

GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL EM CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA MONOFÁSICA

*G.P.Viajante, D.A.Andrade, L.C.Gomes , *M.A.A.Freitas , E.A.A.Coelho, A. W. F. V. Silveira e V. R. Bernardeli

Universidade Federal de Uberlândia,

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

ghunterp@gmail.com, darizon@ufu.br

Resumo - Este artigo apresenta um estudo do comportamento dinâmico do Gerador à Relutância Variável em conexão com a re-de elétrica monofásica. Propõe-se uma técnica para o controle da tensão gerada para regulação do link CC. A técnica proposta utiliza um compensador PI para variar o ângulo de magnetização das fases do gerador, atuando no ângulo de abertura das chaves superiores do conversor half-bridge. A estratégia é utilizada em conjunto com uma etapa intermediária de roda livre, entre as etapas de magnetização e desmagnetização das fases. A injeção de potência ativa na rede é realizada através do controle de corrente de saída de um inversor PWM por meio de um compensador PI. O sincronismo com a rede é alcançado através de um algoritmo de Phase-Locked Loop. No sentido de validar o sistema proposto, desenvolveu-se um modelo não linear do gerador, no qual a indutância é modelada através de séries de Fourier. O sistema completo foi simulado no ambiente Matlab/Simulink. Os resultados de simulação validam a proposta apresentada e dão suporte à futura implementação experimental

Palavras-Chave - Gerador à Relutância, Controle de Tensão e Conexão com a Rede

SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR IN CONNECTION WITH THE POWER SUPPLY SINGLE PHASE

Abstract - This paper presents a study of the Switched Reluctance Generator dynamics when it is connected in a single-phase power grid. A control strategy for controlling the generated DC voltage was proposed. This technique utilizes a PI compensator for varying the magnetizing angle of the generator phases, acting in the opening angle of the half-bridge converter upper switches. As a result of this strategy a free wheel stage is added as an intermediate stage between the magnetization and demagnetization phase stages. The injection of active power in the power network is performed by controlling the output current of a PWM inverter by a PI compensator. The synchronization with the power network is achieved by an algorithm of Phase-Locked Loop. The model of generator uses Fourier series to represents the incremental inductance, what performs a non-linear modeling of this generator. The complete system is simulated using Matlab/Simulink. The simulation results validate this proposal and support the future experimental implementation.

Keywords - Switched Reluctance Generator, Voltage Control Generated and Grid Connection.

I. INTRODUÇÃO

O Gerador à Relutância Variável (GRV) tem sido gradualmente empregado em aplicações de velocidade variável, devido à sua intrínseca vantagens de estrutura rígida, tolerância a falhas, e fácil refrigeração. Entre as aplicações incluem o fornecimento de sistemas de energia aeroespacial [1] alternadores para veículos híbridos, e as possíveis aplicação do GRV em sistemas de conversão de energia eólica [2]. Neste caso, pesquisas têm sido realizadas para adequação do GRV na faixa de rotação baixa e média em velocidade variável. O objetivo do controle nesta aplicação é otimizar a energia captada para produzir potência máxima de saída [3].

A utilização de uma fonte de energia distribuída como a eólica em níveis significativos na matriz energética pode trazer benefícios à operação do sistema elétrico. Nos sistemas de potência tradicionais, a geração é baseada em grandes unidades geradoras centralizadas onde a energia é transferida por um sistema de linhas de transmissão até os consumidores. Por outro lado, as fontes distribuídas podem ser colocadas em pontos estratégicos aumentando à confiabilidade e a oferta de energia do sistema de potência. Entretanto, conversores de potência devem ser utilizados para fazer o interfaceamento entre a geração distribuída e a rede elétrica.

