

CONTROLE DE POSIÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA A ÍMÃS PERMANENTES

Wilian Soares Lacerda

Ms. Eng. Elétrica UFMG e Professor Assistente da UFLA

Paulo Fernando Seixas

Dr. Ing. INPT/França e Professor Adjunto da UFMG

Neste trabalho é realizado um estudo do controle de posição de uma máquina síncrona a ímãs permanentes. O método de controle vetorial de campo é descrito e analisado. Os resultados experimentais são mostrados, evidenciando a eficácia do método de controle para o acionamento de uma máquina elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Máquinas síncronas, com rotor excitado eletricamente, têm um enrolamento de estator geralmente trifásico e um enrolamento de campo no rotor excitado com corrente CC. O enrolamento de campo pode ser substituído por ímãs permanentes. O uso de ímãs permanentes apresenta diversas vantagens, entre elas:

- ◆ A eliminação de escovas e perdas no enrolamento de campo.
- ◆ Como as perdas no cobre e no ferro são concentradas no estator, o resfriamento da máquina é mais fácil.
- ◆ A alta eficiência reduz a dimensão da máquina.
- ◆ Para um mesmo tamanho da máquina, suas características podem ser variadas enormemente de acordo com o tipo de ímãs escolhidos e com a forma de dispô-los no rotor.
- ◆ Alta densidade de fluxo de entreferro.
- ◆ Alta razão potência/peso.
- ◆ Alta razão torque/inércia, permitindo obter alta aceleração.

Para acionamentos de alto desempenho, principalmente em servomecanismos de posição, as

seguintes características devem ser satisfeitas:

- ◆ Torque contínuo (sem *ripple*), principalmente em baixas rotações.
- ◆ Controle de torque mesmo em velocidade nula.
- ◆ Operação em altas velocidades.
- ◆ Alta aceleração e desaceleração em curto intervalo de tempo.
- ◆ Alto $\cos(\phi)$.

Esses requisitos podem ser atendidos pelo emprego do método de controle vetorial no acionamento da máquina síncrona a ímãs permanentes [10].

Neste artigo descreve-se o controle de posição de uma máquina síncrona a ímãs permanentes, empregando-se o método de controle vetorial.

2. CONTROLE VETORIAL DA MÁQUINA SÍNCRONA A ÍMÃS PERMANENTES

Assume-se neste estudo que os ímãs permanentes são localizados na superfície do rotor (máquina de pólos lisos) ou que os efeitos de saliência do rotor são desprezíveis. Os efeitos da saturação magnética também são

desprezados.

Os ímãs são posicionados num ângulo θ , relativo ao eixo magnético do enrolamento da fase A do estator, produzindo um pico de distribuição de fluxo magnético (Ψ_F) conforme fig. 1.

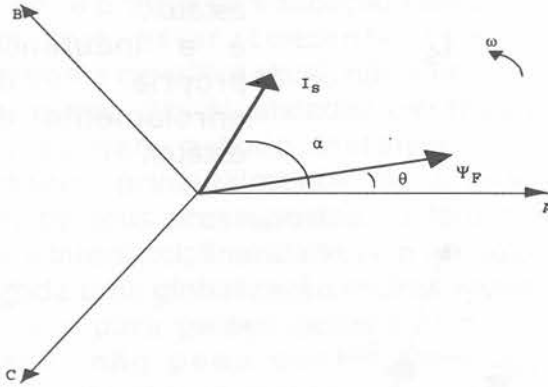


Figura 1: Distribuição de fluxo magnético na máquina síncrona

As correntes trifásicas dos enrolamentos de estator produzem o fasor espacial das correntes de estator (I_S), o que determina a magnitude e o deslocamento do pico da força magnetomotriz de estator produzida pelos três enrolamentos de estator.

O torque eletromagnético pode ser entendido fisicamente como sendo produzido pela tendência dos ímãs a alinharem-se com o eixo da força magnetomotriz do estator.

O torque eletromagnético é dado por:

$$T = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \Psi_F \cdot |I_S| \cdot \text{sen}(\alpha - \theta) \quad (1)$$

onde: $|I_S|$ — é o módulo do fasor espacial da corrente de estator.

α — é o ângulo do fasor espacial da corrente de estator relativo ao eixo magnético do enrolamento de estator da fase A.

