

TÉCNICA DE MODOS DESLIZANTES APLICADA AO CONTROLE DA TENSÃO DE SAÍDA DO GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

CAIO RUVIARO D. OSÓRIO*, RODRIGO PADILHA VIEIRA*, HILTON ABÍLIO GRÜNDLING*

**Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil*

Emails: caio.osorio@gmail.com, rodrigovie@gmail.com, ghilton03@gmail.com

Abstract— This paper presents the design of a sliding mode technique applied to the output voltage control of switched reluctance generators. The controller sets the reference to an hysteresis regulator from the tracking error. In order to adjust the phase currents around this reference, the regulator changes the state of the asymmetrical half bridge switches during the excitation mode. A model based on experimental data is used to simulate the system. Simulation results are presented in order to validate the proposed scheme.

Keywords— Switched Reluctance Generator, Generated Voltage Control, Sliding Mode Control, Asymmetrical Half Bridge, Hysteresis Current Control.

Resumo— Este artigo apresenta o projeto de uma técnica de modos deslizantes aplicada ao controle da tensão de saída de um gerador de relutância variável. A partir do erro de rastreamento da tensão, o controlador determina a referência de corrente do regulador de histerese. Para ajustar as correntes de fase da máquina em torno desta referência, o regulador altera o estado dos interruptores do conversor *half-bridge* assimétrico durante o período de excitação da máquina. Um modelo baseado em dados experimentais é utilizado para simular o sistema. Resultados de simulação são apresentados, a partir dos quais é possível validar o esquema proposto.

Palavras-chave— Gerador de Relutância Variável, Controle da Tensão Gerada, Controle por Modos Deslizantes, Conversor Half-Bridge Assimétrico, Controle por Histerese.

1 Introdução

Máquinas de relutância variável são caracterizadas por: estrutura simples, robustez, baixo custo, ausência de enrolamentos e de ímãs permanentes no rotor, elevado conjugado de partida, capacidade de operação com falta em uma das fases, dentre outras. Tais características tornam este tipo de máquina uma forte candidata para diversas aplicações como motor/gerador em velocidade variável e em ambientes severos, tais como geração eólica, geração de eletricidade em aeronaves, veículos elétricos e carga de baterias (Ding and Liang, 2010; Hu et al., 2015; Le-Huy, 2015; Cardenas et al., 2005; Bao et al., 2011).

Essencialmente é uma máquina que opera com corrente contínua pulsada, sendo capaz de consumir (MRV: Motor de Relutância Variável) ou gerar (GRV: Gerador de Relutância Variável) energia elétrica. Em regime de velocidade variável, o projeto apropriado da máquina de relutância e do seu circuito de acionamento pode resultar em um conjunto com rendimento superior ao de uma máquina de indução correspondente (Silveira, 2008).

Este trabalho tem como foco o GRV. Considerando aplicações automotivas e aeroespaciais, este gerador se mostra adequado pois a ausência de enrolamentos no rotor permite a operação em velocidades muito elevadas. Nas aplicações eólicas, o sistema de controle do GRV deve ser projetado para operar em seu ponto ótimo de geração, sendo que a máquina opera satisfatoriamente em baixas velocidades e com alto conjugado no eixo.

Em contrapartida, devido às saliências duplas e ao fato de operar geralmente na região de saturação magnética, a máquina de relutância variável apresenta características fortemente não lineares. Normalmente não é possível representar um modelo linear eficiente como é feito para outras topologias, dificultando o projeto do sistema de controle e acionamento (Ding and Liang, 2010).

Outra característica indesejável inerente a sua operação são as oscilações de tensão e conjugado. Pesquisas recentes na intenção de minimizar esta deficiência podem ser encontradas em (Oliveira et al., 2015) e (Mikail et al., 2013). Em (Husain et al., 2016; Kiani, 2014; Sozer et al., 2015; Choi et al., 2014; Liu et al., 2015) distintas técnicas de controle são analisadas. Exemplos de trabalhos abordando métodos de modelagem e simulação são apresentados nos trabalhos de (Le-Huy, 2015; Barros et al., 2015; Le-Huy and Brunelle, 2005).