Em [4] os conversores com topologia multinível possuem maior rendimento quando comparado com os conversores com topologia clássica, devido menor perdas em comutação, frequências de comutação superiores e redução de interferências eletromagnéticas. Isso determina sua extensiva utilização em sistemas de energia eólica de alta potência. No entanto, conversor multinível pode não ser adequado para GRV em sistema de geração de energia eólica. Uma vez que, o aumento dos níveis do inversor torna o sistema de controle mais complexo e difícil implementação, devendo ainda ser ressaltado que, a maior parte das aplicações de GRV é em baixa e média potência e a utilização de conversores com topologia multinível pode trazer custos desnecessários.



X CEEL - ISSN 2178-8308
24 a 28 de setembro de 2012
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Do acima exposto, é possível concluir que há uma necessidade de conversor para utilização com GRV com um controle de fácil implementação e método de baixo custo capaz de injetar na rede elétrica formas de onda com baixo conteúdo harmônico. Assim, diante destas informações, este artigo apresenta uma proposta para utilização do GRV em conexão com a rede elétrica baseado em um inversor PWM senoidal. A estratégia baseia-se primeiramente no controle de tensão gerada do GRV para manter um link CC regulado, através da variação do ângulo de magnetização (θ_{off}) atuando apenas nas chaves superiores do conversor *Half Bridge* (HB). Uma etapa de roda livre intermediária é acrescentada à estratégia de controle para diminuir a quantidade de energia

fornecida pela fonte de excitação e obter melhor aproveitamento da energia mecânica.

A injeção de potência ativa na rede é realizada através do controle de corrente de saída de um inversor PWM por meio de um compensador PI. O sincronismo com a rede é alcançado através de um algoritmo de PLL (*Phase-Locked Loop*). O modelo e a estratégia de controle foram validados através simulação computacional.

O sistema completo proposto neste trabalho para o GRV conectado à rede monofásica é apresentado na Figura 1. Uma descrição detalhada de cada parte do sistema será abordada nas seções seguintes. Inicialmente será apresentado um modelo não linear para a simulação dinâmica do GRV baseado na Série de Fourier.

