O motor síncrono com magnetos permanentes

P. Gonçalves Baiona
C. Pereira Cabrita
Instituto Superior Técnico / Secção de Máquinas Eléctricas e Electrónica de Potência / Laboratório de Mecatrónica

Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa Laboratório de Mecatrónica

summary

The permanente magnet synchronous motor, called "brushless d. c. motor", is relatively new as an industrial fact, and presents some advantages such as a good efficiency and a higher power factor. This type of machine is in progress mainly because the developments in permanent magnetic materials.

A comparison between dimensions of three-phase brushless d.c. motor built with samarium-cobalt and neodimium-iron-boron, is presented in this paper, and a similar analysis about moment of inertia is also made.

resumo

Os motores síncronos de relutância com magnetos permanentes, designados comummente na literatura especializada anglo-saxónica por "brushless-DC motors", têm vindo a ser implementados em larga escala na indústria em accionamentos de pequena potência, uma vez que apresentam um conjunto significativo de vantagens comparativamente com os seus homólogos convencionais. Neste trabalho salientam-se essas vantagens e apresenta-se um estudo comparativo para máquinas com diferentes materiais magnéticos.

1. Introdução

Os motores " brushless DC", quando comparados com os seus homólogos convencionais, apresentam as seguintes vantagens:

- Menor volume e menor peso.
- Maiores induções no entreferro.
- Menor inércia.
- Maior rendimento.
- Maior factor de potência.

O desenvolvimento deste tipo de motor é devido aos progressos tecnológicos no domínio dos materiais magnéticos permanentes [1]. Inicialmente utilizaram-se magnetos metálicos, tendo posteriormente sido adoptados os magnetos cerâmicos (ferrites) e, hoje em dia, os magnetos de terras raras. Em relação a estes últimos, generalizou-se a utilização do samário-cobalto. No entanto, o seu elevado custo levou à procura de outros materiais de terras raras mais baratos [2], tendo surgido muito recentemente o neodímio-ferro-boro, com características magnéticas francamente mais favoráveis que as do samário-cobalto [3, 4, 5]. Como tal, apresenta-se um estudo comparativo em termos de diâmetro, comprimento, volume e inércia do rotor para uma máquina com a mesma potência mas com o rotor construído com magnetos samário-cobalto e de neodímio-ferro-boro. Este estudo é baseado num outro realizado para motores de corrente contínua, e que se encontra exposto na Ref. [1].

2. Motores "Brushless DC" com magnetos de SmCo e de NdFeB

2.1 - Equações de cálculo

Impondo que, em ambas as situações, a potência é a mesma bem como o número de pólos, tem-se:

- A mesma corrente nos enrolamentos do estator.
- O mesmo número de espiras nos enrolamentos do estator.
- O mesmo tipo de enrolamento.
- O mesmo fluxo no entreferro.

Admite-se ainda que o factor de relutância e de dispersão são ambos iguais à unidade e supõe-se que em ambos os casos os dois magnetos estão dispostos radialmente no rotor, como se esquematiza na figura 1, sendo g o entreferro, l a altura dos magnetos, c a espessura do anel rotórico em ferro, D_e o diâmetro exterior do rotor e D_i o diâmetro inferior do rotor.

Por conseguinte, virá:

a) Fluxo no entreferro

Para uma máquina bipolar, é dado por

$$\phi = B\,\tau\,L = B\,\frac{\pi D_e}{2}\,L \qquad (1)$$

sendo B o valor médio da densidade de fluxo no entreferro, τ o passo polar e L o comprimento axial da máquina.

