

ACIONAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO NA CARGA

Assunção, A.C., Silveira, A.W.F.V., Andrade, A.A., Gomes, L.C., Fleury, A*.

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE)

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

amanda.feelt@gmail.com, augustofleury@eletrica.ufu.br, darizon@ufu.br, lcgomes@ufu.br, afleury@terra.com.br

Resumo - Este artigo tem como objetivo apresentar uma estratégia de controle de tensão aplicada à carga para um gerador a relutância variável trifásico 6x4. A estratégia desenvolvida é baseada na utilização um controlador do tipo proporcional integral, que gera um sinal de referência para um controlador do tipo histerese, utilizado no controle da corrente de magnetização. Esse sinal é proporcional ao erro entre a referência de tensão na carga e o valor referido da mesma. Essa estratégia utiliza uma malha interna de controle de corrente que tem como principal vantagem, a possibilidade de adicionar à estratégia de controle rotinas de proteção. A estratégia foi implementada e testada através de simulação computacional e experimentalmente utilizando a plataforma DSP.

Palavras-Chave - Gerador a relutância variável, conversor meia ponte, controle de tensão na carga.

DRIVE THE SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR WITH MESH LOAD VOLTAGE CONTROL

Abstract - This paper will present a voltage control strategy applied to the load for a triphasic variable reluctance generator 6x4. The developed strategy is based on the use of a proportional integral controller which generates a reference signal for a hysteresis controller, used to control the magnetization current. This signal is proportional to the difference between the voltage applied to the load and its reference value. This strategy uses an internal current control loop which has as its main advantage the possibility to aggregate protection routines to the control strategy. The strategy was implemented and tested through computational simulation and empirically using the DSP platform.

Keywords - Switched reluctance generator, half-bridge converter, load voltage control.

I. INTRODUÇÃO

Conhecida desde o século XIX, a máquina a relutância variável (MRV) apresentou um lento desenvolvimento estando entre as máquinas que, após a década de noventa, mais se favoreceram com os avanços da eletrônica de potência, do sensoriamento, do microprocessamento e do processamento digital de sinais. O que de fato as tornaram mais viáveis, confiáveis e eficientes [1].

Com os avanços tecnológicos da eletrônica, a máquina a relutância variável se tornou competitiva com relação a outros tipos de máquinas [2], além de sustentar a superioridade em algumas aplicações específicas. Aplicações estas em que, normalmente, a operação se dá com velocidade variável [3] e onde a busca por máquinas elétricas trabalhando com melhores rendimentos ainda é presente [4].

A máquina a relutância variável opera segundo o princípio da máxima energia armazenada no circuito magnético, ou seja, mínima relutância. De maneira simplificada, os sistemas de acionamentos para máquinas a relutância variável, compõem-se de um conversor de energia, um sistema de controle e um sistema de medição de grandezas elétricas e/ou mecânicas.

Como citado anteriormente, a máquina a relutância variável, possui um bom desempenho em velocidades variáveis, característica esta que tornou o estudo da máquina promissora para aplicações na geração eólica. O gerador a relutância variável tem se tornado cada vez mais competitivo, devido ao fato da máquina de indução utilizada atualmente nesta aplicação precisar de um conversor eletrônico de potência para seu acionamento e uma caixa de câmbio para realizar regulagens na velocidade [5].

Por meio do levantamento bibliográfico, constatou-se que o conversor que melhor se adequa ao sistema de acionamento da MRV operando como gerador seria o *half-bridge*, que caracteriza-se por possuir duas chaves controladas em série com a fase da máquina e dois diodos, utilizados para desmagnetização da bobina da fase após o período de magnetização da mesma.

O controle de corrente durante a operação como gerador é uma tarefa difícil, uma vez que, a força contra eletromotriz, na operação geradora, é uma fonte de tensão que age de forma a aumentar a circulação de corrente na fase. Mesmo durante a etapa de desmagnetização a corrente continua crescendo, sendo necessária uma estratégia de controle de tensão na carga diferente da operação motora.

