

FREIO ELETROMAGNÉTICO APLICADO AS MÁQUINAS ELÉTRICAS DE INDUÇÃO PARA ENSAIOS EM CARGA VARIÁVEL

Adriano Holanda Pereira, Dr. Henrique Antunes Cunha, Dr. Ricardo Silva Thé Pontes

Universidade Federal do Ceará

LAMOTRIZ – Laboratório de otimização de sistemas motrizes industriais

[Adriano, ricthe, hcunha]@dee.ufc.br

Abstract – This work presents the development of a electromagnetic brake and electric converter for feeding it made by the Laboratory of Motors Systems. The brake is used in an induction motors educational tests, simulating variable torque load. The tests in laboratory will represent real industrial mechanical loads.

Keywords - buck converter, efficiency, electromagnetic brake, induction machine, motors test, rectifier non-isolated.

I. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas de indução trifásica são predominantes em aplicações industriais, sendo destinadas ao acionamento de uma grande diversidade de cargas. Para a representação em laboratório das condições reais de operação é fundamental a execução de ensaios dinâmicos que possibilitem a caracterização quanto à potência, torque, demandas de corrente, aquecimento, eficiência energética de conversão do sistema máquina elétrica de indução – inversor de tensão. Para obtenção destas características se faz necessário um dispositivo de ensaio com torque variável capaz de representar as diversas condições de carga.

Os ensaios de torque e velocidade, sob condições nominais de operação, podem ser realizados com a utilização de um dinamômetro [1]. Outro modo é através do acoplamento entre o motor, um gerador conectado a um conjunto de cargas. Entretanto, um perfil dinâmico de carga pode ser diretamente aplicado ao eixo do motor por meio de um dispositivo de frenagem. A ordem do torque máximo previsto para o sistema será de 50,0Nm, para ensaios em laboratório.

Para ensaio dos sistemas compostos por inversor – máquina de indução a característica do freio de carga da máquina deve possibilitar a aferição das grandezas de torques dinâmicos aplicados. É de grande praticidade de ensaio de laboratório se a característica do torque de freio for linear com a corrente de entrada.

Este trabalho é uma das atividades que estão em desenvolvimento pelo Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ –UFC) dentre os estudos de eficiência energética de consumidores industriais no Estado, bem como sistemas motrizes Industriais do Ceará.

II. DESENVOLVIMENTO

Os ensaios de motores elétricos com carga são essenciais para a determinação das condições operacionais mecânicas e elétricos destes motores. Quanto mais próximo da condição de operação real mais significativo será o ensaio.

As cargas reais podem ser representadas, em laboratório, por funções conhecidas e impostas ao motor por meio de um dispositivo de frenagem eletronicamente controlado. O dispositivo deve ser capaz de seguir perfis de cargas industriais típicas, predefinidos pelo controle.

A. O Freio Eletromagnético

O freio eletromagnético é composto por um disco metálico, um eixo de fixação do disco ao motor, dois hemisférios e um conjunto de bobinas. A figura 1 representa a disposição das bobinas sobre o rotor. O disco, de permeabilidade magnética μ e condutividade elétrica σ , ao girar sob a influência do campo magnético transfere torque de frenagem ao eixo do motor. Antes da condição de saturação, cada pólo produz um fluxo magnético proporcional a corrente de excitação que percorre as bobinas. A operação na etapa linear da curva de magnetização é almejada com o intuito de verificar a validade das aproximações propostas para o modelo.

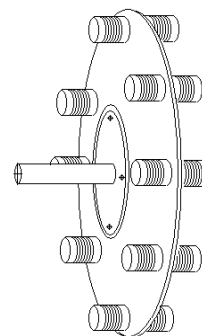


Fig. 1. Vista em perspectiva do rotor e das bobinas sem a estrutura de sustentação das bobinas estacionárias.

Para efeito de análise inicial os materiais utilizados na construção do disco são considerados paramagnéticos e isotrópicos. A indução magnética possui dependência não linear diante do campo magnético. A velocidade com que o campo magnético é alterado afeta o resultado.

