

Novo Motor Eléctrico de Relutância com Material Supercondutor no Rotor

A. Leão Rodrigues

Departamento de Engenharia Electrotécnica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2825-114 Caparica PORTUGAL

E-mail: leao@uninova.pt Tel: +351 212948545 Fax: +351 21294 8532

Resumo

O artigo apresenta a modelação por meio de Elementos Finitos do projecto de motores de relutância usando materiais supercondutores cerâmicos do tipo-II colocados no rotor. São analisados dispositivos com configurações diferentes e é determinado o correspondente valor do binário electromagnético produzido.

Para validar a análise, apresentam-se os resultados experimentais efectuados num motor de relutância de 2 kW com rotores de configuração diferente e usando o mesmo estator. Os resultados mostram que, quando os supercondutores são arrefecidos com azoto líquido a 77 K, a potência mecânica no veio é cerca de 4 a 5 vezes maior do que a observada no motor clássico equivalente.

Palavras-chave: Aplicação de materiais supercondutores de alta temperatura. Supermáquinas.

1. Introdução

A teoria do motor eléctrico de relutância convencional é hoje sobejamente conhecida [1]. Estes motores encontram actualmente inúmeras aplicações industriais devido à sua simplicidade construtiva, robustez e facilidade de comutação dos enrolamentos do estator por meio de circuitos electrónicos de potência (inversores). A sua principal desvantagem é exibirem um binário motor muito inferior ao binário do motor síncrono de pólos salientes equivalente.

Durante a última década surgiram inúmeras variantes na configuração dos rotores dos motores de relutância no sentido de incrementar tanto o seu rendimento como o binário motor [2]. Recentemente, vários grupos de investigação [3] têm explorado a possibilidade de utilizar materiais supercondutores na construção de motores eléctricos, e em particular de motores de relutância, com vista a obter uma melhor potência específica.

Quando um material supercondutor é arrefecido a uma temperatura abaixo da sua temperatura crítica T_c , o material fica capaz de conduzir correntes eléctricas de alta intensidade sem qualquer dissipação de calor. O fenómeno da supercondutividade foi descoberto em 1911 no mercúrio por K. Onnes. Vários elementos e ligas metálicas (índio, nióbio-titânio, etc.) exibem supercondutividade (supercondutores de 1ª geração) mas a sua temperatura crítica nunca ultrapassou os 23 K, pelo que são normalmente arrefecidos por meio de hélio líquido, que é bastante oneroso. Esta situação modificou-se em 1986 quando Bednorz e Müller [4], descobriram que a estrutura cerâmica de perovskite apresentava supercondutividade a uma temperatura crítica mais alta que a de qualquer supercondutor metálico da 1ª geração. Uma das melhores destas estruturas é

uma combinação de ítrio (Y), bário (Ba) e óxido de cobre (CuO), conhecido por YBaCu, que foi descoberta em 1987 por Paul Chou, que exhibe uma temperatura crítica de 93 K superior à temperatura de liquefação do azoto.

Os materiais supercondutores cerâmicos de alta temperatura (SAT) de 2ª geração do tipo-II, quando arrefecidos a azoto líquido (muito mais barato do que o hélio líquido), podem transportar densidades de corrente muito maior do que as suportadas pelo cobre (aproximadamente 10^7 A/m²) e, por isso, o seu emprego na construção de máquinas eléctricas dá origem a uma miniaturização e melhoria do seu rendimento. Os SAT são no entanto materiais muito quebradiços e difíceis de maquinar. Por isso, as máquinas eléctricas que incorporam supercondutores na sua construção deverão ter uma configuração especial a fim de eliminarem os esforços mecânicos que se manifestam nestes materiais.

2. Produção do binário de relutância no motor convencional

A figura 1 mostra a distribuição da densidade de fluxo produzida pelo enrolamento do estator, obtida por meio de um pacote comercial de Elemento Finitos, de um motor de relutância convencional quando o eixo longitudinal do rotor faz com o eixo magnético do estator um ângulo de carga θ . Devido à saliência do rotor, o coeficiente de auto indução $L(\theta) = n^2 \mathcal{P}(\theta)$ do enrolamento estatórico de n espiras sofre uma variação do seu valor uma vez que a permeância do circuito magnético $\mathcal{P}(\theta)$ é função da posição angular do rotor.