Ψ_F — é o fluxo de rotor.

P — é o número de pares de pólos.

O fasor espacial da corrente de estator (I_S) pode ser decomposto em duas componentes (I_{Sd} , I_{Sq}) no sistema de dois eixos ortogonais fixos no rotor (eixos dq). No controle vetorial, o eixo direto está sempre colinear com o fasor do fluxo magnético de rotor (Ψ_F). Veja fig. 2.

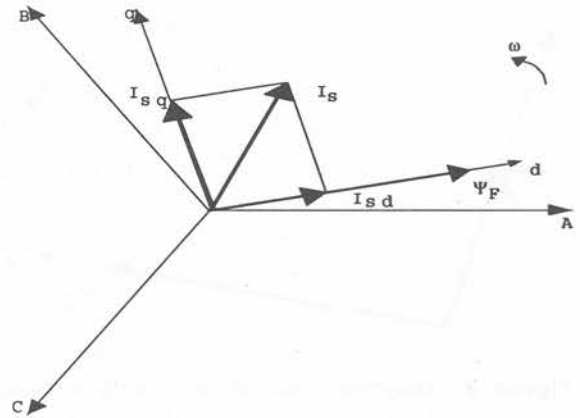


Figura 2: Diagrama fasorial mostrando as componentes de eixo direto e quadratura

Neste sistema de eixos, o torque eletromagnético é dado por:

$$T = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \Psi_F \cdot I_{sq} \quad (2)$$

onde: I_{sq} — é a componente de eixo em quadratura do vetor espacial da corrente de estator expressa no eixo de referência fixo no rotor.

Como o fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes é constante, o torque eletromagnético pode ser ajustado pela corrente de eixo em quadratura de estator no sistema de eixos de referência fixos no rotor (I_{sq}).

O fluxo de excitação é fixo no eixo direto do rotor, então sua posição pode ser obtida diretamente da posição angular do rotor medida, por exemplo, com um sensor do tipo "resolver" [1].

Para uma dada corrente de estator, o torque máximo é obtido quando o fasor espacial da corrente de

estator contém apenas a componente de eixo em quadratura ($I_s = I_{sq}$), ou seja, a componente de eixo direto é zero ($I_{sd} = 0$). Este modo de operação, mostrado na fig. 3, é possível abaixo da velocidade nominal, onde suficiente tensão é obtida do inversor que alimenta o motor.

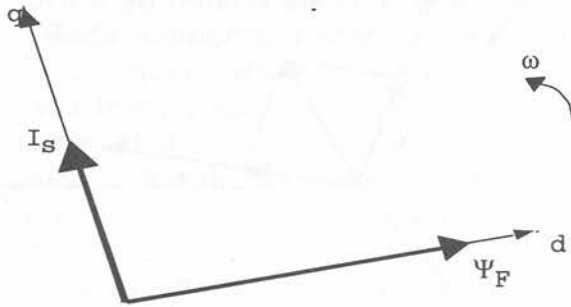


Figura 3: Diagrama fasorial mostrando o modo $I_{sd}=0$

Em velocidades acima da nominal, o aumento da força contra-eletromotriz (FCEM) induzida no estator exige um aumento da tensão terminal, que é limitada pela tensão CC de entrada do inversor. Nesse caso, pode-se reduzir a força contra-eletromotriz induzida pelo enfraquecimento do campo do rotor.

O enfraquecimento de campo pode ser obtido pelo controle da corrente de estator, de tal modo que o fasor espacial da corrente de estator, no sistema de eixos de referência fixos em rotor, contenha uma componente de eixo direto negativa, como mostra a fig. 4.

A equação da tensão de estator no eixo de referência estacionário, quando os efeitos da saturação magnética são ignorados, é:

$$U_s = (R_s + j\omega L_s) I_{sd} + R_s j I_{sq} + jK\omega_r \Psi_F \quad (3)$$

onde: ω_r — é a velocidade do rotor.
 K — constante de proporcionalidade.

$jK\omega_r \Psi_F$ — é o fasor da força contra-eletromotriz induzida no enrolamento de estator.
 R_s — é a resistência do enrolamento de estator.
 L_s — é a indutância própria do enrolamento de estator.