Em (Husain et al., 2016) é proposto uma estratégia de enfraquecimento de campo para MRV, na qual um controle em coordenadas dq é desenvolvido para aplicações com rigorosos requisitos de torque. Em (Kiani, 2014) um controlador preditivo das correntes estatóricas do GRV é apresentado. Uma técnica de controle por modos deslizantes baseada na otimização de um algoritmo genético é proposta em (Liu et al., 2015).

O presente artigo apresenta uma técnica de controle por modos deslizantes (SMC -*Sliding Mode Control*) aplicada ao GRV. O acionamento é realizado a partir de um conversor *half-bridge*

assimétrico (AHB). O controlador SMC define a referência de corrente para o regulador de histerese, que ajusta as correntes de fase em torno desta referência. Tanto o regulador de histerese quanto o SMC são técnicas não lineares que se mostram adequadas ao controle do GRV, uma vez que este também apresenta característica intrinsecamente não linear, com etapas de operação discretas. Além disto, características do controlador SMC como fácil implementação e robustez são vantajosas nesta aplicação.

Para o correto projeto do controlador é apresentada a descrição do sistema em espaço de estados. Resultados de simulação são apresentados para validar a técnica proposta, os quais são obtidos por um modelo não-linear baseado em dados experimentais.

2 Princípio de Operação

As máquinas de relutância variável operam com variáveis contínuas e necessitam de um conversor estático para o seu funcionamento. São compostas por dupla saliência, sendo que os enrolamentos de fase estão concentrados nos polos do estator. A operação como MRV ou GRV pode ser facilmente determinada pelos ângulos de chaveamento (θ_{on} e θ_{off}), considerando o sincronismo entre a excitação de fase e a taxa de variação da indutância em função da posição rotórica. Na subseção seguinte o sistema de acionamento do GRV é detalhado.

2.1 Acionamento do GRV

Para que a máquina opere como GRV é necessário excitar cada uma das fases durante o intervalo decrescente de sua indutância. Tal condição é imposta pois, considerando o rotor em movimento devido a ação externa de uma fonte primária, ao excitar as fases de uma maneira contrária a tendência natural do rotor em alinhar os seus polos aos da fase excitada, o torque eletromagnético produzido resulta em uma força contra eletromotriz (FCEM) que, como resultado, converte a energia da fonte primária em energia elétrica, caracterizando-se a geração (Silveira et al., 2009).

Existem distintas topologias de conversores de potência capazes de acionar o GRV. Analisando-se a literatura observa-se que a configuração mais utilizada é o conversor *half-bridge* assimétrico (AHB) apresentado na Figura 1. Este conversor permite acionar a máquina tanto como GRV quanto MRV. Deve-se observar que o conversor apresentado encontra-se em sua configuração auto excitada, onde pressupõe-se que uma excitação inicial é fornecida ao capacitor por meio de uma fonte externa.

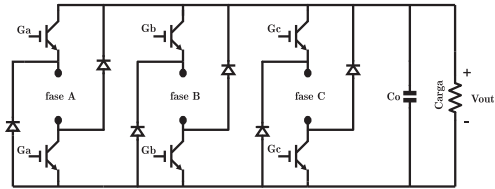


Figura 1: Conversor AHB para acionamento do GRV.

2.2 Etapas de operação

A operação do AHB apresenta duas etapas: excitação e geração. A etapa de excitação de cada fase ocorre quando as duas chaves conectadas a ela estão em condução e os diodos encontram-se bloqueados. O capacitor C_o transfere energia para a fase e a corrente começa a crescer. A Figura 2(a) apresenta esta etapa. A tensão na fase é substituída por seu equivalente elétrico conforme descrito pela equação (1). O termo mais à direita da igualdade representa a FCEM e .

$$v_{ph} = r_{ph}i_{ph} + L\frac{di_{ph}}{dt} + i\omega\frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

Na etapa de geração, Figura 2(b), as chaves conectadas a fase encontram-se bloqueadas e a corrente passa a circular através dos diodos. A energia transferida para a carga neste período é composta pela energia de excitação da fase, somada a parcela proveniente da fonte primária através de conversão eletromecânica. A tensão que faz circular corrente na carga é a FCEM induzida na bobina de fase pelo movimento relativo do rotor à fase magnetizada.