A falta de uma solução analítica capaz de modelar completamente o comportamento das não linearidades magnéticas do disco de freio não inviabiliza o desenvolvimento do dispositivo. Na condição estática o dispositivo apresenta solução clássica. Um primeiro modelo para o desempenho da força de frenagem decorre da força de Lorenz aplicada para a atração eletromagnética, dada por (1) sendo que em [2], [4] e [6] são propostos ajustes para esta solução.

$$F = \sigma \cdot v \cdot B^2 \cdot vol \quad (1)$$

O fluxo pontual no disco é inicialmente aproximado por uma função senoidal do tempo descrito em (2):

$$\phi(t) = \phi_0 \cdot \sin\left(\frac{p \cdot n \cdot t}{60}\right) \quad (2)$$

Sendo:

σ - condutividade;

v - velocidade tangencial de rotação do disco;

B - densidade de fluxo magnético;

vol - volume do disco;

p - pares de pólos de bobinas de freio;

n - revoluções por minuto;

t - tempo;

Para a análise da condição dinâmica foram utilizados diversos modelos encontrados na literatura técnica [2]-[7], [10]-[12]. Após a identificação da proposta que mais se aproximar do resultado experimental, será sugerido um método de ajuste para a definição de um modelo mais preciso. O comportamento magnético do freio será descrito através relutância \mathfrak{R} em função da velocidade angular de rotação ω dada por (3), assim como o torque de frenagem em (4) com base na proposta apresentada por [11] e [12]:

$$\mathfrak{R} = \frac{c_1 + c_2 \cdot \omega + c_3 \cdot \omega^3}{1 + c_4 \cdot \omega^2} \quad (3)$$

$$T = \frac{k_i \cdot \omega}{\left(1 + \frac{k_2 \cdot \omega^2 + k_5 \cdot \omega^4}{1 + k_4 \cdot \omega + k_5 \cdot \omega^3}\right)^2} \quad (4)$$

No projeto do freio eletromagnético foi avaliado o a relação entre momento de inércia do disco e do motor, assim como a melhor localização para as bobinas de campo. As bobinas de campo estão situadas na periferia do disco, formando pares em oposição de campo magnético, conforme ilustrado na figura 2 que mostra o par AA' e o par EE'.

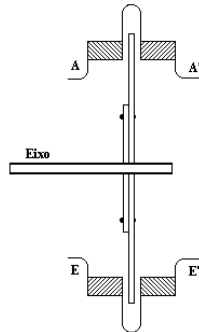


Fig. 2. Vista lateral do disco e de dois pares de bobinas

A disposição física das bobinas de campo é consequência de uma solução de compromisso entre o maior torque de frenagem alcançado e o menor efeito de borda entre os pares de bobinas.

B. Dissipação de energia na frenagem

Uma alternativa para promover o controle da força de frenagem seria recorrer a um dispositivo de fricção mecanicamente acoplado ao eixo do motor. Entretanto a fricção dependa das superfícies em contato o que implica na necessidade materiais de elevada resistência ao desgaste. Já a utilização do freio por correntes induzidas dispensa essa necessidade, em contrapartida a potência é dissipada por efeito Joule. Em ambos os casos o disco de freio funciona

como um dissipador de calor, convertendo energia cinética da máquina primária em energia térmica. A área do disco é diretamente proporcional a sua capacidade de dissipação de calor. No freio eletromagnético a dissipação de energia na forma de calor decorre principalmente da soma das perdas causadas pela circulação das correntes de Foucault e perdas por histerese, conforme a equação (5):

$$p = \iiint_v \sigma \cdot E^2 dv + k_h \cdot f \cdot (B_{\max})^\alpha \quad (5)$$

Para evitar o aquecimento excessivo do disco pode-se recorrer a uma maior área para troca de calor, visto que o elevado torque em baixa velocidade implica num maior aquecimento. Dentre os materiais disponíveis, optou-se pela utilização do aço 1020 para a construção do disco de freio. Com objetivo de reduzir as perdas por histerese, o campo magnético máximo permaneceu abaixo da zona de saturação conforme a figura 3.

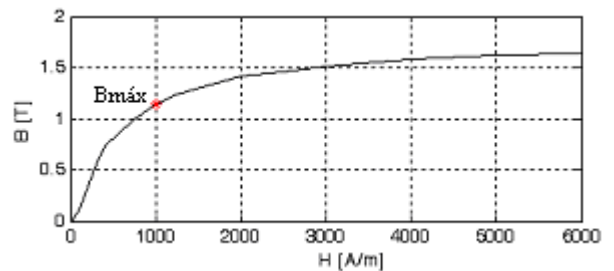


Fig. 3 - Curva de magnetização do aço 1020

C. Curvas de torque do freio

As curvas de torque em função da velocidade e da densidade de campo magnético, mostradas na figura 4, condizem com o obtido experimentalmente por [9] e [10].

