

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Regulação de Velocidade do Motor a Relutância Chaveado Empregando Controlador Fuzzy

Márcio Rodrigues da Cunha Reis¹

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, EMC UFG, Goiânia, GO

Wanderson Rainer Hilário de Araújo²

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação,
Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF

Wesley Pacheco Calixto³

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, GO

Resumo. Este artigo apresenta o motor a relutância chaveado, suas características, operação e acionamento e como este dispositivo se comporta dinamicamente quando sua velocidade é regulada por um controlador Fuzzy. A natureza eletronicamente chaveada do acionamento deste tipo de máquina elétrica proporciona elevados níveis de não linearidade para o dispositivo. Desta forma, controladores de velocidade convencionais como o PID muitas vezes apresentam dificuldades operacionais no que diz respeito ao seu projeto e ajuste de parâmetros para obtenção de desempenhos satisfatórios. Portanto, faz-se necessária a busca por controladores alternativos que garantam a regulação de velocidade da máquina quando operando como motor mesmo sobre a influência das características de acionamento chaveado presentes no acionamento. Neste artigo, a simulação de um motor a relutância chaveado de 60 kW é realizada de forma a verificar seu comportamento dinâmico mesmo com a inserção de perturbações.

Palavras-chave. Motor a Relutância Chaveado, Controle de Velocidade, Lógica Fuzzy.

1 Introdução

A máquina de relutância chaveada possui atrativos para aplicações industriais que requerem, sobretudo, ampla faixa de velocidade e elevados valores de conjugado. Como toda máquina elétrica, a máquina de relutância chaveada é reversível, podendo operar como motor ou como gerador. Neste trabalho, são apresentadas simulações do Motor a

¹ marciorcreis@gmail.com

² rainer@pucgoias.edu.br

³ wpcalixto@gmail.com

Relutância Chaveado (MRC) operando em conjunto com um controlador de velocidade.

O acionamento convencional do MRC necessita da informação constante da posição instantânea do rotor para a correta energização de suas fases, o que fez com que a utilização, pesquisa e inovação relacionadas a este equipamento tivesse mais relevância nas últimas décadas, com o advento da eletrônica e dos sistemas microprocessados [5]. A seguir serão apresentadas as características construtivas do MRC e como o mesmo pode ser acionado para geração de energia mecânica rotativa em seu eixo.

2 Motor a Relutância Chaveado

O motor a relutância chaveado pode ser classificado quanto ao número de pólos do rotor e do estator. As Figuras 1(a) e 1(b) ilustram o corte transversal de um motor de configura 6 x 4, contendo 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor e o perfil de indutância em função da posição angular e da corrente.

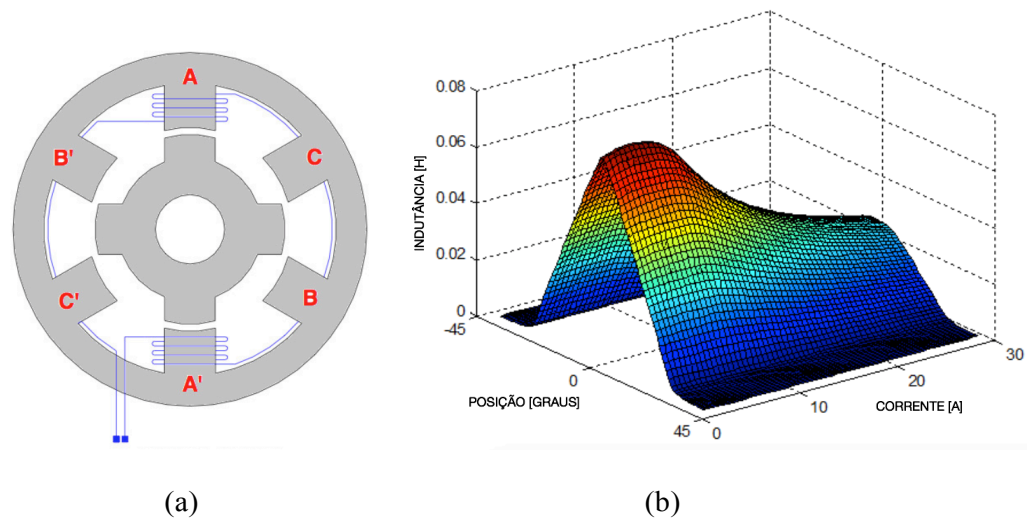


Figura 1: Características construtivas do MRC. (a) Corte transversal de um motor a relutância chaveado 6 x 4. (b) Perfil de indutância em função da posição angular e da corrente para um MRC 6 x 4.