Uma vez que as estratégias de controle para o gerador a relutância variável (GRV) foram pouco exploradas e tendo em vista a dificuldade do controle, o presente artigo,



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

apresenta um estudo feito com o GRV, operando em malha fechada de tensão gerada na carga. A estratégia desenvolvida é apresentada, e validada através de simulação e experimentos

II. CARACTERÍSTICAS DO GRV

Podendo ser considerado simples, o princípio de funcionamento da máquina a relutância variável parte do fundamento da máxima energia armazenada no circuito magnético, ou seja, mínima relutância, assim, quando uma determinada fase da máquina é energizada, o rotor tende a se deslocar para uma posição onde a relutância é mínima a qual corresponde, à posição onde a indutância da bobina excitada do estator é máxima [6].

A máquina a relutância variável é caracterizada basicamente por um rotor e um estator, laminados, com polos salientes e bobinas restritas aos polos do estator. Existe uma série de configurações em que a MRV pode ser estudada. A figura 1 apresenta a estrutura de uma máquina trifásica com seis polos no estator e quatro polos no rotor.

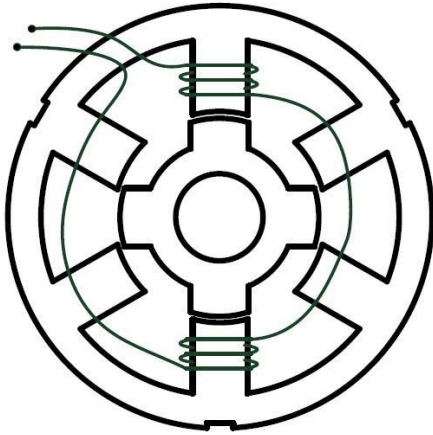


Figura 1. Desenho da seção transversal de uma MRV 6X4 mostrando o enrolamento de uma das três fases.

A máquina a relutância variável é um conversor eletromecânico de estrutura simples que pode funcionar tanto como gerador quanto motor, mudando apenas o ângulo de acionamento das chaves do conversor eletrônico conforme representado na figura 2 [7].

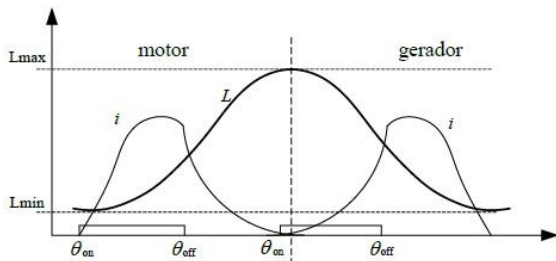


Figura 2. Variação da indutância de uma fase da MRV.

A. Modelagem Matemática

Partindo para o equacionamento, um circuito equivalente elementar pode ser obtido negligenciando-se a indutância mútua entre as fases. Assim, a tensão nos terminais de um

enrolamento da máquina a relutância variável pode ser escrita como:

$$v = R_f i + \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial t} \quad (1)$$

onde: v e i são respectivamente a tensão da máquina e a corrente que circula nos enrolamentos da máquina, R_f é a resistência do enrolamento e $\lambda(\theta, i)$ é o fluxo enlaçado pelo enrolamento. Estes parâmetros são referentes a uma fase e variam de acordo com a posição do rotor em relação ao tempo t , com exceção da resistência R_f .

A corrente no circuito relaciona-se com o fluxo magnético através da indutância própria, como pode ser verificado em:

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) i \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) na equação (1) e levando em consideração que L é uma função da posição angular (θ) do rotor e da corrente, no domínio do tempo temos que a tensão pode ser escrita como sendo:

$$v = R_f i + L(\theta, i) \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

Considerando que a variação angular do rotor em relação ao tempo ($\frac{d\theta}{dt}$) é a velocidade angular (ω), a equação (3) pode ser escrita como:

$$v = R_f i + L(\theta, i) \frac{\partial i}{\partial t} + i \omega \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (4)$$

Os três termos do lado direito da equação (4) representam, respectivamente, a queda de tensão existente na resistência do enrolamento, a queda de tensão indutiva e a força contra eletromotriz que depende da variação da indutância em relação à posição angular da velocidade e da corrente, por isso o acionamento da MRV como gerador é um tanto complexo [4].