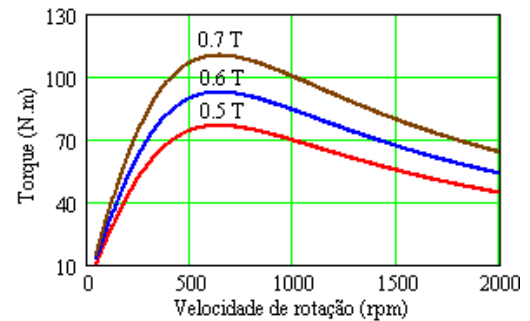


Fig. 4 - Torque de frenagem em função da velocidade e do campo magnético.

D. Fonte de alimentação das bobinas

A fonte de alimentação é composta por um retificador trifásico não controlado em ponte completa e de um conversor abaixador. O retificador trifásico encontra-se diretamente conectado a rede elétrica, dispensando assim o uso de transformador. O conversor abaixador opera no modo de condução contínua e tem como finalidade fornecer a energia necessária para a frenagem no motor de indução.

A figura 5 representa a fonte de alimentação que comporta-se como uma fonte de corrente proporcional ao sinal referência de tensão, V_{ref} . Este sinal é aplicado ao circuito de acionamento do interruptor principal do conversor

abaixador, definindo assim a forma de onda da corrente de alimentação das bobinas de campo do freio eletromagnético.

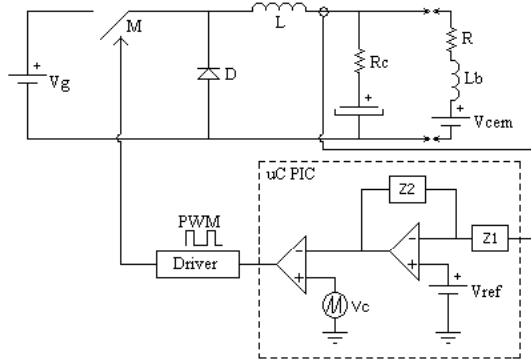


Fig. 5. Conversor buck com malha de controle de corrente média.

E. Controle

A estrutura de controle do conversor é representada pelo diagrama da figura 6. Como compensador é utilizado um controlador proporcional e integral. Os circuitos de amostragem, referência, controle e modulação são implementados em um único dispositivo digital de baixo custo da família de micro controladores PIC.

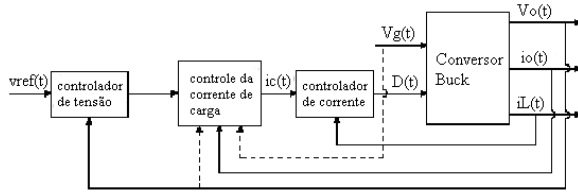


Fig. 6. Configuração do controle

O diagrama da planta de controle da corrente média na carga é visto na figura 7.

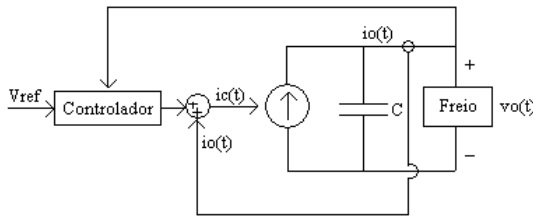


Fig. 7. Medida da corrente na carga.

Todas as funções de transferência do conversor são determinadas pelo modelo da chave PWM. Sendo a função de transferência em malha aberta dada pelo produto entre a função de transferência de conversor e do elemento de medida, conforme (6), e representada na figura 8 e figura 9.

$$FTMA(s) = G(s) \cdot H(s) \quad (6)$$

Para a implementação do controle é utilizada a função de transferência que relaciona a corrente nas bobinas e a variação de razão cíclica, conforme (7).