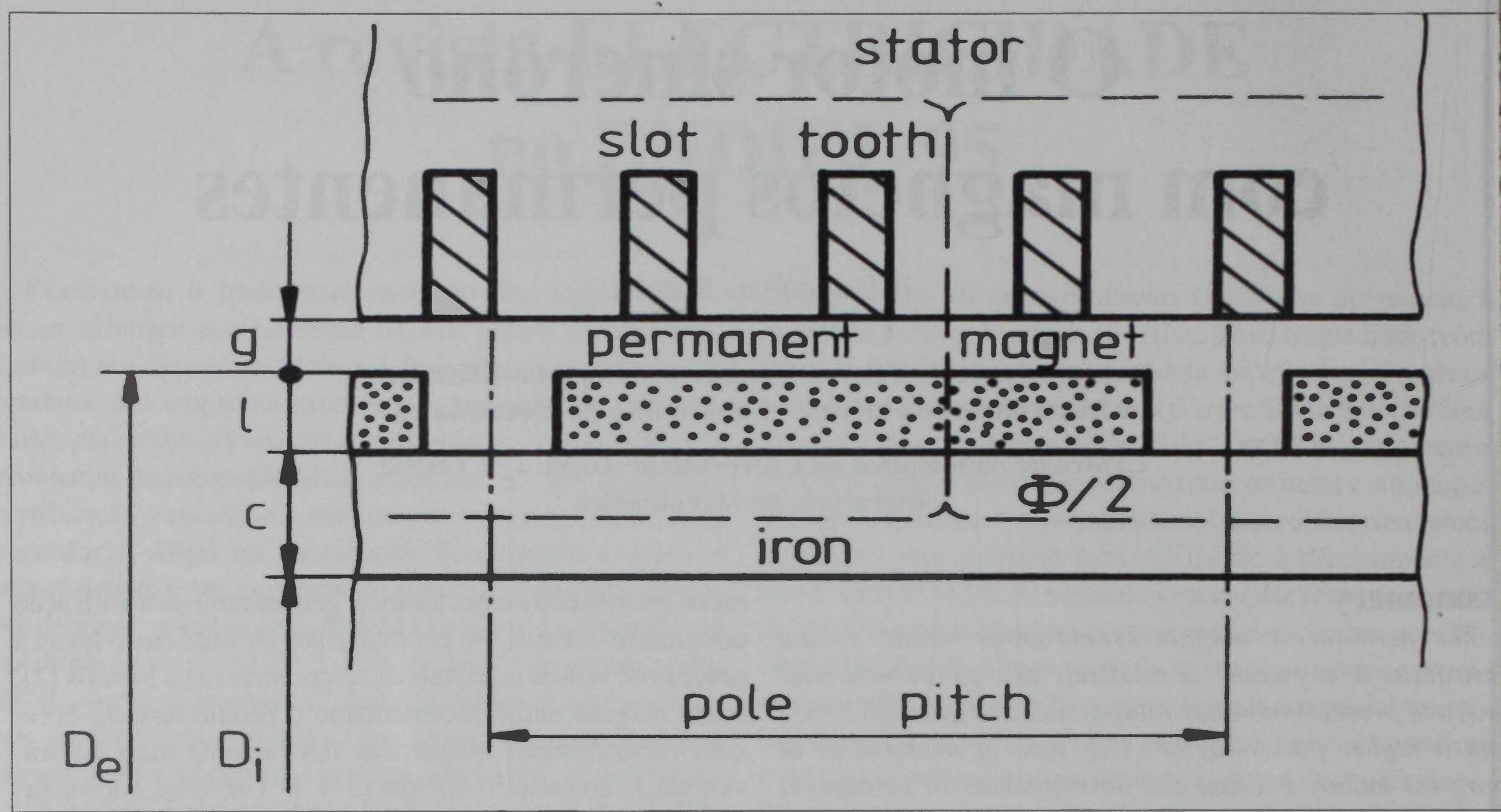

Fig. 1 - Dimensões típicas do rotor de um motor "brushless DC".

b) Espessura do anel rotórico em ferro

Atendendo à figura 1, tem-se

$$\frac{\phi}{2} = B_{Fe}\, c\, L \qquad (2)$$

ou seja, substituindo ϕ pela exp. (1),

$$\frac{1}{2} B \frac{\pi D_e}{2} L = B_{Fe}\, c\, L \qquad (3)$$

sendo B_{Fe} o valor máximo da densidade de fluxo no ferro, no limite da saturação, e c a espessura mínima do anel em ferro. Por conseguinte,

$$c = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{B}{B_{Fe}} D_e \qquad (4)$$

c) Entreferro

Para ambos os casos considera-se que

$$g = 0{,}04\, D_e \qquad (5)$$

d) Comprimento radial dos magnetos

De acordo com o método do volume mínimo de material, deduzido na Ref. [1], o comprimento mínimo dos magnetos, atendendo às hipóteses consideradas anteriormente, é