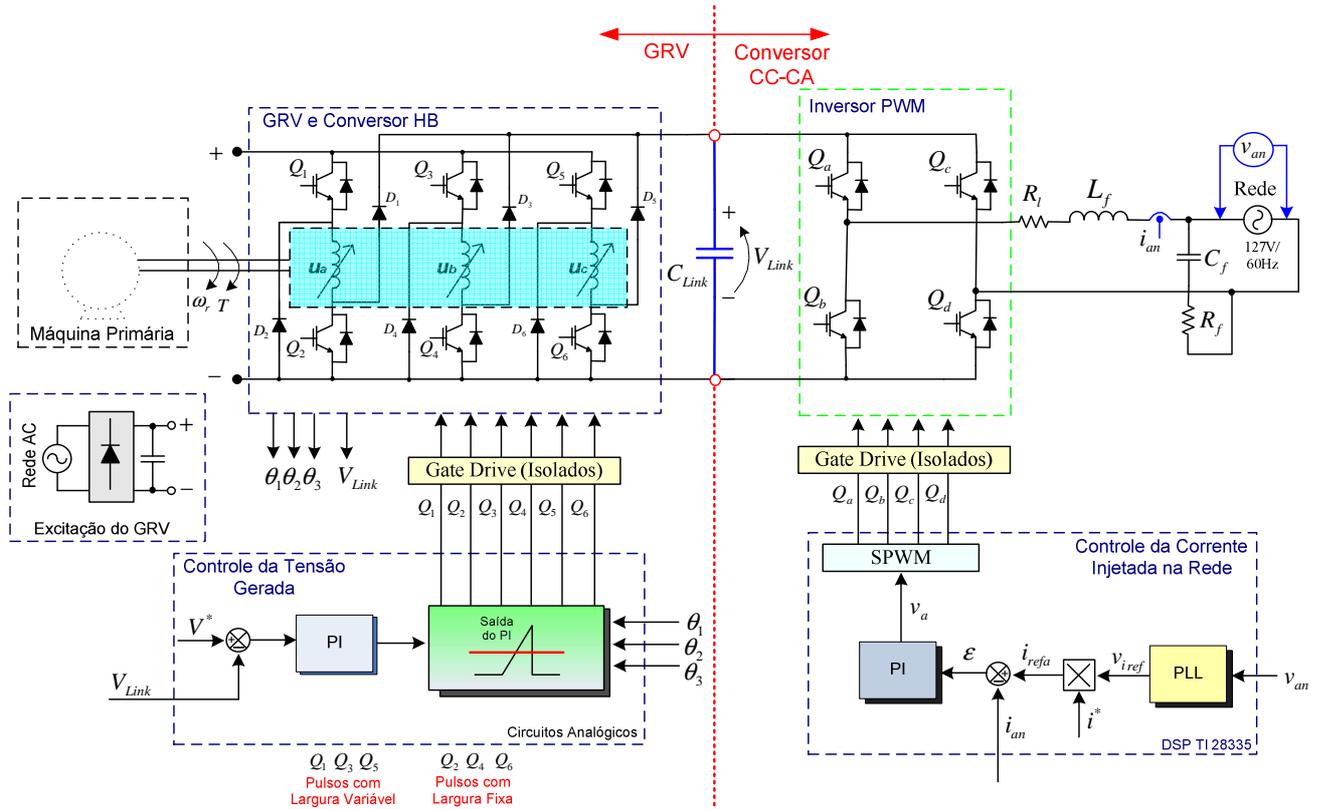


Figura. 1 – Sistema Completo do GRV Conectado à Rede Monofásica

II. MODELO NÃO-LINEAR PARA ANÁLISE DINÂMICA DO GRV

A modelagem matemática para análise dinâmica do GRV é descrita tendo-se por referência uma fase da máquina de modo que a mesma é descrita como

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

A uma velocidade constante, a equação de tensão da fase é dada por

$$v = Ri + l \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

Onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, $e = \omega_r \partial \lambda(i, \theta) / \partial \theta$ é a força contraeletromotriz, $l = \partial \lambda(i, \theta) / \partial i$ é a indutância incremental da fase, θ é a posição do rotor.

Os efeitos de saturação são considerados no modelo através da representação da variação da indutância de fase em função da corrente e posição do rotor usando uma aproximação por Série de Fourier [6]. A representação do perfil de indutância para diferentes valores de correntes e posições do rotor é baseada em uma aproximação utilizando segmentos de linhas retas conforme as Figuras 2 e 3. Na Figura 2 foi utilizada esta representação por conveniência matemática. Assim, a função de indutância para o protótipo testado neste trabalho foi determinada como

$$L(i, \theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta)$$

$$\text{Onde: } A_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left(\sin(nP_r \alpha_{(j+1)}) + \frac{\cos(nP_r \alpha_{(j+1)}) - \cos(nP_r \alpha_j)}{nN_r (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j)} \right)$$

$$B_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left(\sin(nP_r \alpha_j) + \frac{\cos(nP_r \alpha_{(j+1)}) - \cos(nP_r \alpha_j)}{nN_r (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j)} \right)$$

m é o número de segmentos de retas, n é a ordem harmônica, P_r é o número de pólos do rotor, $G = 2\pi P_r$ é o passo polar do rotor, θ é a posição do rotor, l_j é a indutância para o j 'ésimo segmento, α_j é a posição associada a esta indutância.

Um ajuste polinomial foi utilizado para representar a função $l_j(i, \alpha_j)$. A expressão para $l_j(i, \alpha_j)$ é dada como

$$l_j(i, \alpha_j) = C_{3j} i^3 + C_{2j} i^2 + C_{1j} i + C_{0j} \quad (4)$$

A expressão de fluxo pode ser escrita a partir de (3) como

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

$$\frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} i^4 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)} + C_{0j}}{2} i \right) \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \right.$$

$$\left. \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (C_{3(j+1)} i^4 + \dots + C_{0(j+1)} i) A_{(j,n)} - (C_{3j} i^4 + \dots + C_{0j} i) B_{(j,n)} \right) \right) \cos(nP_r \theta)$$