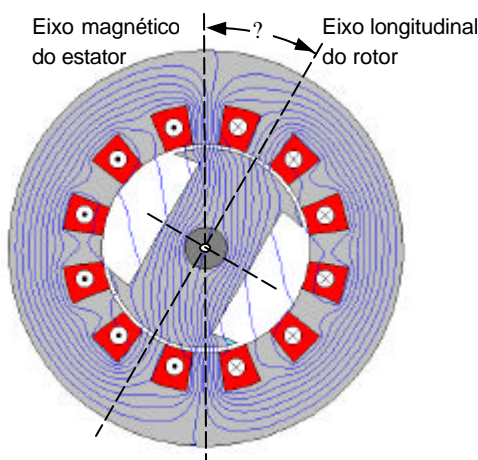


Fig. 1 - Distribuição do fluxo magnético num motor de relutância clássico

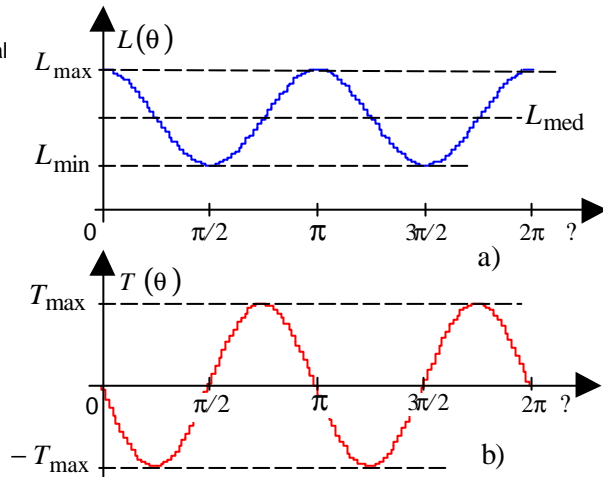


Fig.2 - Variação de $L(\theta)$ e $T(\theta)$ do motor de relutância com o ângulo de carga

Quando o eixo longitudinal do rotor se encontra coincidente com o eixo magnético do enrolamento do estator ($\theta = 0$), o coeficiente de auto indução do enrolamento atinge o valor máximo por ser máxima a permeância encontrada pelo fluxo magnético. Em contrapartida, quando o eixo principal do rotor se encontra em quadratura com o eixo magnético do enrolamento ($\theta = 90^\circ$ *Elect*), o coeficiente de auto indução atinge o valor mínimo. Para uma posição genérica θ do rotor e admitindo uma variação sinusoidal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, a variação do coeficiente de auto indução $L(\theta)$ do enrolamento com a posição angular θ do eixo principal do rotor ao longo de uma rotação completa escreve-se

$$L(\theta) = \frac{1}{2}(L_{\max} + L_{\min}) + \frac{1}{2}(L_{\max} - L_{\min})\cos 2\theta \quad (1)$$

cujo andamento está representado na figura 2a. A referência [2] indica que o binário de relutância desenvolvido no rotor quando o enrolamento do estator é alimentado por uma corrente eficaz constante I é dado pela expressão $T(\theta) = (1/2)I^2 dL(\theta)/d\theta$. Atendendo a (1), resulta para o caso do motor de relutância trifásico

$$T(\theta) = -\frac{3}{2} \cdot I^2 (L_{\max} - L_{\min}) \text{sen} 2\theta \quad (2)$$

No caso do motor trifásico de relutância alimentado a tensão eficaz U constante e frequência $\omega = 2\pi f$, (2) toma a forma

$$T(\theta) = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{\omega^2 L_{\max} L_{\min}} (L_{\max} - L_{\min}) \text{sen} 2\theta \quad (3)$$