Substituindo então as equações acima na equação da potência de entrada, tem-se:

$$pe = vi = R_f i^2 + L(\theta, i) i \frac{\partial i}{\partial t} + i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} \quad (5)$$

Colocando em termos já conhecidos a equação acima fica:

$$pe = R_f i^2 + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} \quad (6)$$

O último termo da expressão representa a potência no entreferro, expressando o tempo em termos de posição do rotor e velocidade, temos que a potência no entreferro pode ser escrita como:

$$p_{ent} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \omega_n \quad (7)$$

Uma vez que a potência no entreferro é o produto do conjugado eletromagnético pela velocidade do rotor, obtemos que o conjugado é dado por:

$$c_{emag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (8)$$

Assim a expressão geral do conjugado das fases será:

$$c_{emag} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} \quad (9)$$

O modelo matemático da MRV, considerando as três fases é apresentado por (10):

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ C_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 & 0 & i_a \frac{\partial L_a(\theta)}{\partial \theta} \\ 0 & L_b & 0 & 0 & i_b \frac{\partial L_b(\theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_c & 0 & i_c \frac{\partial L_c(\theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

$$r_1 = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a(\theta)}{\partial \theta}; r_2 = \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b(\theta)}{\partial \theta}; r_3 = \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c(\theta)}{\partial \theta}$$

Designado por $[V]$, $[R]$, $[I]$, $[L]$, $[\dot{I}]$ as matrizes na ordem em que aparecem em (10), a matriz de estados da MRV tem a seguinte forma:

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (11)$$

B. Modelagem Computacional

Para fazer a simulação da máquina a relutância variável 6x4 operando como gerador, foi usado o programa *Matlab/Simulink*[®]. Os dados relacionados ao dimensionamento da máquina simulada estão na tabela 1 e são de uma máquina projetada para os ensaios experimentais (Fig. 3). Maiores detalhes relacionados a modelagem podem ser encontrados em [4].



Figura 3. Máquina a relutância variável usada para obtenção dos parâmetros para a simulação.

Tabela 1. Parâmetros da máquina a relutância variável.

Parâmetros	Valor
Ângulo de Condução	30 graus
Atrito Viscoso	0.026 N.m.s
Culatra do Estator	12 mm
Culatra Rotor	12,4 mm
Comprimento da pilha laminada	107 mm
Dentes do Estator	22,5 mm
Dentes do Rotor	11,7 mm
Diâmetro do Estator	140 mm
Diâmetro do Rotor	70 mm
Gap de Ar	0,4 mm
Indutância (posição alinhada)	36 mH
Indutância (posição desalinhada)	3 mH
Largura dos dentes do Estator	19 mm
Largura dos dentes do Rotor	20 mm
Momento de Inércia	0,0028 kg.m ²
Número de espiras por fase	100 volta/fase

O gerador a relutância variável assim como qualquer máquina elétrica, é um conversor eletromecânico de energia. Para que a MRV opere como gerador é necessário magnetizar as fases da máquina durante a diminuição do valor da indutância em relação a variação da posição rotórica.

A figura 4, apresenta o diagrama de blocos do conversor *half-bridge* adaptado para a MRV operar como gerador. A figura 5 representa respectivamente o circuito de magnetização, roda livre e desmagnetização das fases da MRV operando como gerador.

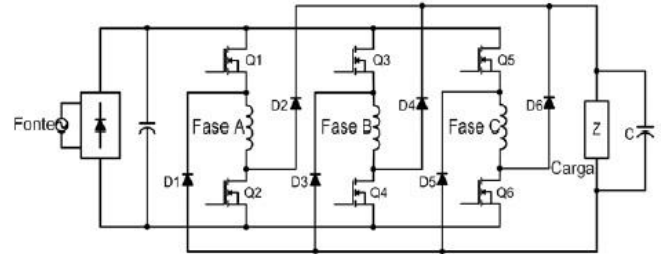


Figura 4. Diagrama de blocos da simulação computacional do conversor *half-bridge*.

