

ESTRATÉGIA DE CONEXÃO À REDE ELÉTRICA DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PARA INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA

*G.P.Viajante, D.A.Andrade, L.C.Gomes, J.A. Santos Jr, V. R. Bernardeli, A. W. F. V. Silveira, M.A.A. Freitas e F. S. Silva.

Universidade Federal de Uberlândia.

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
ghunterp@gmail.com, darizon@ufu.br

Resumo – Este artigo relata resultados de uma pesquisa no contexto das possibilidades de geração distribuída. Uma estratégia para injetar potência ativa na rede de alimentação é discutida e testada. A energia proveniente de uma fonte mecânica é convertida em energia elétrica utilizando um Gerador a Relutância Variável. A tensão gerada alimenta um barramento CC e é controlada em malha fechada. Um conversor CC-CA faz a interface do gerador com uma rede elétrica monofásica, onde o sincronismo é obtido através de *Phase Locked Loop* (PLL). O fator de potência unitário é alcançado com uma malha de controle da corrente injetada por meio de um controlador Proporcional Ressonante (P+RES). A Modelagem matemática dos elementos do sistema apresentado é utilizada na simulação de todo o conjunto. A montagem experimental utilizada para testes de bancada é descrito. Resultados simulados e experimentais são discutidos, comparados e mostram a viabilidade da proposta.

Palavras-Chave – Gerador a Relutância Variável, Conexão com a rede elétrica, Controle de Tensão Gerada.

A GRID CONNECTION SCHEME OF A SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR FOR ACTIVE POWER INJECTION

Abstract – This paper reports achievements of a research in the context of distributed generation possibilities. A strategy to inject active power into the mains network is discussed and tested. The energy from a generic alternative source is converted into electrical energy using a switched reluctance generator. The generated voltage feeds a DC link and is closed loop controlled. The DC-AC converter interfaces the generator with a single-phase network, where synchronism with AC side is obtained using a phase locked loop arrangement, and the transmission unity power factor is achieved with a current control loop by means of a P+RES controller. Mathematical modeling of the system elements is presented and used in the simulation of the whole generation and transmission system. The experimental setup used for bench tests is described. Simulated and experimental results included

are discussed, compared and show the viability of the proposal.

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

I. INTRODUÇÃO

O Gerador a Relutância Variável (GRV) tem sido gradualmente empregado em aplicações de velocidade variável, devido às suas intrínsecas 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 possíveis aplicações 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][4][5].

A utilização, em níveis significativos na matriz energética, de uma fonte de energia distribuída como a eólica, 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 a 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.

Segundo [6], os conversores com topologia multinível possuem maior rendimento quando comparado aos conversores com topologia clássica, devido a menores 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 de difícil implementação.

Do acima exposto, é possível concluir que há uma necessidade de conversores 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.

Artigo submetido em 16/09/2013. Primeira revisão em 23/01/2014, segunda revisão em 28/04/2014. Aceito para publicação em 28/04/2014, por recomendação do Editor Henrique A. C. Braga.

Assim, diante destas informações, este artigo apresenta uma proposta para utilização do GRV em conexão com a rede elétrica para injeção de potência ativa. A estratégia baseia-se primeiramente no controle de tensão gerada do GRV para manter um barramento CC regulado. Isto é realizado através de um compensador PI que modifica o ângulo de magnetização (θ_{off}) atuando apenas nas chaves superiores do conversor Meia-Ponte Assimétrico (HB). Uma etapa intermediária de chaveamento é acrescentada à estratégia de controle para diminuir a quantidade de energia fornecida pela fonte de excitação e obter melhor aproveitamento da energia mecânica [8].

A injeção de potência ativa na rede é realizada através do controle da corrente de saída de um conversor CC-CA por meio de um compensador P+RES (Proporcional Ressonante). 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 de simulação computacional e também por ensaios experimentais. O sistema completo proposto neste trabalho para o Gerador a Relutância Variável conectado à rede elétrica é apresentado na Figura.1.

Uma descrição detalhada de cada parte do sistema será abordada nas seções seguintes, bem como a apresentação e discussão dos resultados.

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

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

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 Serie de Fourier. 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 a Figura 2.