As expressões de co-energia e conjugado podem ser escritas como

$$W'(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di =$$

$$\frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)} + C_{0j}}{2} i^2 \right) \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \right.$$

$$\left. \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} i^2 \right) A_{(j,n)} \right) - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \right) \right) \right) \cos(nP_r \theta)$$

A importância de se expressar analiticamente as relações não lineares de fluxo, corrente e posição na máquina a relutância variável é que através da indutância incremental

(3) pode-se expressar analiticamente a co-energia e também o conjugado, abrindo caminho inclusive para implementação de observadores de fluxo e conjugado.

(7)

$$T_{emag} = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial (\theta)} =$$

$$= -nP_r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^m \left(\left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} i^2 \right) A_{(j,n)} \right) - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \right) \right) \right) \sin(nP_r \theta)$$

Neste momento é oportuno observar que as expressões (3) até (7) são em função da posição e da corrente. Para qualquer valor de corrente dentro da faixa operacional em qualquer posição dada, os valores instantâneos da indutância de fase, co-energia e conjugado são obtidos, tornando o modelo matemático muito adequado para cálculos dinâmicos.

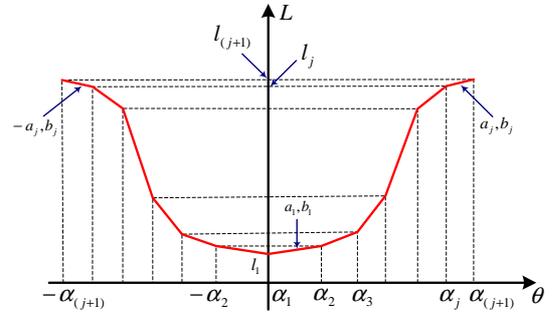


Figura 2. Representação aproximada do perfil de indutância usando "j" segmentos de linhas retas.

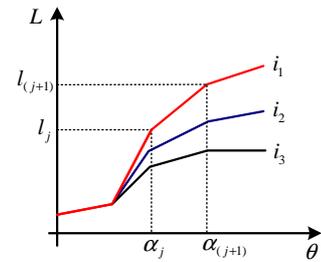


Figura 3. Segmentos de linha de indutância versus posição do rotor.

Levando-se em conta as perdas por atrito visco D e o momento de inércia J , o conjugado mecânico produzido pela máquina foi calculado como

$$T_m = T_{emag} - J \frac{d\omega}{dt} - D\omega \quad (8)$$

A partir das equações apresentadas, o modelo matemático que descreve a dinâmica do GRV pode ser apresentado na forma de matriz de estados por meio de

$$[v] = [X][i] + [Y] \begin{bmatrix} \dot{\cdot} \\ i \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde X e Y são matrizes que dependem de parâmetros construtivos da máquina. A solução do sistema permite assim uma análise completa do GRV[6][8][10].

III. CONTROLE DA TENSÃO GERADA DO GRV

Para obter o controle da tensão de saída do GRV visando manter constante a tensão do link CC foi desenvolvida uma metodologia que consiste na variação da largura do período de magnetização das fases, mantendo θ_{on} fixo em -3° em relação à posição de alinhamento e alterando o valor de θ_{off} através de um compensador PI. A estratégia utiliza o conversor clássico *half-bridge*, conforme Figura 3. Uma fonte de tensão AC externa em conjunto com retificador é utilizada para excitar o gerador. O diferencial da estratégia é que a atuação do controlador (para cada ciclo em uma fase) se faz apenas na chave superior do conversor. A chave inferior é mantida em condução até que os 30° sejam completados para permitir que a etapa intermediária de roda livre ocorra entre as etapas de magnetização e desmagnetização da fase. Em seguida a chave inferior do conversor é aberta, fazendo que a energia armazenada no enrolamento da fase seja entregue à carga.