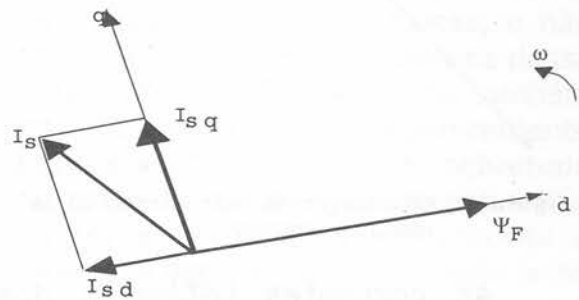


Figura 4: Diagrama fasorial mostrando o enfraquecimento de campo

Utilizando a equação (3), o seguinte diagrama pode ser traçado, onde δ é o ângulo entre a FCEM e U_s , e ϕ é o ângulo de deslocamento da corrente de estator (fig. 5):

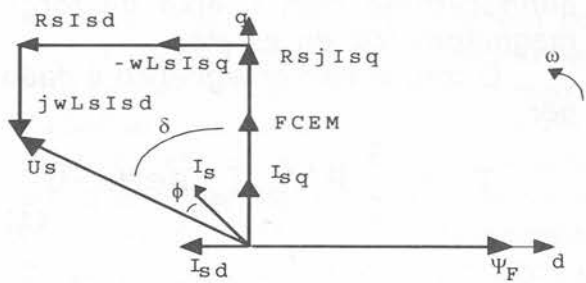


Figura 5: Diagrama fasorial mostrando a tensão U_s

Considerando $I_{sd}=0$ (abaixo da velocidade nominal):

$$U_s = (R_s + j\omega L_s) j I_{sq} + jK\omega_r \Psi_F \quad (4)$$

Utilizando a equação (4), o diagrama pode ser traçado (fig. 6):

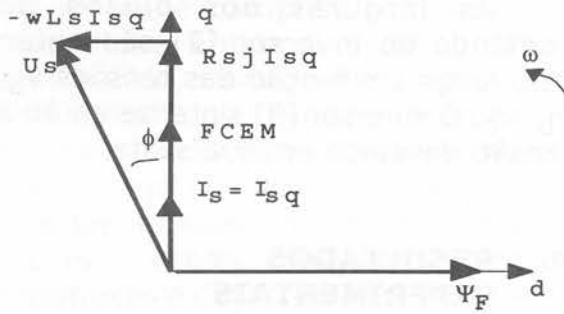


Figura 6: Diagrama fasorial quando $I_{sd}=0$

Nesse caso, o ângulo de carga (δ) coincide com o ângulo de deslocamento da corrente de estator (ϕ). Como a reatância síncrona (ωL_s) é pequena, ϕ é praticamente zero.