No funcionamento do motor a corrente ou a tensão eficaz constante, (2) e (3) mostram que o valor máximo do binário de relutância é tanto maior quanto maior for a diferença $(L_{\max} - L_{\min})$ entre os coeficientes de auto indução L_{\max} do eixo longitudinal e L_{\min} do eixo transversal do rotor. O binário de relutância está representado na figura 2b em função do ângulo de carga θ e mostra que o binário de relutância descreve dois ciclos durante uma rotação completa do rotor, atingindo o valor máximo para valores de $\theta = (k+1)(\pi/4)^\circ$ onde $k = 0, 1, 2, \dots$

3. Modelo do motor de relutância com material supercondutor no rotor

Nos últimos anos têm surgido vários artifícios no sentido de construir o rotor do motor de relutância de modo a otimizar a diferença $(L_{\max} - L_{\min})$. Uma nova possibilidade promissora, é incorporar no rotor um material supercondutor. Sendo o supercondutor um material diamagnético ele pode ser utilizado como uma blindagem ao fluxo magnético numa determinada direcção. Então, colocando criteriosamente o material supercondutor no rotor de tal forma que o fluxo segundo o eixo transversal fique bloqueado, a permeância transversal vem diminuída e conseqüentemente diminui o valor de L_{\min} . O fluxo segundo o eixo longitudinal do rotor deve encontrar uma alta permeância de forma a que o valor de L_{\max} seja o maior possível, aumentando assim a diferença $(L_{\max} - L_{\min})$ e conseqüentemente o binário motor.

Uma configuração possível e de construção robusta consiste em colocar dois blocos de YBaCu perpendicularmente ao eixo transversal do rotor. Os blocos são colados às faces laterais do rotor, ou fixos por meio de um encaixe, como ilustra a figura 3. A figura 4

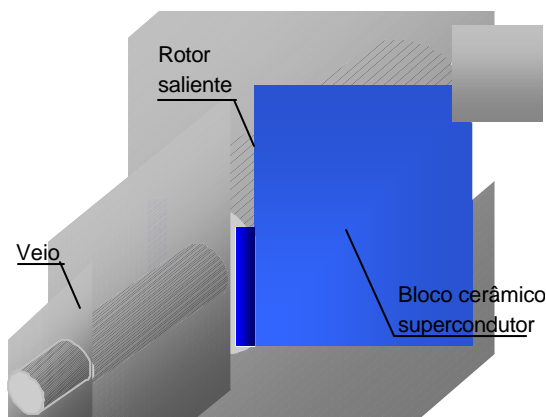


Fig. 3 - Rotor supercondutor do tipo saliente

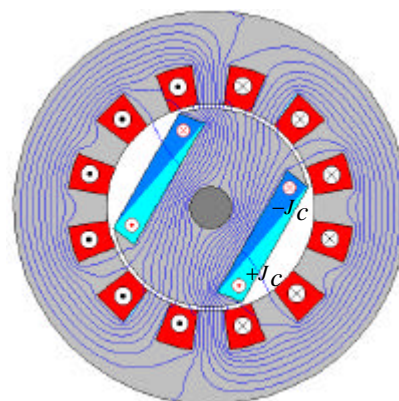


Fig. 4 - Distribuição do fluxo magnético

mostra a distribuição do fluxo magnético no rotor supercondutor do tipo saliente. Comparando com a figura 1 observa-se que o fluxo de dispersão vem mais reduzido graças à blindagem feita pelo supercondutor. Note-se que a blindagem do fluxo transversal ao rotor é conseguida à custa de correntes superficiais $+J_c$ e $-J_c$ que se fecham axialmente em cada bloco.

Outra geometria possível, é construir o rotor com uma configuração cilíndrica, mas colocando alternadamente blocos de ferro macio e blocos de material supercondutor cerâmico, como ilustra a figura 5. Neste rotor composto, os blocos de ferro macio são um caminho fácil ao fluxo magnético segundo o eixo longitudinal e os blocos de material supercondutor formam uma barreira à sua trajectória segundo o eixo transversal contribuindo assim para uma maior diferença ($L_{\max} - L_{\min}$), entre os coeficientes de auto indução e conseqüentemente para um maior binário motor.