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{v_g \cdot (1 + s \cdot (R + R_C) \cdot C)}{R + s \cdot (L + R \cdot R_C \cdot C) + s^2 \cdot (R + R_C) \cdot L \cdot C} \quad (7)$$

A função de transferência da impedância de saída do conversor é dada por (8).

$$Z_{out} = \frac{s \cdot R \cdot L \cdot (1 + s \cdot R_C \cdot C)}{R + s \cdot (L + R \cdot R_C \cdot C) + s^2 \cdot (R + R_C) \cdot L \cdot C} \quad (8)$$

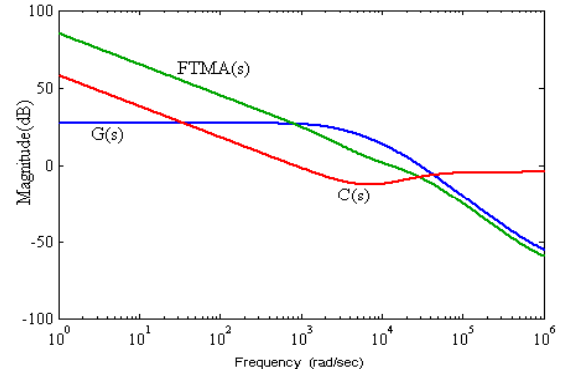


Fig. 8. Magnitude das funções de transferência em malha aberta.

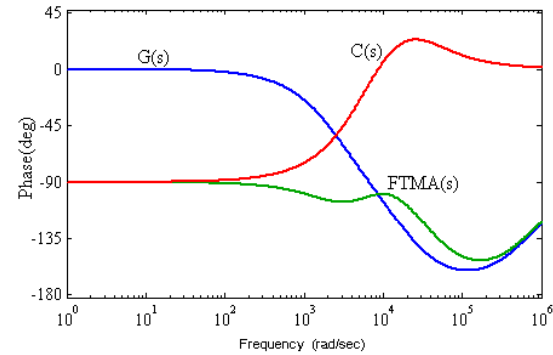


Fig. 9. Fase das funções de transferência em malha aberta

F. Experimento

O conjunto conversor-freio deve ser capaz de impor carga mecânica inferior, igual e superior ao torque nominal do motor. O monitoramento das condições da máquina elétrica de indução em ensaio dinâmico é realizado pela observação das correntes que circulam na máquina. Os ensaios realizados seguem as normas internacionais vigentes, com carregamentos de %25, 50%, 75%, 100%, 125% e 150% do torque nominal [1].

O torque de frenagem não é uma função exclusiva da corrente elétrica aplicada ao dispositivo de freio, a descrição completa da força de frenagem é uma composição não linear de fatores elétricos e mecânicos. Os ensaios realizados comparam o desempenho de dois motores de indução trifásica, sendo um de alto rendimento e outro padrão, conforme especificados na tabela I.

TABELA I
Motores para ensaio

Dados dos motores	Motor de alta eficiência	Motor padrão
Potência Mecânica (kW)	7.36	7.36
Tensão de linha (V)	380	380
Número de Pólos	4	4
Rotação (s ⁻¹)	29.3	29.3
Corrente de partida, I _p /I _N	7.8	7.8
Torque nom. C _N (N/m)	41.0	41.0
rotor bloqueado, C _B /C _N	2.6	2.6
Torque máximo, C _M /C _N	3.1	3.1

A figura 10 mostra o nível de tensão e corrente máxima aplicada às bobinas do freio eletromagnético, sendo a força de frenagem diretamente influenciada pela corrente. O efeito produzido pela variação de corrente nas bobinas do freio é percebido no motor em ensaio, por meio da variação do torque, das correntes no estator, conforme figuras 11 e 12. Outros perfis de carga podem ser utilizados para analisar o comportamento motriz de acordo com o ensaio.

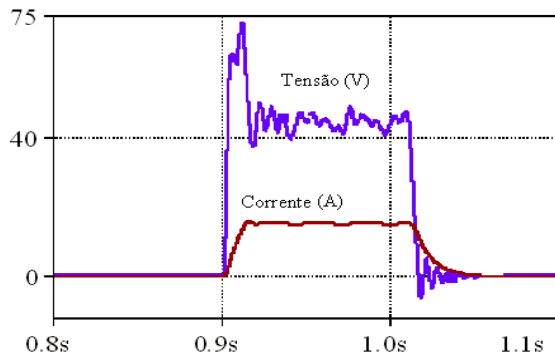


Fig. 10. Tensão e corrente para uma referência constante.