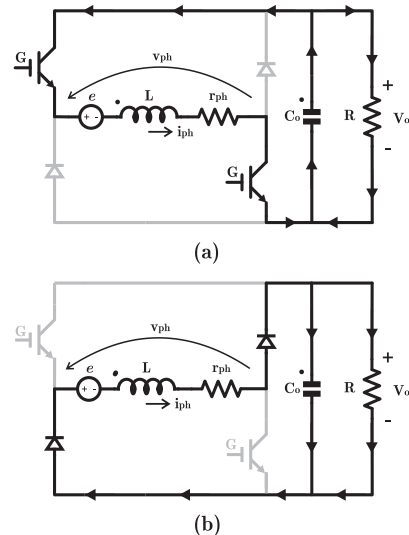


Figura 2: Etapas de operação do conversor AHB por fase. (a) Excitação (b) Geração.

Para que a excitação ocorra no intervalo decrescente de indutância é necessário determinar os ângulos de início (θ_{on}) e término (θ_{off}) da etapa de excitação. Para tanto, deve-se conhecer o perfil de indutância das fases e a posição relativa do rotor em relação a estas.

Resolvendo (13) obt m-se que

$$\dot{V} = \frac{1}{C_o} \left[\begin{array}{l} -\alpha k x_1^2 + x_2^2 (k C_o - \frac{1}{R} - \beta) - \gamma |\sigma| + \\ + (-\alpha + k^2 C_o - k \frac{1}{R} - k \beta) x_1 x_2 \end{array} \right] \quad (15)$$

Partindo deste resultado   possível projetar os ganhos α , β e γ de modo a garantir a estabilidade da função Lyapunov (15), o que resulta

$$\begin{aligned} \alpha &> 0 \\ \beta &> k C_o - \frac{1}{R} \\ \gamma &> 0 \end{aligned} \quad (16)$$

4 Resultados de Simulação

Para simulação do sistema é utilizada a ferramenta computacional *Simulink/SimPowerSystems*. O modelo utilizado é obtido a partir de dados experimentais provenientes dos ensaios de magnetização, tal como apresentado em (Le-Huy and Brunelle, 2005) e (Barros, 2015).

O GRV em estudo apresenta as seguintes características: 3 fases, 2 kW, velocidade nominal de 1500 rpm, 12 polos no estator e 8 polos no rotor (configuração 12x8). A partir do ensaio de magnetização   possível gerar as tabelas ITBL e TTBL, apresentadas na Figura 4. A tabela ITBL retorna o valor de corrente em cada uma das *i simas* fases em função do fluxo magnético e da posição rotórica relativa. A tabela TTBL retorna o torque eletromagnético em cada fase a partir da corrente de fase e da posição relativa. A Figura 5 apresenta a estrutura do modelo utilizado.

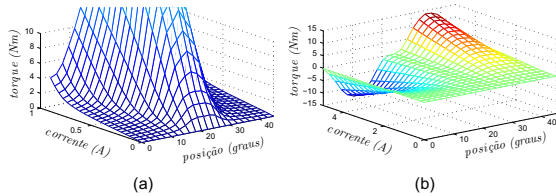


Figura 4: Tabelas. (a) ITBL (b) TTBL

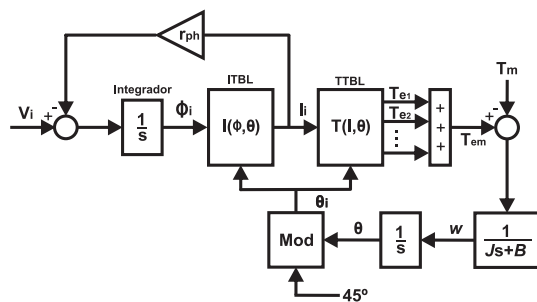


Figura 5: Estrutura do modelo para simulação do GRV

O fluxo magnético é calculado conforme (17). A posição relativa de cada fase θ_i é obtida a partir da posição do rotor θ . Para a configuração em questão, leva-se em consideração que o perfil de

indutâncias possui um período de 45 graus e uma defasagem de 15 graus entre as fases.