Neste caso o processo de funcionamento do GRV passa a ser realizado em três etapas: região de excitação, região de roda livre intermediária e região de roda livre de geração. Estas etapas estão em destaque na Figura 4. A adição da etapa intermediária de roda livre intermediária permite um melhor aproveitamento da energia mecânica e utiliza menos a energia elétrica da fonte de excitação, uma vez que a corrente de fase nesta etapa é acrescida devido apenas à atuação da força contra-eletromotriz, conforme Figura 4b.

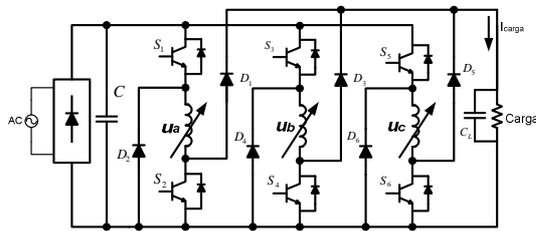


Figura 3 – Diagrama esquemático do conversor HB.

A variação da largura dos pulsos de gatilhos das chaves superiores ocorre com a comparação do sinal de saída do controlador PI com três rampas geradas a partir da posição angular do rotor em relação a cada fase (θ_1, θ_2 e θ_3). As chaves inferiores têm intervalo de condução fixo em 30° e não sofrem atuação do controlador. A Figura 5 ilustra a estratégia utilizada

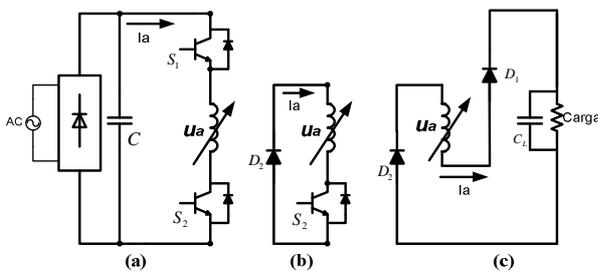


Figura 4 - Excitação (a), Roda livre intermediária (b) Roda livre de geração (c).

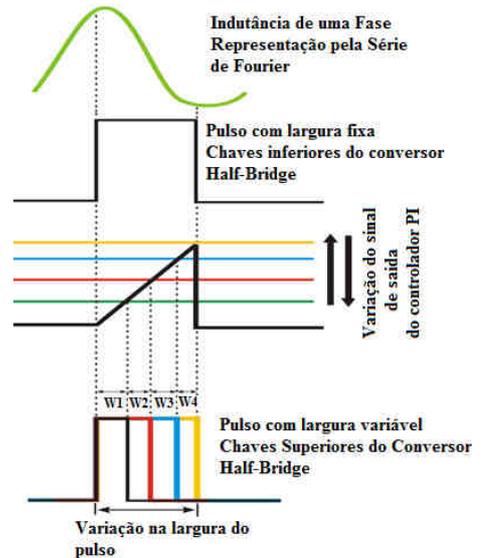


Figura 5- Estratégia para variação do ângulo de magnetização das chaves superiores

IV. ESTRATÉGIA DE ACOPLAMENTO À REDE CA

No sistema completo da proposta para conexão do GRV à rede monofásica apresentado na figura 1, o inversor recebe tensão e corrente CC do GRV e entrega potência ativa para a rede com corrente senoidal. A saída de corrente i_{an} é sintetizada pelo controlador de corrente, que atua sobre o erro entre a corrente i_{an} no indutor de acoplamento L_f e a corrente de referência i_{refa} . A referência de corrente é gerada pela multiplicação de i^* (que representa o pico da corrente a ser injetada) e a senoide unitária de sincronismo oriunda do PLL. No link CC, a tensão V_{link} do capacitor é mantida regulada pelo controlador de tensão apresentado na secção 3.