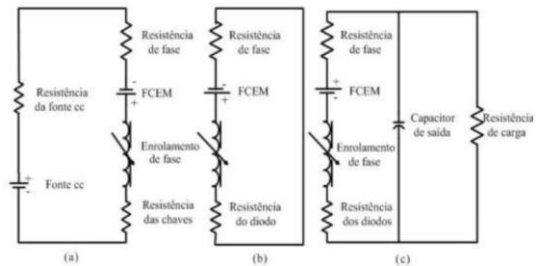


Figura 5. Circuitos desmagnetização, roda livre e de desmagnetização das bobinas.

C. Controle do GRV

O controle de corrente da máquina a relutância variável durante a operação como gerador é uma tarefa difícil, uma

vez que, a força contra eletromotriz, na operação geradora, é uma fonte de tensão que age de forma a aumentar a circulação de corrente na fase. Mesmo durante a etapa de desmagnetização a corrente continua crescendo, sendo necessária uma estratégia de controle de tensão na carga diferente da operação motora.

O gerador a relutância variável pode ser controlado para produzir uma potência desejada na carga, como é o caso de aplicações onde é interessante que o GRV opere em seu ponto ótimo de geração [7] ou, pode ser controlado para produzir na carga uma tensão constante, variando a potência com a variação da resistência de carga. Em aplicações embarcadas, por exemplo, é necessário que a tensão no barramento corrente contínua (cc) não sofra grandes variações.

Diante destas informações e com o intuito de averiguar a operacionalidade do GRV operando em malha fechada tensão gerada na carga, uma estratégia para este tipo de controle baseada na utilização de um controlador de corrente de magnetização do tipo histerese, será apresentada, simulada e testada experimentalmente.

Esta estratégia de controle de tensão na carga para o gerador a relutância variável, utiliza um controlador PI para gerar um sinal de referência para um controlador do tipo histerese, utilizado no controle de corrente de magnetização da fase. Este sinal é proporcional ao erro entre a referência de tensão na carga e o valor aferido na mesma como é representado na figura 6.

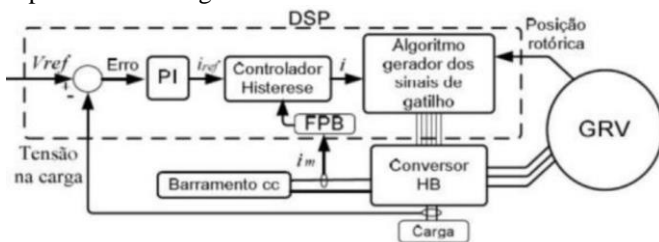


Figura 6. Diagrama de blocos do controle de tensão na carga.

A partir da figura, observamos que a malha mais externa – responsável pelo controle de tensão na carga, gera um sinal de referência para o controlador por histerese da malha interna, que tem como função controlar a corrente proveniente do barramento cc (i_m), usada na magnetização das fases. Mas para que o controlador de corrente funcione corretamente, a corrente de magnetização passa por um filtro passa baixa (FPB) introduzindo um pequeno atraso no sinal de corrente de entrada.

Esse pequeno atraso é necessário porque durante a magnetização das fases do GRV uma tensão chaveada é aplicada, e assim, a corrente i_m utilizada na magnetização cai a zero instantaneamente no momento em que a chave superior do conversor relacionada a uma fase se abre. Ao introduzir o FPB é permitido utilizar o controlador de histerese de forma eficaz e com frequência de chaveamento adequada.

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com a finalidade de validar a estratégia desenvolvida, testes e simulações foram realizados com os seguintes

critérios: o gerador a relutância variável operou em malha fechada, sendo controlado utilizando a estratégia de controle descrita neste artigo, a tensão de barramento cc que alimenta o conversor *half-bridge* foi configurada com 42 V, a velocidade de operação da máquina foi configurada para ser constante a 1350 rpm. A máquina foi simulada durante oito segundos e foi submetida a um transitório de resistência de carga acoplada ao GRV, onde a resistência foi reduzida de 20 Ω a 15 Ω com três segundos de simulação e, quando o tempo atingiu seis segundos, a resistência de carga retornou para seu valor inicial.