3. SISTEMA DE CONTROLE

A fig. 7 mostra o diagrama do sistema de acionamento completo para

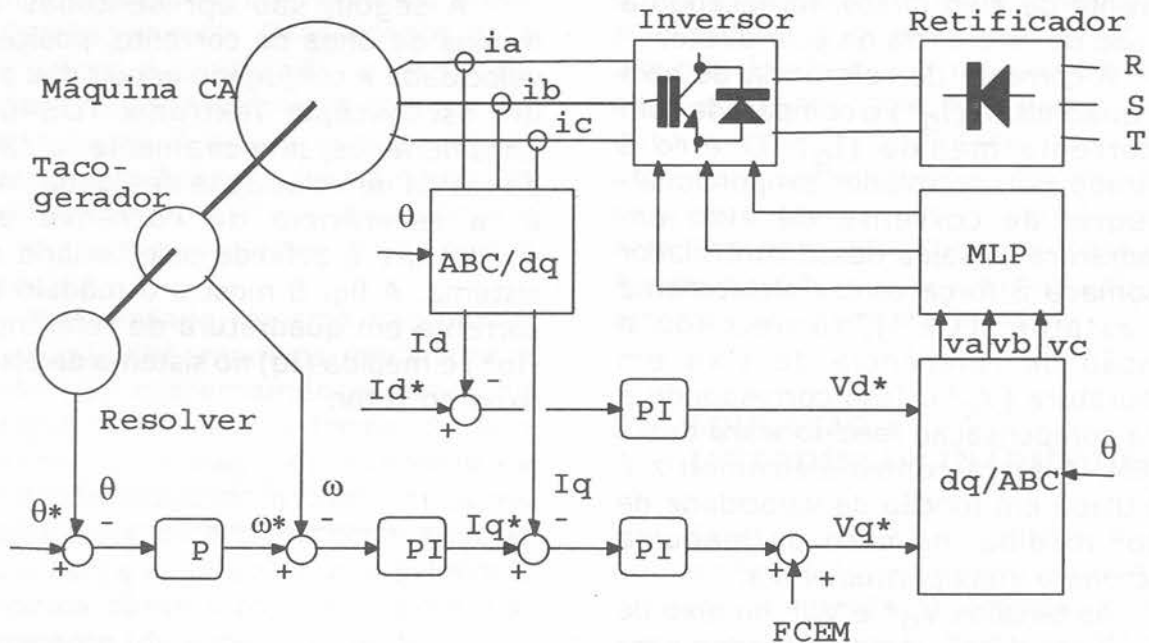


Figura 7: Diagrama em blocos do sistema de controle

A velocidade do rotor da máquina (ω) é medida com um tacômetro e comparada com a velocidade de referência. O erro é utilizado no controlador proporcional-integral de velocidade que fornece a amplitude da corrente em quadratura de referência (I_q^*). Essa componente da corrente

realização do controle de posição da máquina síncrona a ímãs permanentes [5].

A implementação do sistema de controle vetorial é feita por *software* em computador IBM com PC compatível, utilizando-se linguagem de programação de alto nível. Através de interfaces [4] acopladas ao barramento do computador, é possível a medição das grandezas necessárias ao controle, além do acionamento das chaves do inversor trifásico [7] que alimenta a máquina síncrona.

O ângulo do rotor da máquina (θ), indicado na fig. 1 para uma máquina de dois pólos, é medido através de um sensor do tipo "resolver" [9]. O ângulo medido é comparado com o de referência (θ^*). O sinal de erro é utilizado no controlador proporcional de posição cuja saída é a velocidade de referência (ω^*).

de estator é a responsável pelo torque gerado pela máquina.

As correntes trifásicas de estator (i_a, i_b, i_c) são medidas por sensores de efeito Hall. Essas correntes no sistema natural são transformadas para o sistema dq fixo no rotor, através da seguinte relação [8]:

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - 120^\circ) & \cos(\theta_e + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - 120^\circ) & -\sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde: θ_e é o ângulo do rotor em radianos elétricos
 $\theta_e = P \cdot \theta$

A corrente de referência de eixo direto (I_d^*) é zero, uma vez que não será utilizado o processo de enfraquecimento de campo. A corrente de eixo direto medida é comparada com a referência. O erro é utilizado no controlador proporcional-integral de corrente de eixo direto, fornecendo a tensão de referência de eixo direto.

A corrente de referência de eixo em quadratura (I_q^*) é comparada com a corrente medida (I_q). O erro é utilizado no controlador proporcional-integral de corrente de eixo em quadratura. A saída desse controlador é somada à força contra-eletromotriz de estator (FCEM), fornecendo a tensão de referência de eixo em quadratura (V_q^*). Isso corresponde a uma compensação *feed-forward* desta FCEM. A força contra-eletromotriz é calculada em função da velocidade de rotor medida, no caso da máquina síncrona a ímãs permanentes.

As tensões V_d^* e V_q^* no eixo de referência dq são transformadas para o sistema de referência natural, fixo no estator, através da seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - 120^\circ) & -\sin(\theta_e - 120^\circ) \\ \cos(\theta_e + 120^\circ) & -\sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

As larguras dos pulsos de comando do inversor [2] são então calculadas em função das tensões v_a , v_b , v_c . O inversor [3] sintetiza então a tensão desejada em sua saída.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema de acionamento [6] foi utilizado para acionar uma máquina síncrona a ímãs permanentes, cujos dados de placa são:

Servomotor trifásico a ímã permanente	
potência:	1,68KW
tensão:	180V
corrente:	6,6A
freqüência:	133Hz
número de pólos:	8
constante tensão:	0,718Vs

A seguir, são apresentadas as formas de onda de corrente, posição, velocidade e conjugado adquiridas por um osciloscópio Tektronix TDS460. Consideramos, primeiramente, o caso da malha de velocidade desligada, isto é, a referência de corrente em quadratura é definida pelo usuário do sistema. A fig. 8 mostra o módulo da corrente em quadratura de referência (I_q^*) e medida (I_q) no sistema de eixos fixos no rotor.