Motores de relutância chaveados, como o ilustrado na Figura 1(a), normalmente são construídos a partir de chapas de aço silício (grão não orientado) empilhadas de forma a compor o núcleo magnético. Os pólos do estator e do rotor são salientes e diametralmente opostos. O rotor não possui enrolamentos e em cada par de pólos do estator é concentrado um enrolamento, que é referente a uma fase da máquina. Na Figura 1(a) está ilustrado o enrolamento da Fase A. Estas características garantem a simplicidade de construção da máquina e impacta positivamente em seu custo de fabricação, além do fato de que a ausência de atrito entre partes móveis permite a operação em altas velocidades sem inconvenientes, o que coloca este tipo de máquina elétrica em evidência em aplicações aeronáuticas [2]. Existem várias outras configurações de números de pólos para o estator e para o rotor de máquinas de relutância chaveadas, as quais são amplamente pesquisadas pela comunidade científica.

2.1 O Acionamento do MRC

Um MRC de topologia 6 x 4 como o ilustrado na Figura 1(a) possui 3 fases: A, B e C. A indutância L dos enrolamentos de um MRC possui um comportamento característico em função da posição angular θ . A Figura 1(b) ilustra o comportamento de uma das 3 fases de um MRC 6 x 4. Considerando a Fase A da Figura 1(a), a indutância possui seu valor máximo devido ao alinhamento dos pólos do rotor e do estator. Portanto, o passo polar do rotor faz com que a indutância de uma fase varie periodicamente a cada 90 graus mecânicos de rotação do eixo, conforme ilustra a Figura 1(b). O modelo matemático do MRC estabelece que a produção de conjugado é determinada por:

$$T = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

Conforme exposto por (1), a produção de conjugado positivo ocorre quando a taxa de variação da indutância em relação à posição angular é positiva, ou seja, quando a indutância é crescente. Há então a necessidade de se obter constantemente a posição angular do rotor (θ), de forma que a corrente elétrica i seja aplicada somente nessa condição. A aplicação de corrente em cada uma das fases do MRC é feita através de um conversor de potência conhecido como *Half Bridge* [1], o qual é ilustrado na Figura 2.

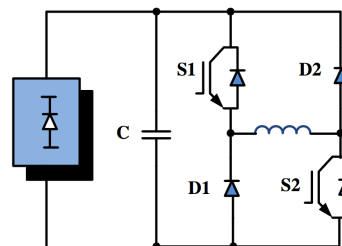


Figura 2: Esquema por fase do conversor *Half Bridge* usado no acionamento do MRC.

No circuito da Figura 2, S1 e S2 são chaves eletrônicas (IGBT, MOSFET etc.) que são acionadas por um sistema microprocessado obedecendo a região crescente de indutância para produção de conjugado. A informação instantânea da posição do rotor normalmente é obtida por sensores ópticos conectados ao eixo da máquina ou *encoders*.

3 Simulação do MRC

A simulação de um MRC 6 x 4 de 60 kW de potência foi realizada empregando o software MATLAB. O motor opera em malha aberta com uma janela de condução de 45 graus na região crescente da indutância, o que proporciona uma velocidade em regime permanente de aproximadamente 226,55 rad/s equivalente a 2163 rpm. Para o controle de velocidade do MRC, foi inserido um controlador Fuzzy, conforme ilustrado na Figura 3. Neste caso, a saída do controlador atua sobre o ângulo de desligamento (T_{off}) de cada uma das fases, energizando cada bobina de forma conveniente para a regulação de

velocidade conforme a referência estipulada para o sistema.