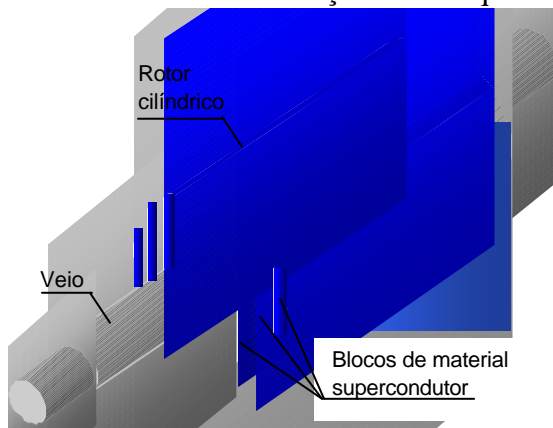


Fig. 5 - Aspecto construtivo do rotor do tipo composto

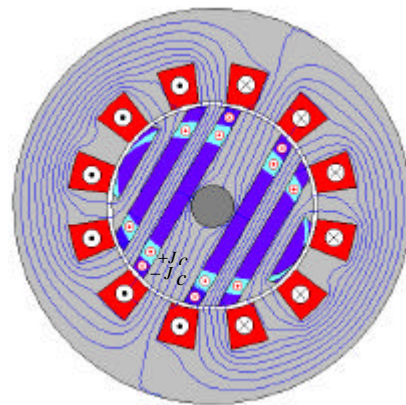


Fig. 6 - Distribuição do fluxo no motor de rotor do tipo composto

O rotor do tipo composto é mecanicamente mais equilibrado do que o rotor saliente mas é, obviamente, de construção mais onerosa. A optimização do seu binário é atingida quando a espessura dos blocos de material supercondutor é igual à espessura dos blocos de ferro. No entanto, a existência do veio obriga a que o bloco central tenha uma espessura maior do que a dos restantes blocos.

A figura 6 ilustra a distribuição do fluxo magnético produzido pelo campo girante do estator através do motor de rotor do tipo composto. Pode notar-se que os blocos supercondutores do tipo II criam uma barreira ao fluxo transversal ao rotor. Para isso, tal como no rotor supercondutor do tipo saliente, são sede de correntes superficiais $+J_c$ e $-J_c$ que penetram nos blocos supercondutores até cerca de metade do raio do rotor e se fecham também axialmente em cada bloco [5].

4. Motor síncrono de rotor saliente com material supercondutor pré magnetizado

No motor de relutância supercondutor, a penetração do fluxo no material cerâmico é relativamente pequena, deixando uma boa parte do volume do material inactivo. A fim do rotor armazenar fluxo, tal como acontece num magneto permanente, é necessário ligar os extremos dos blocos supercondutores de forma a constituir um solenóide de uma única espira à volta rotor, como mostra a figura 7. A figura 8 mostra a distribuição do fluxo magnético devido ao fluxo armazenado no solenóide supercondutor e ao fluxo produzido pelo estator. Depois da pré magnetização, o rotor fica magnetizado na direcção longitudinal devido às super-correntes $+J_c$ e $-J_c$ que circulam mais profundamente no material supercondutor. O fluxo criado pelo solenóide é algumas

vezes superior ao fluxo criado pelo melhor magneto permanente com o mesmo volume do supercondutor. O motor apresenta neste caso, além da componente de binário de relutância $T_R = A.\text{sen}2\theta$, uma componente substancial de binário devida à excitação do rotor que tem agora a forma $T_E = B.\text{sen}\theta$.