Pela figura 7, pode ser observado que para toda a simulação, incluindo transitórios de carga, o controle manteve a tensão na carga com o valor em torno da referência de 42 V.

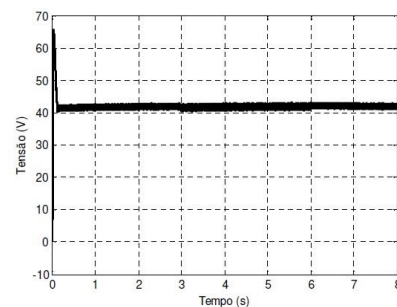


Figura 7 - Curva de tensão na carga durante o teste de transitório de resistência da carga (20 Ω - 15 Ω).

Pela figura 8, as amplitudes das correntes das fases do GRV durante toda a simulação de oito segundos podem ser observadas. Com o GRV operando com esta estratégia de controle, a amplitude da corrente de fase oscila, porém, pela figura 7, pode ser visto que estas oscilações não afetam significativamente as oscilações presentes no sinal de tensão na carga.

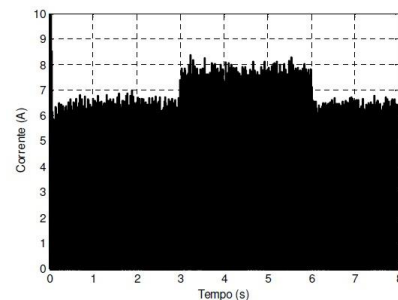


Figura 8. Curva de corrente nas fases durante a simulação com transitório de carga.

A figura 9 apresenta a curva da corrente de uma das fases juntamente com o respectivo sinal de gatilho, para um ciclo de magnetização da fase, onde se vê o sinal de gatilho aplicado na chave superior do conversor relacionada à fase em questão para que se tenha a etapa de roda livre, o que melhora a capacidade de geração de energia elétrica.

Na figura 10, pode-se observar o sinal de tensão em uma das três fases do GRV alimentando a carga resistiva de 20 Ω é apresentado.

Pela figura 11 podemos observar as curvas potência de entrada e saída elétricas do GRV. Verificase que o GRV controlado pela estratégia baseada na utilização de um

controlador de corrente de magnetização do tipo histerese gera 65 W, aproximadamente, alimentando a carga de 20 Ω.

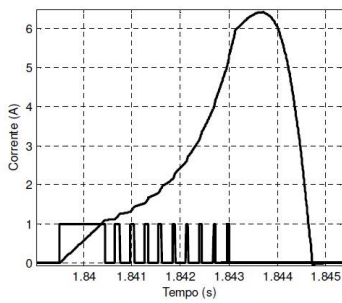


Figura 9. Curva de corrente e sinal de gatilho para uma das fases do GRV.

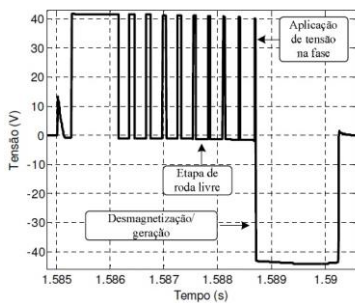


Figura 10. Curva de tensão na fase A.

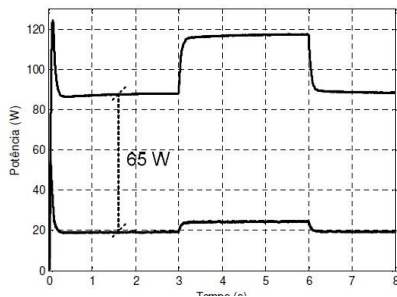


Figura 11. Potência de entrada e saída do GRV.