O processo de modelagem do conversor conectado à rede e corrente de saída controlada, baseia-se no circuito equivalente da Figura 6. Considerando que o conversor é alimentado por um modulador PWM senoidal com portadora triangular simétrica, ele pode ser modelado como um ganho constante, sendo m o índice de modulação. Assim a função de transferência é dada pela expressão (10)[7].

$$G_{im}(s) = \frac{\hat{i}_{an}}{\hat{m}} = \frac{G_{inv}}{sL_f} = \frac{V_{link}}{2sL_f} \quad (10)$$

O controlador de corrente do inversor apresentado na Figura 7 é composto de um compensador PI que determina o índice de modulação do modulador PWM senoidal. A referência da corrente de saída i_{refa} , possui forma de onda senoidal e origina-se a partir de uma senoide unitária advinda do PLL. O valor de pico da corrente de referência é o que determina o quanto de potência ativa será injetada na rede.

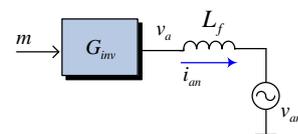


Figura 6. Circuito equivalente do inversor monofásico em conexão com a rede elétrica

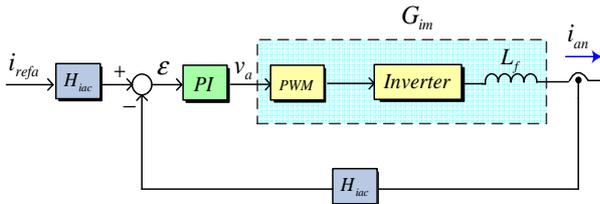


Figura 7. Controle da corrente de saída do conversor CC-AC

O sincronismo com a rede elétrica é realizado com o PLL monofásico digital representado na Figura 8.

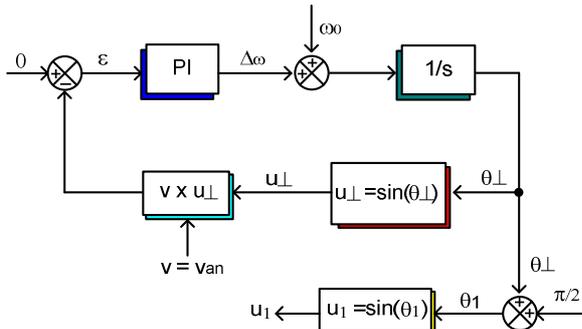


Figura 8. Esquema do PLL [7]

Seu princípio da operação é baseado no produto escalar entre o vetor de tensão v e o vetor ortogonal u_{\perp} . Quando o PLL é sincronizado com a tensão da rede os dois vetores são ortogonais e o produto é zero. O compensador PI atua para minimizar o erro $\varepsilon = 0 - v \times u_{\perp}$, ou seja, para cancelar o produto escalar, e gerar a componente $\Delta\omega$. A integração da frequência angular $\omega = \Delta\omega + \omega_0$ resulta no ângulo θ_{\perp} . O vetor u_{\perp} corresponde à senoide unitária sincronizada com a tensão da rede e é utilizada para gerar a corrente de referência do inversor PWM.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Esta seção apresenta os resultados de simulação do GRV e do inversor PWM. O principal objetivo é verificar o comportamento dinâmico do GRV acoplado na rede elétrica monofásica. Todo o sistema apresentado na Figura 1 foi simulado em conjunto, ou seja, O GRV fornece uma tensão regulada no link CC e o inversor PWM injeta a corrente sintetizada na rede através do controlador de corrente. Neste caso, os controladores de tensão gerada do GRV e de corrente de saída do inversor trabalham desacoplados.

Os testes de simulação foram realizados com os seguintes critérios: tensão de referência do controlador de tensão em 311V e velocidade rotórica do GRV em 1500rpm. O pico da corrente de referência inicia-se com 10A e sofre um degrau para 20A no instante de dois segundos da simulação. O conjunto foi simulado durante 4 segundos.

A Figura 9 mostra o comportamento da tensão no link CC durante o transitório de carga. Observa-se que o valor de referência (311V) foi devidamente mantido. Este teste demonstrou que o controle de tensão foi capaz de manter com precisão a tensão gerada em torno do valor de referência, mesmo durante o transitório de carga. Para a

mesma situação, a Figura 9 apresenta a corrente em uma das fases do gerador. Um zoom na corrente de fase bem como os sinais de gatilho das chaves do conversor HB são apresentados na Figura 10.