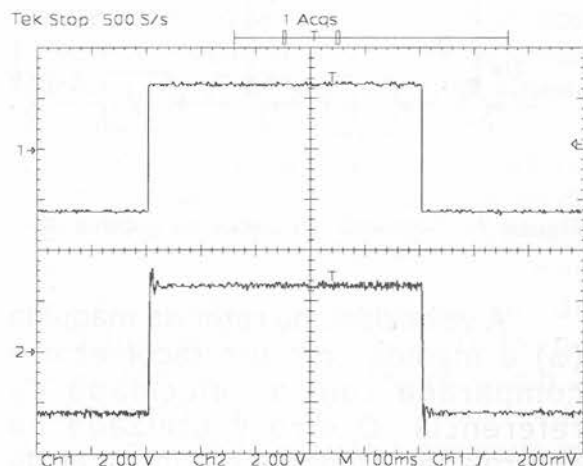


Figura 8: Corrente de eixo em quadratura (esc: 1V = 2A)
 canal 1: corrente de referência (I_q^*)
 canal 2: corrente medida (I_q)

A fig. 9 mostra a mesma corrente com maior detalhe.

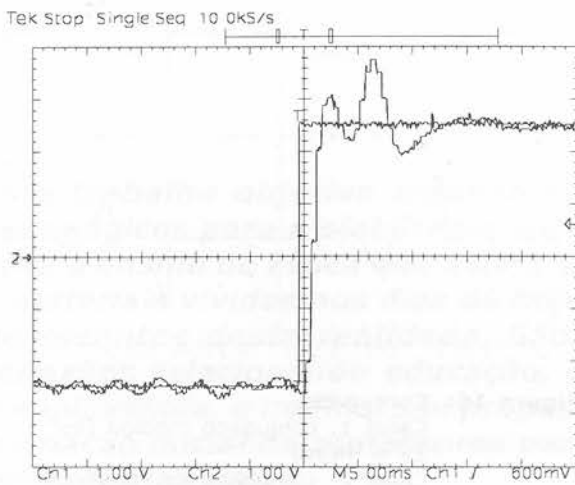


Figura 9: Detalhe da corrente de eixo em quadratura; corrente de referência e medida (esc: 1V = 2A)

A fig. 10 mostra a corrente de eixo direto de referência ($I_d^* = 0$) e medida (I_d) para as mesmas condições da corrente de eixo em quadratura descrita na fig. 8.

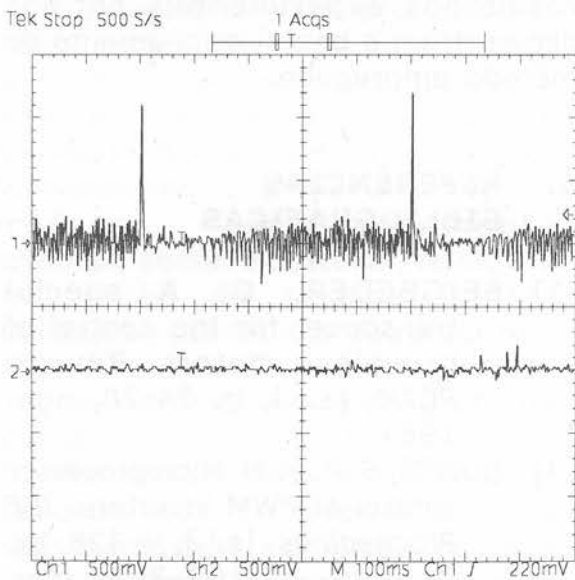


Figura 10: Corrente de eixo direto (esc: 1V = 2A)
canal 1: corrente medida
canal 2: corrente de referência

A fig. 11 mostra as correntes de eixo direto de referência e medida com maior detalhe.