Essa estratégia de controle de tensão na carga do GRV usa uma malha interna de corrente. A vantagem de se ter esta malha de corrente é a possibilidade de adicionar à estratégia de controle rotinas de proteção, que reduzirão a magnetização do gerador caso as correntes de fase assumam valores elevados.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com intuito de validar experimentalmente a estratégia de controle apresentada, o GRV descrito anteriormente foi acoplado a um motor de indução trifásico de 2 cv, 4 pólos, acionado por um conversor de frequência comercial. O conversor HB foi construído para acionar o GRV e a estratégia de controle foi programada para ser executada em um DSP TMS320F2812, utilizado no sistema. A posição do rotor, necessária para a aplicação dos sinais de gatilho durante o período de magnetização das fases, foi obtida utilizando sensores ópticos associados a um disco, que representa o exato instante em que cada fase deve ser

magnetizada. A figura 12 apresenta uma foto da bancada de testes montada no laboratório.

A estratégia de controle utiliza um controlador PI, sendo necessário converter a equação deste controlador para o domínio do tempo discreto, para que o mesmo pudesse ser executado no processador utilizado. A equação 12 representa a equação do controlador na sua forma discreta.

$$U_{k+1} = K_p \cdot E_{k+1} + K_p \cdot \left(\frac{K_i}{K_p} \cdot T_s - 1 \right) \cdot E_k + U_k \quad (12)$$

O controlador PI, utilizado na estratégia desenvolvida, foi sintonizado com facilidade por tentativa e erro, e os coeficientes empregados foram: $K_p = 0,5$ e $K_i = 0,1$.

O filtro passa baixas usado para filtrar o sinal de corrente de entrada do conversor half-bridge é representado em Laplace conforme mostrado na equação 13. Para ser digitalizado, este filtro deve ser reescrito em forma de uma equação de diferença através da transformada Z (equação 14).

$$S = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (13)$$

$$U_{k+1} = \frac{\omega_c T_s}{2 + \omega_c T_s} I_{k+1} + \frac{\omega_c T_s}{2 + \omega_c T_s} I_k + \frac{2 - \omega_c T_s}{2 + \omega_c T_s} U_k \quad (14)$$

Onde U_{k+1} é o sinal filtrado, I_{k+1} é o sinal de entrada, I_k é o sinal de entrada na amostragem anterior, U_k é o sinal filtrado na amostragem anterior e T_s é o período de amostragem.

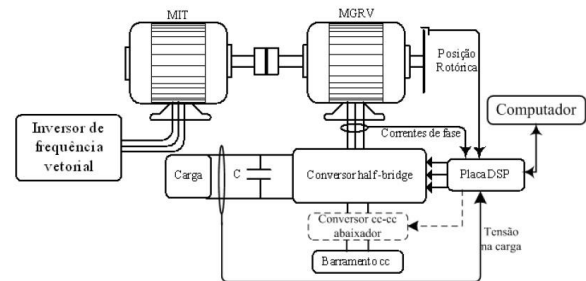


Figura 12. Visão geral da bancada experimental.

A figura 13 mostra as curvas de corrente de uma das fases da máquina e a curva da tensão na carga em um ensaio com transitório de referência de 42 V para 30 V. Pode ser observado que o controle manteve o sinal de tensão na carga com valor próximo ao de referência e ao analisar o sinal de corrente na fase, observa-se a presença de oscilações de amplitude o que reflete no sinal de tensão na carga.

Pela figura 14 podemos observar as curvas de tensão na carga e corrente em uma das fases do gerador para o ensaio com transitório de carga de 20 Ω para 15Ω. Verifica-se que o controle mantém o valor da tensão na carga próximo ao de referência, porém, quando a carga aumenta, as oscilações na amplitude da corrente de fase e da tensão na carga aumentam.

A figura 15 apresenta as curvas de corrente em uma das fases e o respectivo sinal de gatilho da chave superior para o GRV operando com carga de 20Ω e referência de 30 V.

Pela figura 16, pode ser observado os sinais de tensão de uma das fases do GRV e o respectivo sinal de gatilho aplicado à chave superior do conversor relacionada a esta fase.