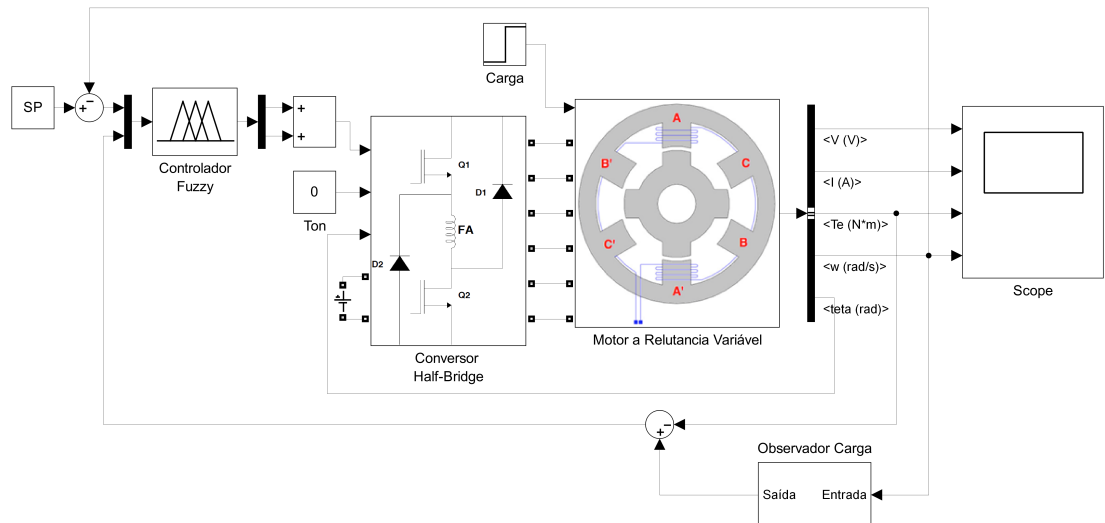


Figura 3: Diagrama para simulação do MRC 6 x 4 com controlador Fuzzy de velocidade.

O controlador Fuzzy possui duas entradas, sendo o erro de velocidade e a saída do observador de carga. O observador permite identificar o momento de aplicação de carga mecânica ao eixo do motor e seu respectivo valor, com base na equação (2). A modelagem do sistema possui equação referente ao equilíbrio dos conjugados envolvidos no sistema [3, 4]. Esta equação define o conjugado resultante e é descrita por:

$$T_M = -T_{EMAG} + B \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

onde T_M é o conjugado total, T_{EMAG} é o conjugado eletromagnético, B é o coeficiente de atrito viscoso, ω é a velocidade do eixo e J é o momento de inércia. As Figuras 4(a) e (b) apresentam as superfícies de saída do controlador Fuzzy projetado.

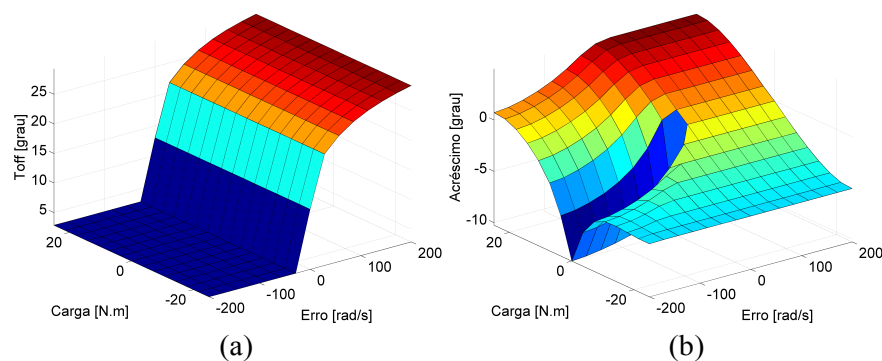


Figura 4: Superfície que representa a saída do controlador Fuzzy. (a) Saída Toff em função das entradas erro de velocidade e carga mecânica. (b) Saída acréscimo de Toff em função das entradas erro de velocidade e carga mecânica.

As funções de pertinência do controlador Fuzzy foram criadas de forma que a saída do controlador seja integrada por duas variáveis: o ângulo de desligamento Toff das chaves do conversor de potência e um acréscimo deste ângulo, de forma que um valor incremental de ângulo possa ser aplicado ao acionamento quando uma carga mecânica é aplicada (ou retirada) ao eixo e provoca alterações na velocidade.

Os graus de pertinência de cada variável foram ajustados de forma a proporcionar a relação ilustrada na Figura 4(a), onde o ganho do controlador possui valores diferentes ao longo da variação do erro de velocidade.

4 Resultados obtidos

Neste item serão apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia descrita. O controlador Fuzzy de velocidade foi projetado e simulado em algumas condições de *setpoint* (SP) e carga mecânica. Para isto utilizou-se parâmetros de um MRC que são apresentados pela Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do Motor a Relutância utilizado.