$$\phi_i(t) = \int_0^t (v_{ph_i} - r_{ph} i_{ph_i}) dt \quad (17)$$

O conversor AHB é simulado considerando componentes discretos, sendo $C_o = 2250 \mu F$. A referência de corrente é gerada pela equação (11), considerando os seguintes ganhos: $\alpha = 10$, $\beta = 0.3$ e $\gamma = 1$. O ganho da superfície $k = 10$ e a parcela chaveada $sign(\sigma)$ é implementada usando uma função sigmoide.

4.1 Rejeição a distúrbio de carga

O controlador é testado primeiramente considerando um degrau de carga de 400 W para 800 W em 0.4 s. A referência de tensão é definida em 400 V e a velocidade em 80 rad/s. A Figura 6 apresenta o comportamento da tensão de saída. Observa-se que o controlador é capaz de restabelecer a tensão gerada em 100 ms com uma queda de tensão em torno de 1.5 %.

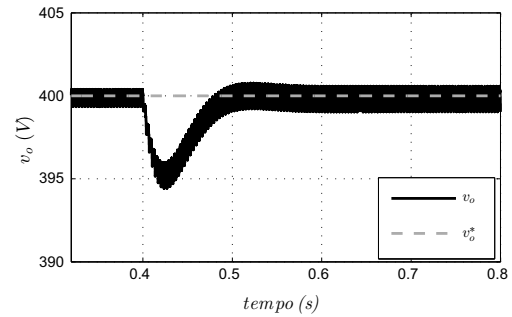


Figura 6: Resposta de tensão de saída frente a distúrbio de carga. Degr u de 400 W para 800 W em 0.4 s.

A referência de corrente é apresentada na Figura 7(a), a partir da qual é possível verificar que, para rejeitar o incremento de carga, o controlador eleva a referência de corrente. As correntes de fase são aproximadas na Figura 7(b) e Figura 7(c), apresentando as correntes de fase antes e após o degr u de carga, respectivamente. Com estes sinais   possível verificar a atuação do regulador de histerese a partir da descontinuidade da corrente em torno do valor de referência.

4.2 Variação de velocidade

Nesta seção a velocidade da máquina é variada em degr u de 80 rad/s para 100 rad/s em 0.4 s e, novamente para 80 rad/s em 0.8 s. A referência de tensão é definida em 400 V com uma carga de 800 W. A Figura 8 mostra a tensão gerada nesta situação. A referência de corrente é apresentada na Figura 9. Cabe observar que uma variação tão abrupta de velocidade está distante da realidade prática, objetivando apenas verificar a robustez do sistema frente a tal situação.

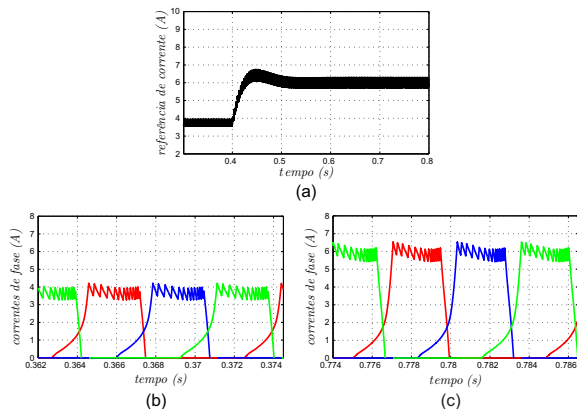


Figura 7: Resposta ao distúrbio de carga, de 400 W para 800 W em 0.4 s. (a) referência de corrente; (b) correntes de fase antes do degrau; (c) correntes de fase após o degrau.