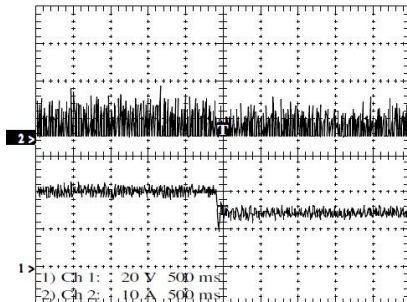


Figura 13. Curvas de corrente de uma das fases e de tensão na carga do GRV controlado (Hi), para o ensaio com transitório de referência.

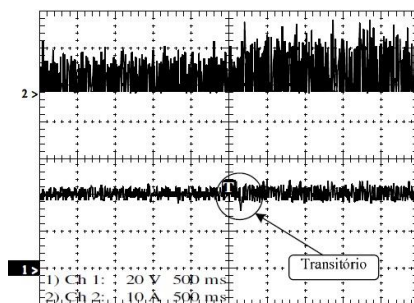


Figura 14. Curva de corrente e tensão de uma das fases e de tensão na carga do GRV controlado (Hi), para o ensaio com transitório de carga.

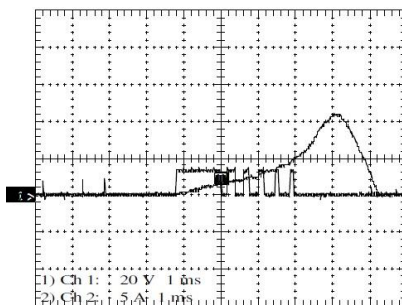


Figura 15. Curva de corrente em uma das fases do GRV e o respectivo sinal de gatilho da chave superior do conversor relacionada à esta fase.

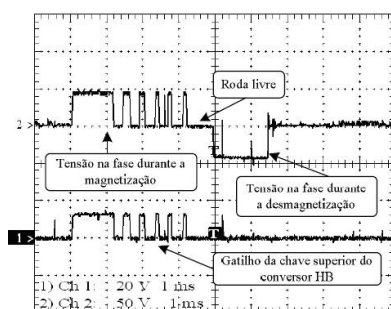


Figura 16. Curva de tensão em uma das fases e o respectivo sinal de gatilho, com carga de 20Ω e referência de 42 V.

V. CONCLUSÃO

O funcionamento de uma máquina a relutância variável 6x4 operando como gerador controlado em malha fechada de tensão na carga foi estudado neste trabalho. Uma estratégia de controle de tensão na carga baseada na utilização de um controlador de corrente de magnetização do tipo histerese foi testada através de simulação do protótipo montado e experimentalmente utilizando um DSP de ponto fixo. Os resultados apresentados mostram que a técnica controla bem o GRV, mantendo o valor de tensão próximo ao de referência, mostrando bons resultados, principalmente em velocidades mais elevadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FAPEMIG pelo apoio financeiro e à Universidade Federal de Uberlândia pela estrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- [1] Borges, T. T. (2002). Motor a relutância chaveado com controle Fuzzy e detecção indutiva de posição (Doctoral dissertation, Tese de Doutorado, UFU).
- [2] Rahman, K. M., Fahimi, B., Suresh, G., Rajarathnam, A., V., & Ehsani, M. (2000). Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: desing and control issues. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 36(1), 111-121.
- [3] Silveira, A. W. F. V., Andrade, D. A., Gomes, L. C., Bissochi Jr, C. A., & de Paula, H. (2010). Generated voltage control in a switched reluctance motor/generator. *Eletrônica de Potência*, 15(3), 203-212.
- [4] Fleury, A. V. S., Silva, F. S., Araújo, W. R. H., Andrade, D. A., & Silveira, A. W. F. V. (2008). Reduced switch count converter for switched reluctance generators. *Eletrônica de Potência*, 13(3).
- [5] Coelho, A. (2011). *Simulação, Projeto e Teste de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico 6 x 4* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- [6] B. Bilgin, A. Rmadi, M. Krishnamurthy, "Desing Considerations for Switched Reluctance Machines With a Higher number of Rotor Poles", *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 59, no.10 pp. 3745-3756, 2012.
- [7] Lopes Oliveira, E. S., Aguiar, M. L., & Nunes da Silva, I. (2015). Strategy to Control the Terminal Voltage of a SRG Based on the Excitation Voltage. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 13(4), 975-981.