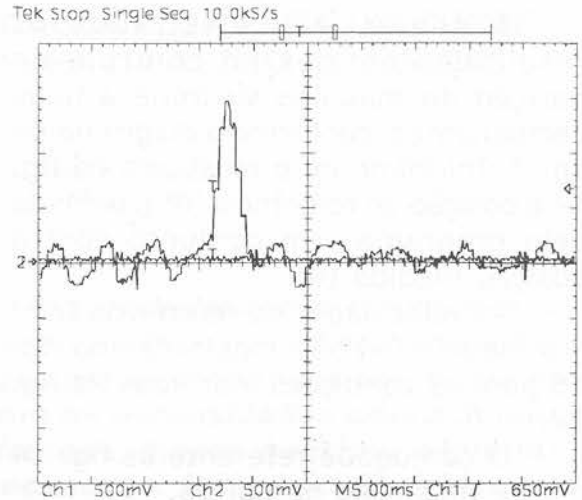


Figura 11: Detalhe da corrente de eixo direto; corrente de referência e medida (esc: 1V = 2A)

As figs. 12 e 13 mostram o conjugado medido nas condições indicadas nas figuras anteriores.

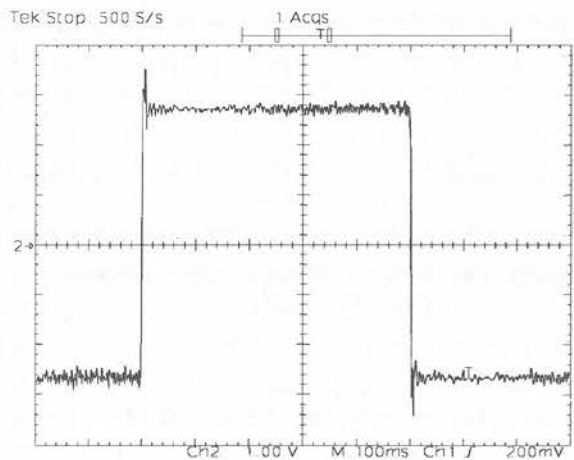


Figura 12: Conjugado medido na máquina (esc: 1V = 2N.m)

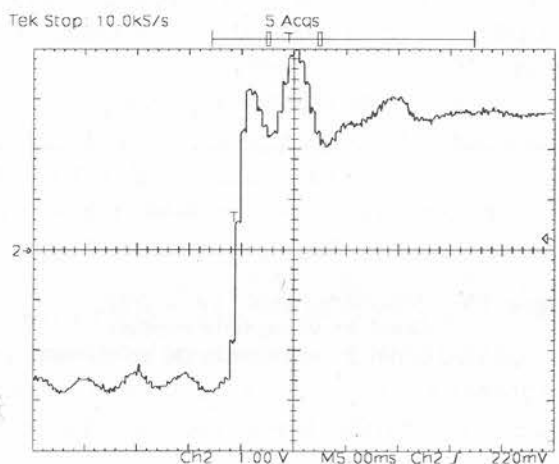


Figura 13: Detalhe do conjugado medido na máquina (esc: 1V = 2N.m)

A seguir, são mostrados os resultados obtidos no controle de posição da máquina síncrona a ímãs permanentes, conforme o diagrama da fig. 7. Inicialmente é mostrada na fig. 14 a posição de referência (θ^*), definida pelo programa, em conjunto com a posição medida (θ).

As velocidades de referência (ω^*) e a medida (ω) são mostradas na fig. 15 para as condições indicadas na fig. 14.

O conjugado referente às fig. 14 e 15 é mostrado na fig. 16.

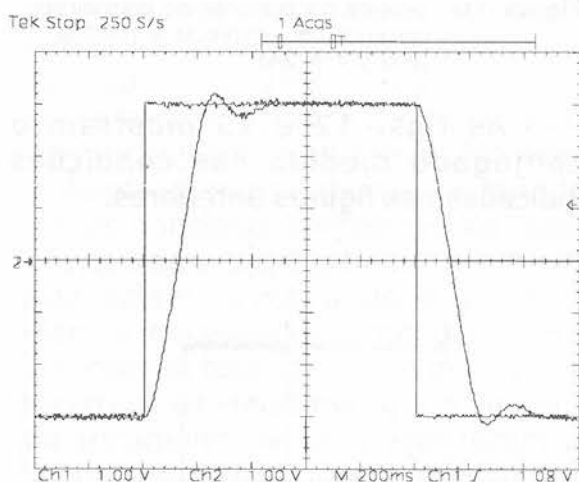


Figura 14: Posição de referência e medida (esc: 1V = 60°)