$$l = -\frac{B_m}{\mu_0 H_m} g \qquad (6)$$

sendo B_m e H_m respectivamente a densidade de fluxo e a intensidade do campo magnético correspondentes ao ponto de funcionamento do material magnético permanente em relação ao qual o volume do magneto é o mínimo possível [1]. Saliente-se que B_m corresponderá assim ao campo de indução no entreferro, B, nas expressões (1), (3) e (4), uma vez que se admite não haver dispersão no entreferro. Considerando a exp. (5) tem-se assim,

$$l = -0{,}04 \frac{B}{\mu_0 H} D_e \qquad (7)$$

e) Volume do rotor

Atendendo à figura 1 tem-se

$$V = \frac{\pi (D_e^2 - D_i^2)}{4} L \qquad (8)$$

sendo,

$$D_i = D_e - 2(l + c) \qquad (9)$$

f) Momento de inércia

É dado por

$$J = \frac{m D^2}{4} \qquad (10)$$

sendo m a massa do rotor e D o seu diâmetro de inércia. Como

$$m = Vd \qquad (11)$$

$$D^2 = \frac{1}{2} (D_e^2 + D_i^2) \qquad (12)$$

em que d é a densidade do rotor, se se atender que

$$d_{ndFeB} \approx d_{Sm\,Co} \approx d_{Fe}$$

e ainda à eq. (8), virá

$$J = \frac{\pi}{32} d_{Fe} (D^4 - D_i^4) L \qquad (13)$$

Note-se que

$$d_{Nd\,Fe\,B} = 7{,}4 \text{ g/cm}^3,$$
$$d_{Sm\,Co} = 8{,}2 \text{ g/cm}^3$$
$$d_{Fe} = 7{,}9 \text{ / cm}^3$$

2.2 - Valores comparativos

Utilizando o método da linha de carga [1], cuja construção se mostra na figura 2, para dois materiais magnéticos permanentes [4, 5] - VACOMAX 170 ($Sm\,Co_5$) e VACODYM 370 ($Nd_2\,Fe_{14}\,B$), obtêm-se os pontos ideais de funcionamento, P e Q, cujas coordenadas são respectivamente,

- Ponto P (VACOMAX 170) $\begin{cases} B = 0{,}48 \text{ T} \\ H = -350 \text{ kA/m} \end{cases}$
- Ponto Q (VACODYM 370) $\begin{cases} B = 0{,}63 \text{ T} \\ H = -480 \text{ kA / m} \end{cases}$

Quanto ao ferro, toma-se o valor B_{Fe} = 1,5 T, ao qual corresponde o início da sua saturação. Por conseguinte, atendendo a estes valores e às equações anteriores, apresentam-se nos Quadros I e II os valores relativos para as duas máquinas, correspondentes às seguintes situações:

- Quadro I - As duas máquinas têm o mesmo comprimento.
- Quadro II - A máquina com VACODYM 370 é dimensionada com um comprimento igual a 85% do comprimento da máquina com VACOMAX 170.