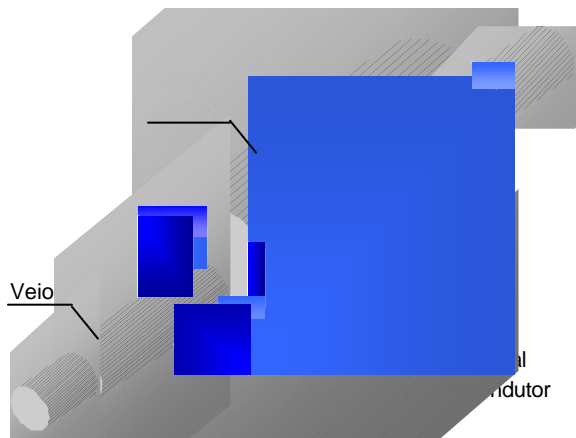


Fig. 7 - Rotor do motor síncrono de pólos salientes com supercondutor em circuito fechado

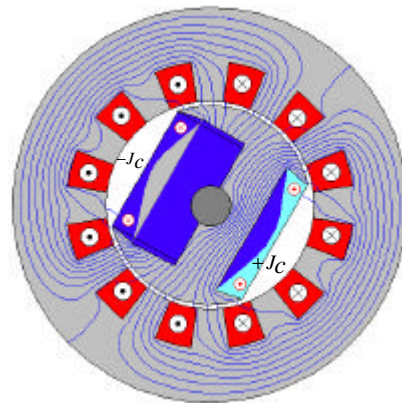
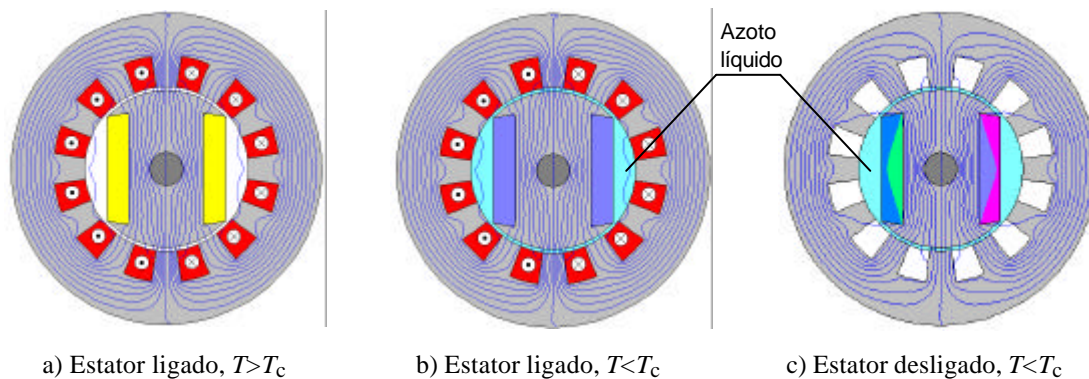


Fig. 8 - Distribuição do fluxo no motor síncrono pré-magnetizado

A figura 9 mostra a seqüência da pré-magnetização do solenóide supercondutor do rotor. Com o material cerâmico no estado normal, isto é, a uma temperatura $T > T_c$,



a) Estator ligado, $T > T_c$

b) Estator ligado, $T < T_c$

c) Estator desligado, $T < T_c$

Fig. 9 – Pré-magnetização por arrefecimento do rotor em presença do campo magnetostático.

injecta-se uma corrente estacionária no enrolamento do estator de forma a produzir um campo com um valor de cerca de duas vezes o campo normal produzido pelo campo girante. Isto garante a penetração total do campo no material [6]. Em seguida arrefece-se o material cerâmico, em presença do campo, abaixo da sua temperatura crítica T_c de forma a passar ao estado supercondutor. Finalmente, desliga-se o campo magnético criado pelo estator, de modo que a variação de fluxo dá origem a uma corrente induzida no supercondutor. O rotor fica então magnetizado como se fosse um super magneto. A magnetização mantém-se à custa da temperatura $T < T_c$ e da super corrente $+J_c$ e $-J_c$.