Resistencia Estator	1,00 Ω	Indutância Alinhado	0,0236 H
Inércia	0,05 kg.m.m	Indutância Desalinhado	0,00067 H
Atrito	0,02 N.m.s	Indutância de Saturação	0,00015 H

Um controlador Proporcional e Integral (PI) de velocidade foi projetado de forma a obter análise comparativa com relação ao controlador Fuzzy. Os parâmetros do controlador PI foram ajustados de forma a manter uma aproximação do tempo de subida da velocidade com o tempo obtido com o controlador Fuzzy, pois isso implicará também em uma aproximação das correntes de partida do motor com a utilização de ambos controladores. Primeiramente foi aplicado o degrau de 150 rad/s e 100 rad/s como *setpoint* de velocidade nos controladores e no instante $t = 2s$ uma carga de 5 Nm é acoplada ao eixo do motor. Em seguida, simulando apenas o sistema com o controlador Fuzzy, aplicou-se um *setpoint* de velocidade de 100/150/120 rad/s com intervalo de 3s. A carga mecânica é acoplada ao eixo do motor 1s após as mudanças de *setpoint*.

Conforme apresentado na Figura 5(a), o controlador Fuzzy foi superior ao controlador PI no instante em que uma carga de 5 Nm é acoplada ao motor. No controlador PI a carga proporcionou uma queda de velocidade de aproximadamente 13%, enquanto com o controlador Fuzzy a queda de velocidade foi de aproximadamente 1%. O tempo de correção de velocidade com o controlador PI é de aproximadamente 2,5 s e 150 ms com o controlador Fuzzy. Além da lógica Fuzzy proporcionar tal rendimento, a saída acréscimo de Toff está diretamente relacionada à entrada que observa a carga mecânica. No instante em que o valor da carga mecânica é calculada pelo observador de carga, o controlador Fuzzy adiciona um acréscimo em Toff produzindo maior torque no motor mantendo a velocidade estabelecida. Visto na Figura 5(b), o controlador Fuzzy foi submetido a condições de variações de *setpoint* e carga mecânica que validam a técnica empregada principalmente no que se diz respeito à entrada e saída de carga mecânica.

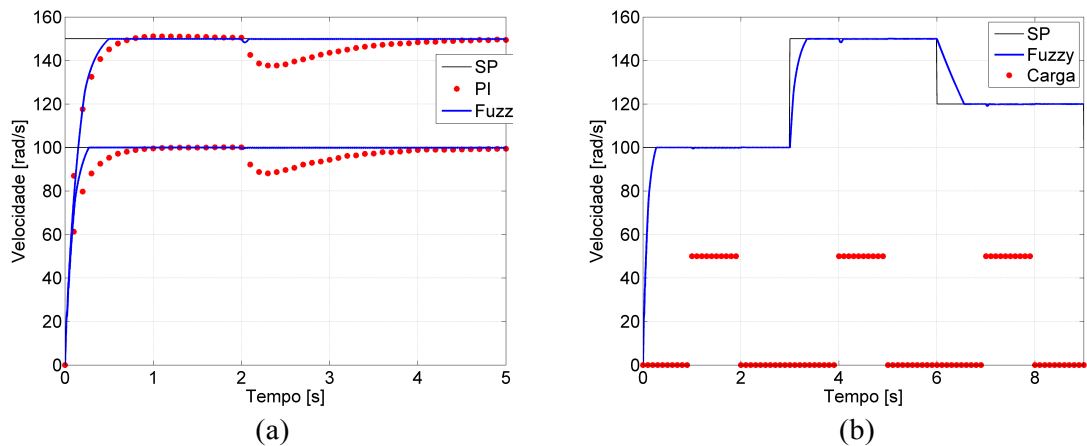


Figura 5: Resposta do controle de velocidade submetido a carga mecânica. (a) Comparação de resposta do controlador PI e Fuzzy. (b) Resposta de velocidade com o controlador Fuzzy submetido a varias condições de *setpoint* e carga mecânica (x10).

A tensão de excitação da máquina na fase A, ilustrada na Figura 6(a), durante o percurso de controle apresenta o efeito de comutação das chaves do conversor, picos de tensão maior que a excitação de 100 V, em instantes em que a extinção do pulso T_{off} é feito na posição onde o valor da indutância é maior, ou seja, em instante que o motor está acelerando ou submetido à carga mecânica.