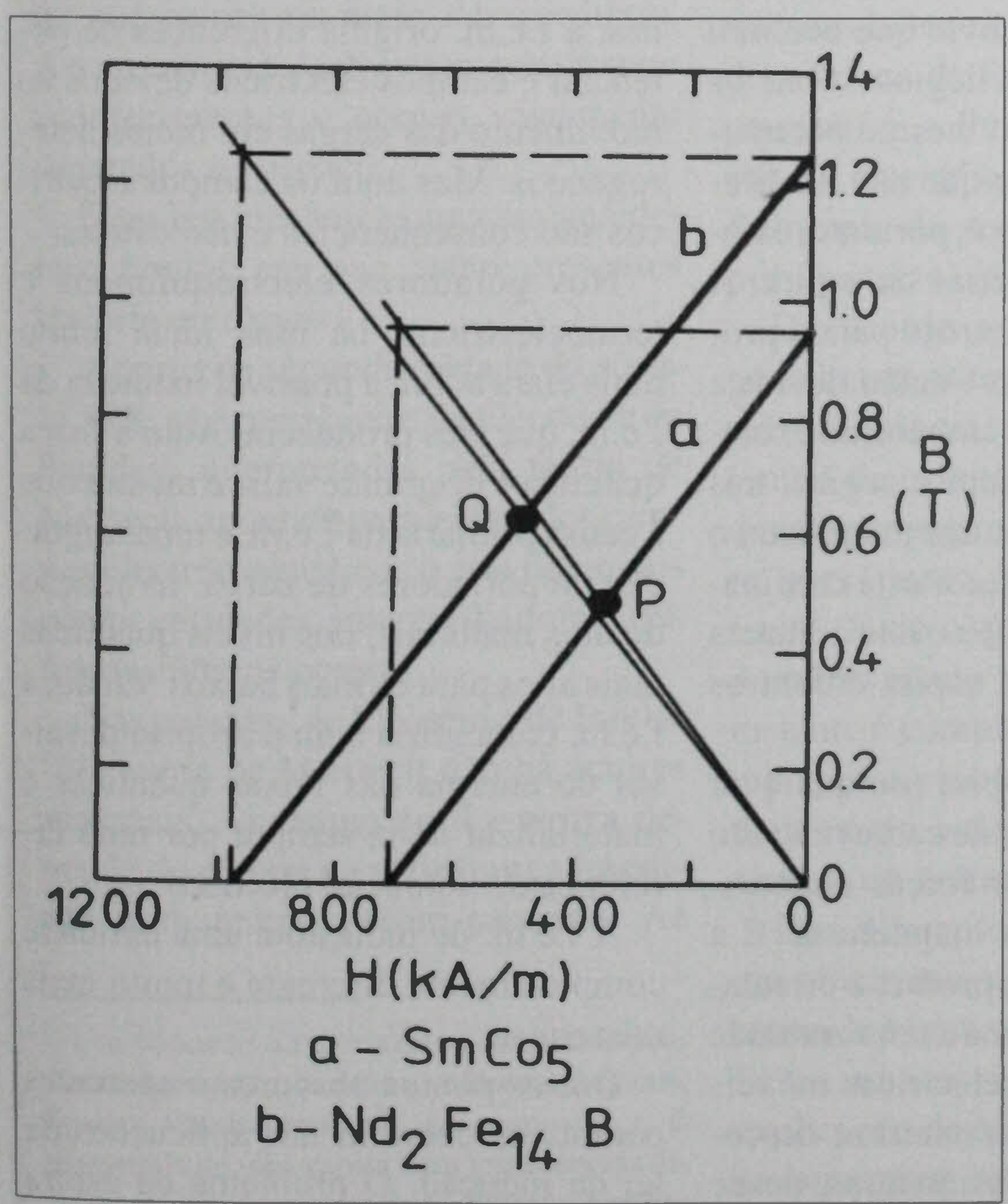

Fig. 2 - Características de desmagnetização do VACOMAX 170 ($SmCo_5$) e do VACODYM 370 ($Nd_2\,Fe_{14}\,B$).

Quadro I

Motor	L	De	V	J
VACOMAX 170	100%	100%	100%	100%
VACODYM 370	100%	76%	65%	34%

Quadro II

Motor	L	De	V	J
VACOMAX 170	100%	100%	100%	100%
VACODYM 370	85%	90%	77%	57%

3. Conclusões

Além das vantagens absolutas que os motores "brushless DC" apresentam, os valores resultantes da análise comparativa que se efectuou colocam em destaque o interesse em utilizar-se materiais magnéticos permanentes neodímio-ferro-boro, na medida em que, além de serem mais baratos que o samário-cobalto, apresentam uma característica de desmagnetização mais favorável, permitindo construir as máquinas com um menor volume de material. Além disso, o método teórico apresentado é seguro, como se comprova experimentalmente através dos valores comparativos, relativos a motores de fabrico Alsthom, que se encontram expostos no QUADRO III. Observe-se a quase identidade destes valores com os que se obtiveram teoricamente.

Quadro III

Motor	L	De	J
LC 420 TL	1	1	1
LC 320 TE	1	0,73	0,33
GC 19 TE	1	1	1
GC 15 TB	0,83	0,84	0,44

REFERÊNCIAS

[1] A. L. Rodrigues, "*Os materiais permanentes na construção de máquinas eléctricas*", Electricidade n.º 245, Maio 1988, p. 201-211.

[2] "*Magnetos permanentes*", Electricidade n.º 245, Maio 1988, p. 212.

[3] Francis Le Prince-Ringuet, "*Aimants permanents*", Techniques de l'Ingénieur, D187.

[4] VACOMAX, Permanent Magnets on RE Co Base. Folheto técnico de Vacumschmelze, Alemanha.

[5] VACODYM, Permanent Magnets based on Ne-Fe-B. Idem.