5. Resultados experimentais

A comparação do valor dos binários desenvolvidos nos três tipos de motores descritos relativamente ao binário produzido pelo motor clássico indicado na figura 1, está representada na figura 10. Os resultados mostram que o binário produzido pelo motor

de relutância supercondutor do *tipo saliente* é cerca de 1,5 vezes maior do que o binário produzido pelo motor de relutância convencional e o binário produzido pelo motor de relutância supercondutor do *tipo composto*, com cinco blocos de ferro e seis blocos de

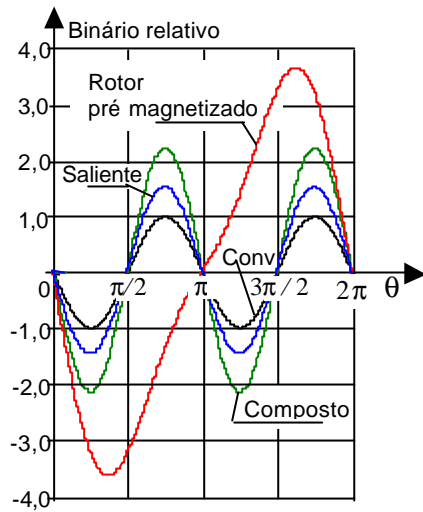


Fig. 10 – Binários relativos desenvolvidos

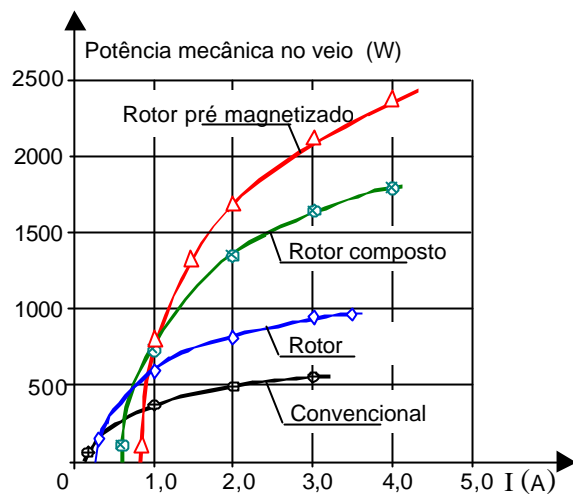


Fig. 11 – Potências no veio desenvolvidas

material supercondutor no rotor, é cerca de 2,2 vezes maior. O binário total $T = T_R + T_E$ desenvolvido no veio com a *pré magnetização* é cerca de 3,7 vezes maior do que o correspondente binário do motor de relutância convencional. A figura 11 mostra os resultados experimentais da potência no veio dos quatro tipos de rotores. Estes resultados estão de acordo com os valores experimentais obtidos por Kovalev [7].

6. Conclusões

Devido à sua simplicidade construtiva, os motores de relutância com material supercondutor de alta temperatura colocados no rotor poderão vir a ter, num futuro próximo, grande utilização prática. É evidente que para gerarem binários mais elevados do que os motores convencionais equivalentes, o rotor necessita de ser arrefecido a uma temperatura abaixo da temperatura crítica do supercondutor. No entanto, em locais onde existam instalações de azoto líquido ou hidrogénio líquido, como no caso dos crioplanos, estes motores poderão vir a ser sérios competidores dos motores clássicos.

Referências :

- [1] - Miller T. J. E., *Switched Reluctance Motors and their Control*, Oxford Science Pub. 1993.
- [2] - Match L. W. et al, *Electromagnetic an Electromechanical Machines*, Wiley & Sons, 1986.
- [3] - Depart. Engineering Science University of Oxford, U.K.; Moscow State Aviation Institute, Moscow, Russia; Institut fuer Physikalische Hochtechnologie, Jena, Germany, Institute de Ciencia de Materials de Barcelona, Bellaterra, Spain; DEE-FCT/UNL, Caparica, Portugal.
- [4] - Bednorz J.G., Müller K. A. *Z. Phys. B* 64 189.
- [5] - Barnes G. J., McCulloch M., Dew-Hughes D. *Applications and modelling of bulk HTS in brushless AC machines*, Supercond. Sci. Technology, **13** 875-878, 2000.
- [6] - Barnes G J, *Computational modelling for type-II superconductivity and the investigation of high temperature superconducting electrical machines*, Ph.D. Thesis, Oxford Univ., 2000.
- [7] - Kovalev L. K. et al, *Theoretical and experimental study of magnetisation and hysteresis process in single grain YBCO sphere and bulk melt textured YBCO ceramics*, Seminar on High Temperature Superconductivity, Jena, German, September 22-25, 1999.