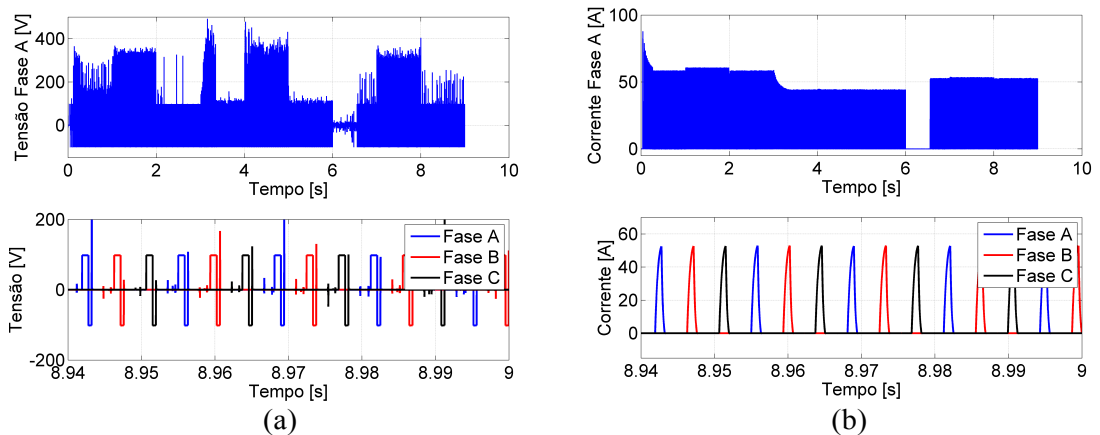


Figura 6: Tensões e correntes elétricas aplicadas pelo conversor *Half-Bridge* no motor a relutância. (a) Tensão na fase A durante toda a simulação e tensão trifásica com o motor em regime permanente sem carga acoplada. (b) Corrente na fase A durante toda a simulação e corrente trifásica com o motor em regime permanente sem carga acoplada.

Na Figura 6(b), a corrente de excitação da máquina na fase A durante o percurso de controle apresenta os instantes em que está acelerando, desacelerando, ou submetido à carga mecânica. Em aproximadamente $6 < t < 6,5$ o *setpoint* foi alterado de 150 rad/s para 120 rad/s, como o conversor não opera no sentido de reversão da corrente elétrica, a corrente e tensão elétrica atingem zero e a desaceleração depende somente dos parâmetros mecânicos da

máquina.

O controlador Fuzzy apresentou bom rendimento junto a técnica de observação de carga para o controle de velocidade do motor a relutância variável. Por ser uma planta que apresenta não linearidade, o controlador Fuzzy é uma boa opção, já que o controlador PI pode ser melhor ajustado em plantas que possuem grande faixa linear.

5 Conclusões

Neste trabalho foi empregado um controlador Fuzzy para o controle de velocidade de um MRC de topologia 6 x 4 e 60 kW de potência. Os controladores Fuzzy possuem relativa facilidade de ajuste se comparado aos controladores PID e é mais robusto face às não linearidades do sistema a ser controlado. Os resultados apresentados nas figuras 5(a) e 5(b) mostram que o controlador Fuzzy mantém a velocidade do MRC dentro do valor estabelecido na referência, mesmo após a inserção de carga no eixo. Este desempenho foi possível de ser alcançado após a inserção de um observador de carga na simulação, o qual fornece ao controlador Fuzzy valores proporcionais à carga inserida no eixo, de forma que o controlador possa incrementar o valor do ângulo de desligamento das fases do MRC, entregando mais energia aos enrolamentos e, conseqüentemente, mantendo a velocidade do motor dentro do valor desejado.

Referências

- [1] G. S. Abbasian, Simulation and Testing of a Switched Reluctance Motor by MATLAB/SIMULINK and dSPACE, Dissertação de Mestrado em Máquinas Elétricas, Faculty of Electric Power Engineering, (2013).
- [2] A. F. V. da Silveira, Modelagem, Construção, Testes e Análise de Desempenho de um Gerador a Relutância Chaveado, Tese de Doutorado em Acionamentos Elétricos, UFU, (2008).
- [3] W. G da Silva, Speed Control of Electric Drives in the Presence of Load Disturbances, Tese de Doutorado em Computação Aplicada, University of Newcastle upon Tyne, (1999).
- [4] R. Krishnan, Electric Motor Drives: modeling, analysis, and control, Prentice Hall, vol. 1, (2001).
- [5] G. P. Viajante, Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede Elétrica para Injeção de Potência Ativa, Tese de Doutorado em Acionamentos Elétricos, UFU, (2013).