

I magneti si trovano su un lato del disco che funge da rotore, mentre sullo statore gli avvolgimenti sono costituiti da un circuito stampato.





I vantaggi di questi motori sono:

- ✓ un basso costo,
- ✓ la forma piatta,
- ✓ rotazione senza problemi di *cogging*.

Il traferro è relativamente elevato, il che implica un elevato flusso magnetico di dispersione e quindi basso rendimento. Tuttavia, le applicazioni relative richiedono un basso valore di coppia, pertanto le scarse prestazioni non costituiscono un problema.

Di seguito si riporta una sintesi dei confronti tra le caratteristiche dei motori brushless isotropi e anisotropi e tra quelle dei motori a controllo trapezio e sinusoidale.

41

	Non Salient Pole	Salient Pole
	SPM 	IPM 
	Constant Inductance (except heavy loads)	Inductance a function of position
	Low inductance gives high chopping frequency	<i>d</i> -axis (magnet axis) usually low permeance (L)
	Low inductance gives limited field weakening	<i>q</i> -axis (interpolar) usually high permeance (L) that decreases rapidly under load (saturation)
	square wave drive and unipolar (low cost) possible	saliency gives reluctance torque
	sensorless operation common	make use of reluctance torque by phase advance
		phase advance also weakens <i>d</i> -axis flux allowing higher speeds for fixed voltage
		flux weakening makes possible constant-power characteristic (traction and spindle drives)
		phasor diagram applicable – can use vector (field oriented) control theory
		strong saturation effects make FEA more important for accurate performance prediction

42

Sine wave	Square wave
good control performance	original brushless dc - equivalent to dc commutator motor
low torque ripple	torque ripple due to commutation
encoder or sensorless	Hall feedback
3 phases conduct at any time (3 of 6 conductors) - 180 degree conduction	2 phases conduct at any one time (2 of 6 conductors) PWM current regulation - 120 degree conduction
classical phasor theory applicable	phasor diagram not applicable
salient pole construction possible	non salient pole due to torque ripple
can use field weakening to obtain constant power characteristics	phase advance for increased speed (larger torque ripple)
can use ring or Halback magnets	surface magnets typical - flat top (trapezoidal) emf
distributed and fractional slots/pole windings for sinusoidal back emf and low cogging	concentrated winding, fractional slots/pole windings (reduced cogging) or non fractional (trapezoidal emf)

43