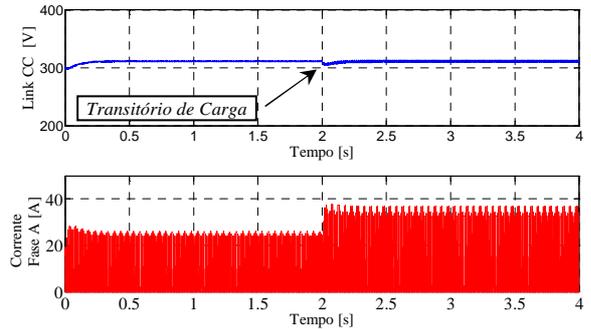


Figura 9- Comportamento da tensão gerada (superior) e corrente de fase (abaixo) durante transitório de carga

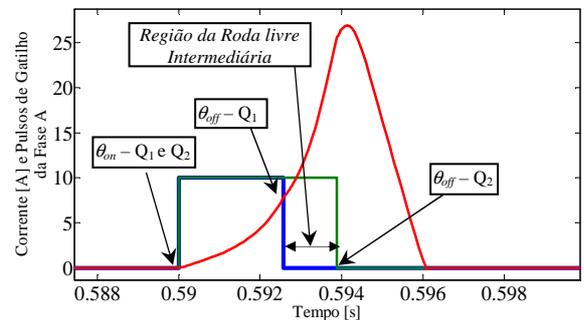


Figura 10 - Corrente da Fase A e Pulsos Q_1 e Q_2

Em relação à potência, foram realizadas medições na entrada do Conversor CC-CA, ou seja, no link CC e na saída do conversor, no ponto de conexão com a rede elétrica. A Figura 11 mostra o comportamento da potência ativa injetada na rede bem como a potência de entrada do conversor. Para uma referência de pico da corrente de saída do Conversor CC-CA em 10A a potência entregue à rede é de aproximadamente 900W. No instante de dois segundos quando a referência muda para 20A a potência injetada é de 1800W.

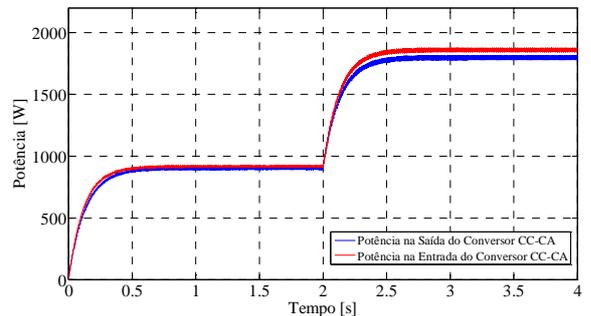


Figura. 11 – Potência no Link CC e Potência entregue à rede durante o transitório de carga

A forma da corrente injetada na rede e a tensão da rede elétrica são mostradas na Figura 12. Percebe-se que a corrente está em fase com a tensão, o que indica que somente potência ativa é injetada na rede. A Figura 13 apresenta a corrente de referência e a corrente sintetizada pelo controlador para injeção na rede. O sincronismo entre a

corrente de referência e a tensão da rede elétrica é atingido pela atuação do algoritmo de PLL digital descrito na seção 4.