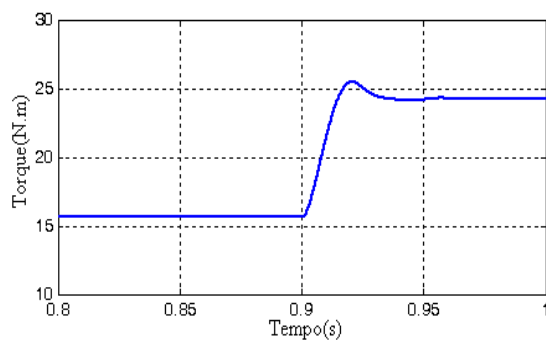


Fig.11 - Efeito do degrau de carga no torque do motor

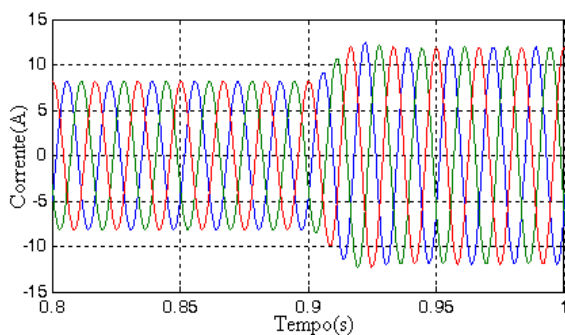


Fig.12 - Efeito do degrau de carga sobre as correntes do estator no motor.

III. CONCLUSÃO

A proposta aqui apresentada possibilita o ensaio didático de motores de indução diretamente acoplado a cargas variáveis, onde o freio eletromagnético tem o objetivo de representar cargas predefinidas. A carga mecânica convencional pode ser substituída por um freio por correntes induzidas, sem que isso altere o comportamento motriz o que significa uma grande vantagem para a realização de ensaios

em laboratório. Melhorias no desempenho podem ser alcançadas com o acréscimo de materiais condutores não ferromagnéticos na composição do disco o que implica na redução das perdas por histerese.

As medidas realizadas serão utilizadas para a análise didáticos da eficiência da conversão eletro-mecânica no laboratório de otimização de sistemas motrizes da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIA

- [1] IEEE std 112 – “Standard test procedure for polyphase induction motors and generator”. Nov. 2004.
- [2] Werner Baran, “Influence of different magnetic field profiles on eddy- current braking”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 6, no. 2, pp.260 – 263, Jun 1970.
- [3] David Schieber, Transient eddy currents in thin metal sheets, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 8, no. 4, pp.775 – 779, Dec 1972.
- [4] Mark A. Heald, “Magnetic Braking: Improved Theory.” *American Journal of Physics*, vol. 56, no. 6, pp.521-522, jun. 1988.
- [5] I. Bardi, O. Biro Calculation of the torque-RPM characteristics of power-meters. *Magnetics, IEEE Transactions on*. v. 24, Issue 1, p.541 – 543, jan. 1988
- [6] J.H. Wouterse, “Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles.” *IEE Proceedings-Electric Power Applications*; vol. 138, no. 4, pp.153 – 158, jul. 1991.
- [7] J. M. Aguirregabiria; A. Hernández, M. Rivas, “Magnetic braking revisited”. *American Journal of Physics*, vol. 65, no. 9. pp. 851-856, set. 1997.
- [8] P. Iwanciw, K. Ashman, “Application of a high speed, high power eddy current coupling on a turbine test stand”, *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, no. 412, pp.222 – 226, Sep 1995
- [9] E. Simeu, D. Georges, “Modeling and control of an eddy current brake”. *Control Engineering Practice*, vol. 4, no. 1, pp.19-26, jan. 1996
- [10] H.K. Collan, J. Vinnurva, “Rapid optimization of a magnetic induction brake”. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 4, pp.3040-3044, jul. 1996
- [11] Ming Quian, Pushkin Kachroo, “Modeling and control of electromagnetic brakes for enhanced braking capabilities for automated highway systems”. *IEEE Conference on Intelligent Transportation System*, 9-12, pp.391-396, nov. 1997.
- [12] Sohel Anwar, “A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. vol. 12, no. 3, pp.422-427, maio 2004.