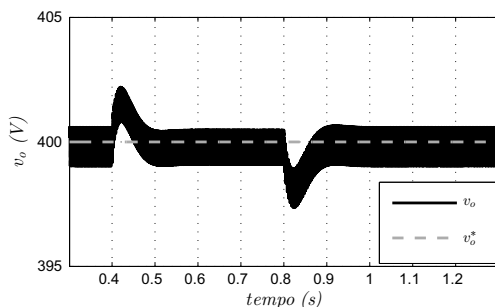


Figura 8: Resposta de tensão gerada frente a variação de velocidade. De 80 rad/s para 100 rad/s em 0.4 s e novamente para 80 rad/s em 0.8 s.

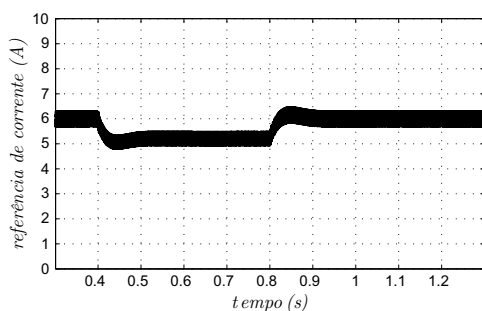


Figura 9: Referência de corrente frente a variação de velocidade. De 80 rad/s para 100 rad/s em 0.4 s e novamente para 80 rad/s em 0.8 s.

4.3 Variação paramétrica

Como variação paramétrica é aplicado um distúrbio na característica de magnetização da máquina, variando a indutância de cada fase. A Figura 10 apresenta as curvas de magnetização originais (pontilhadas) e as curvas modificadas (contínuas). O par de retas na parte inferior da imagem representam a posição desalinhada, não havendo saturação. A Figura 11 apresenta a regulação da tensão gerada frente a variação paramétrica.

4.4 Rastreamento da referência

Variando a referência da tensão de saída de 300 V para 400 V, o comportamento do sistema pode

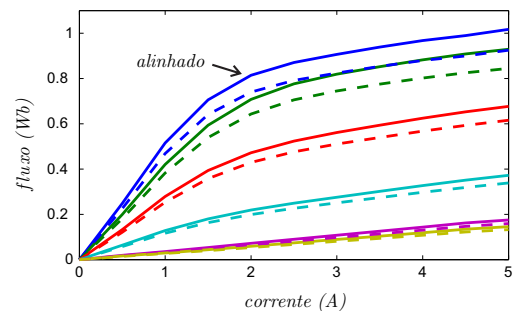


Figura 10: Alteração na característica de magnetização - pontilhadas: original; contínuas: distúrbio.

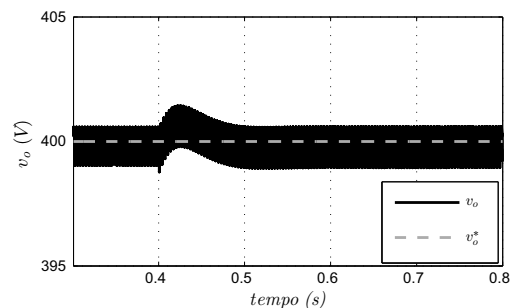


Figura 11: Tensão gerada em função de variação paramétrica em 0.4 s.

ser visto na Figura 12. A velocidade é mantida constante em 80 rad/s e a resistência de carga em 200 Ω . Um tempo de acomodação em torno de 100 ms e uma sobre-elevação menor que 5 % são observadas.

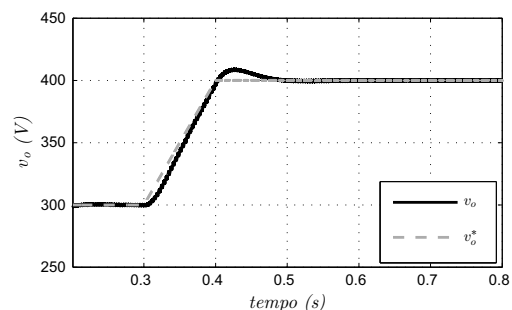


Figura 12: Rastreamento da referência de tensão de saída.