ANEXO

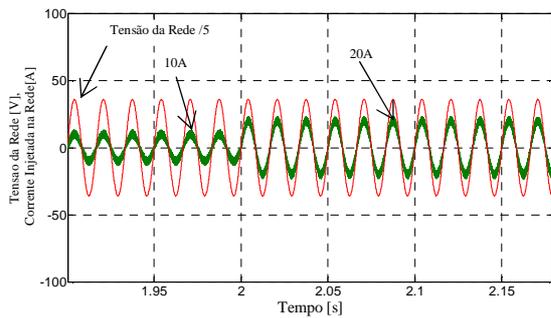


Figura 12 - Tensão da rede e Corrente injetada na rede

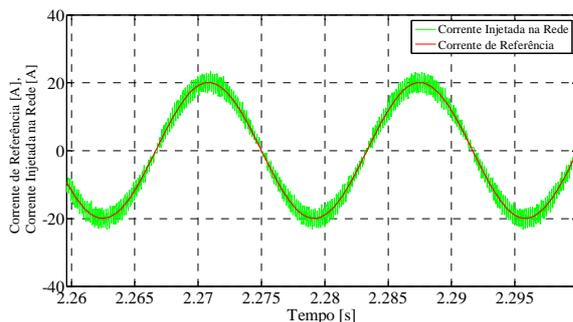


Figura 13 - Referência senoidal e Corrente injetada na rede

VI. CONCLUSÃO

Uma estratégia para conexão do Gerador à Relutância Variável à rede elétrica foi apresentada. Foi proposta uma técnica de controle de tensão de saída (link CC) de um GRV, baseada na variação do ângulo de magnetização da fase através de um compensador PI. Esta técnica varia apenas o ângulo de fechamento das chaves superiores do conversor HB, permitindo que a conversão eletromecânica de energia continue sendo aproveitada através das chaves inferiores que são abertas com ângulo fixo. A injeção de potência ativa na rede foi realizada através do controle de corrente de saída de um inversor PWM por meio de um compensador PI. O sincronismo com a rede foi alcançado através de um algoritmo de PLL. Os resultados de simulação foram apresentados e discutidos

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo financiamento deste projeto.

Tabela 1. Dados do Protótipo do GRV

Características	Valores
Potência de Saída	5 KW
Atrito Viscoso	0.006 N.m.s
Indutância (Posição Alinhada)	0.02748 H
Indutância (Posição Desalinhada)	0.00262 H
Momento de Inércia	0.04806 kg.m ²

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Powell, D.J.; Jewell, G.W.; Calverley "Iron loss in a modular rotor switched reluctance machine for the "More-Electric" aero-engine" Magnetics, IEEE Transactions on Oct. 2005, vol. 41.
- [2] Bao, Y.J.; Cheng, K.W.E. "Research on a novel switched reluctance generator for wind power generation" IEEE PESA, 2011.
- [3] Chang, Y., Liaw,C.M. "On the design of power circuit and control scheme for switched reluctance generator" Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 1, 2008.
- [4] Sozer ,Y. and Torrey, D. A. "Closed Loop Control of Excitation Parameters for High Speed Switched-Reluctance Generators", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 19, No. 2, March 2004.
- [5] Lingzhi, Yi1, et all. "Research on Grid-Connected Inverter of SRG Wind Power Generation System Based on SVPWM Over-Modulation Scheme" IEEE 2010.
- [6] Viajante, G.P.et all, "Estratégia para Melhoria da Eficiência da Conversão Eletromecânica de Energia do GRV" Eletrônica de Potência, v. 16, p. 367-375, 2011.
- [7] Villalva, M.G. et all "Modeling and Control of a Three-Phase Isolated Grid-Connected Converter for Photovoltaic Applications" Revista Controle & Automação, Vol.22 N.3 2011.
- [8] Silveira, A. W. F. V., Andrade, D. A., Fleury, A., Gomes, L. C. Bissochi C. A., de Paula, H. "Generated Voltage Control In A Switched Reluctance Motor/Generator" Eletrônica de Potência, v. 15, n. 3, p. 203-212, jun./ago. 2010.
- [9] Chen, H., Jason J. G, "Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators" IEEE Transactions On Mechatronics, Vol. 15, No. 3, June 2010.
- [10] Fleury, A. V. S., Silva F. S., Araújo, W. R. H., Andrade ,D.A., Silveira ,A. W. F. V. "Reduced switch count converter for switched reluctance generators" Eletrônica de Potência, Vol. 13, no. 3, Agosto 2008.