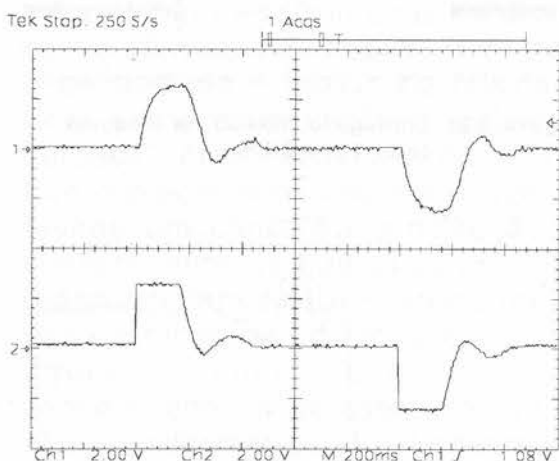


Figura 15: Velocidades (esc: 1V = 2rps)
Canal 1: velocidade medida
Canal 2: velocidade de referência

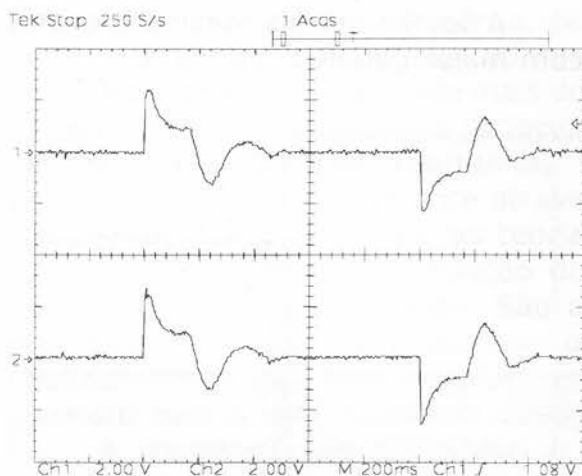


Figura 16: Conjugado
Canal 1: conjugado medido (esc: 1V = 4N.m)
Canal 2: conjugado de referência

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi descrito o controle de posição de uma máquina síncrona a ímãs permanentes. O método de controle vetorial foi estudado e implementado para o controle da máquina síncrona. Os resultados experimentais obtidos demonstram o bom funcionamento do método empregado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEIGBEDER, G. A special transducer for the control of brushless motors. *Revista PCIM*, [s.l.], p. 24-28, ago. 1987.
- [2] BOWES, S. R. et al. Microprocessor control of PWM inverters. *IEE Proceedings*, [s.l.], v. 128, pt. B, n. 6, p. 293-305, nov. 1981.
- [3] DONCKER, R. W., LYONS, J. P. The auxiliary resonant commutated pole converter. *IEEE — Industry Applications Society Conference Records*, [s. l.], p. 1228-1235, out. 1990.
- [4] EGGBRECHT, Lewis C. *Interfacing to the IBM personal*

- computer. 2. ed. Estados Unidos: Howard W. Sams, 1990. 345 p.
- [5] LACERDA, Wilian Soares. *Sistema de desenvolvimento para acionamentos elétricos, aplicação ao controle de posição de uma máquina síncrona a ímãs permanentes*. Belo Horizonte: UFMG, 1994. 210 p. (Tese, Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [6] LACERDA, Wilian Soares, SEIXAS, Paulo Fernando. Proposta de um sistema de desenvolvimento para acionamentos elétricos. *Revista Educação & Tecnologia*, Belo Horizonte, p. 7-9, nº 3, jul./dez. 1996.
- [7] LACERDA, Wilian Soares, CORTIZO, Porfírio Cabaleiro. Estudo e implementação de um inversor pólo ressonante auxiliar. *Revista Educação & Tecnologia*, Belo Horizonte, p. 11-17, v. 2, nº 2, jul./dez. 1997.
- [8] SEIXAS, Paulo F. *Commande numérique d'une machine synchrone autopilotée*. Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse, 1988. 237 p. (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [9] SYLVAN, John. New Options for Resolver to Digital Conversion. *Revista Machine Design*, outubro de 1987, pág 141-146.
- [10] VAS, Peter. *Vector Control of AC Machines*. New York: Oxford University Press, 1990.

Para contato com os autores:

Wilian Soares Lacerda
lacerda@ufla.br

Paulo Fernando Seixas
paulos@cpdee.ufmg.br