5 Conclusão

Este artigo apresentou uma técnica de modos deslizantes aplicada ao controle da tensão de saída de geradores de relutância variável. O sistema de acionamento é realizado a partir de um conversor *half-bridge* assimétrico. A partir da definição de dois estados, o erro de rastreamento e sua derivada, uma descrição em espaço de estados é obtida. Com esta, deriva-se a lei de controle por modos deslizantes. Resultados de simulação validam a técnica apresentada, provando ser capaz de manter a tensão gerada regulada frente a variações na carga, nos parâmetros e na velocidade.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Projeto 307657/2013-2) pelo suporte financeiro.

Referências

- Bao, Y. J., Cheng, K. W. E., Xue, X. D., Chan, J., Zhang, Z. and Lin, J. K. (2011). Research on a novel switched reluctance generator for wind power generation, *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications* pp. 1–6.
- Barros, T. A. S. (2015). *Propostas de Controle de Potência e Otimização do Desempenho do Gerador de Relutância Variável Aplicado em Geração Eólica Conectada À Rede Elétrica de Baixa Tensão*, PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.
- Barros, T. A. S., Nascimento Filho, P. S., Moreira, B. A., Teixeira, V. S., Villalva, M. G. and Ruppert, E. (2015). Sistema Automático De Caracterização De Máquinas A Relutância Variável e Modelagem Não Linear Por Interpolações Utilizando Smoothing Splines, *Eletrônica de Potência* **20**: 140–150.
- Cardenas, R., Pena, R., Perez, M., Clare, J., Asher, G. and Wheeler, P. (2005). Control of a Switched Reluctance Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **20**(4): 781–791.
- Choi, D. W., Byun, S. I. and Cho, Y. H. (2014). A Study on the Maximum Power Control Method of Switched Reluctance Generator for Wind Turbine, *IEEE Transactions on Magnetics* **50**(1): 1–4.
- Ding, W. and Liang, D. (2010). A Fast Analytical Model for an Integrated Switched Reluctance Starter / Generator, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(4): 948–956.
- Hu, K. W., Wang, J. C., Lin, T. S. and Liaw, C. M. (2015). A Switched-Reluctance Generator With Interleaved Interface DC/DC Converter, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **30**(1): 273–284.
- Husain, T., Elrayyah, A., Sozer, Y. and Husain, I. (2016). Flux-weakening control of switched reluctance machines in rotating reference frame, *IEEE Transactions on Industry Applications* **52**(1): 267–277.
- Kiani, M. (2014). Model predictive control of stator currents in Switched Reluctance Generators, *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* pp. 842–846.
- Le-Huy, H. (2015). Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Generator for Aircraft Power Systems, *International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, pp. 5–10.
- Le-Huy, H. and Brunelle, P. (2005). A versatile nonlinear switched reluctance motor model in simulink using realistic and analytical magnetization characteristics, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) 2005(c)*: 1556–1561.
- Liu, Y. Z., Zhou, Z., Song, J. L., Fan, B. J. and Wang, C. (2015). Based on sliding mode variable structure of studying control for status switching of switched reluctance starter/generator, *Chinese Automation Congress (CAC), 2015*, pp. 934–939.
- Mikail, R., Husain, I., Sozer, Y., Islam, M. S. and Sebastian, T. (2013). Torque-Ripple Minimization of Switched Reluctance Machines Through Current Profiling, *IEEE Transactions on Industrial Applications* **49**(3): 1258–1267.
- Oliveira, E. S. L., Aguiar, M. L. and Silva, I. N. (2015). Strategy to Control the Terminal Voltage of a SRG Based on the Excitation Voltage, *IEEE Latin America Transaction* **13**(4): 975–981.
- Silveira, A. F. V. (2008). *Modelagem, Construção, Teste e Análise de Desempenho de Um Gerador a Relutância Chaveado*, PhD thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlândia - MG.
- Silveira, A. W. F. V., Andrade, D. A., Fleury, A. V. S., Gomes, L. C. and Bissochi, C. A. (2009). Control of the SRM Operating as a Motor Generator, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* pp. 1558–1563.
- Sozer, Y., Husain, I. and Torrey, D. A. (2015). Guidance in Selecting Advanced Control Techniques for Switched Reluctance Machine Drives in Emerging Applications, *IEEE Transactions on Industry Applications* **51**(6): 3776–3783.