Assim, a expressão de indutância utilizada neste trabalho foi determinada como

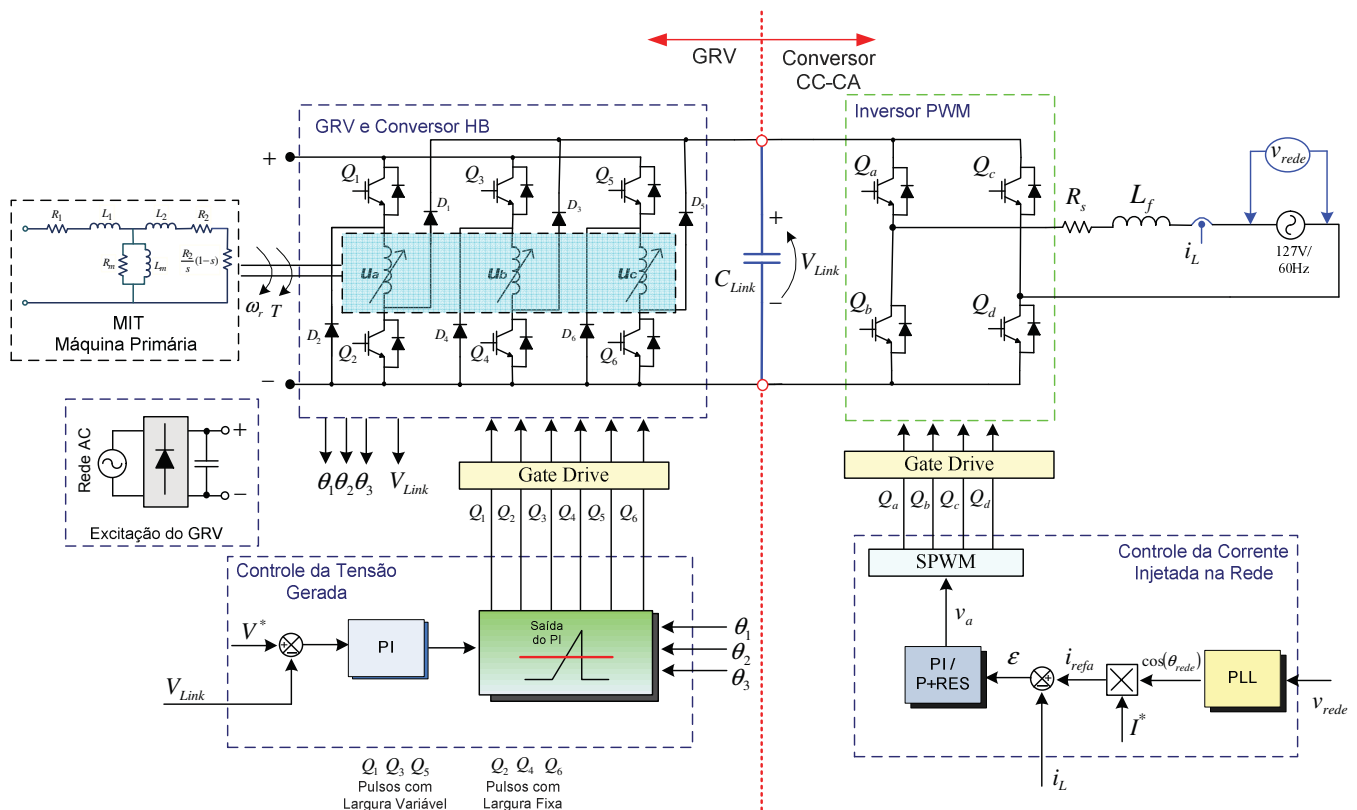


Fig. 1. Sistema completo da conexão à rede elétrica do Gerador a Relutância Variável

$$L(i, \theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta) \quad (3)$$

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

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta) i = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left((C_{3(j+1)} + C_{3j}) i^4 + \dots + (C_{0(j+1)} + C_{0j}) i \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (C_{3(j+1)} i^4 + \dots + C_{0(j+1)} i) A_{(j,n)} - (C_{3j} i^4 + \dots + C_{0j} i) B_{(j,n)} \right) \cos(nP_r \theta) \quad (5)$$

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

$$W'(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)} + C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} \right) i^2 \right) A_{(j,n)} - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \cos(nP_r \theta) \quad (6)$$

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

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

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.

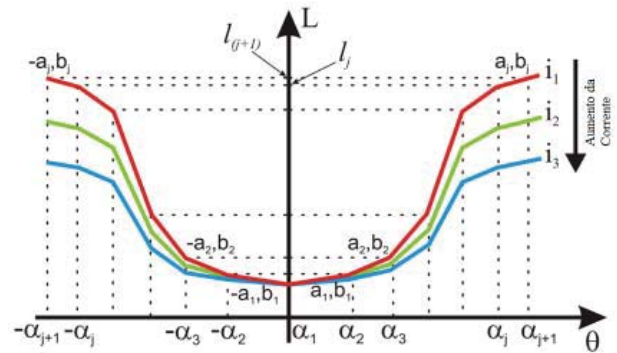


Fig. 2. Representação aproximada do perfil de indutância usando "j" segmentos de linhas retas.

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

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

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

$$[v] = [X][i] + [Y] \left[\dot{i} \right] \quad (9)$$

Onde X e Y são matrizes que dependem de parâmetros construtivos da máquina. A solução do sistema permite assim uma análise completa do GRV [7][8][9][10].

III. CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC

Para manter constante o barramento CC, o nível de magnetização de cada uma das fases do GRV é controlado. Isto é realizado atuando nos ângulos de magnetização. Nesta investigação, θ_{on} é mantido constante (fixado em -3° em relação a posição de alinhamento) e o valor de θ_{off} é ajustado através de um compensador PI. A máquina simulada e o protótipo utilizado tem a configuração 6/4 com intervalo de condução de 30° para cada fase. Um conversor HB como mostrado na Figura 3 é usado no acionamento.

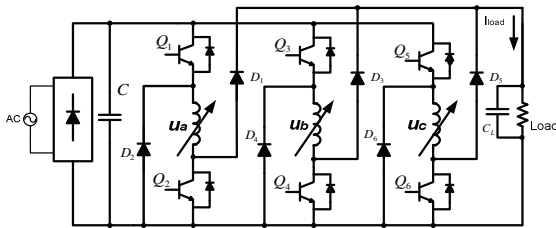


Fig. 3. Diagrama esquemático do conversor HB.

Uma fonte AC externa em série com um retificador excita o gerador. O compensador PI atua no θ_{off} da chave superior do conversor, enquanto que a chave inferior conduz no intervalo de 30° . Isto permite que uma etapa intermediária, aqui denominada *flux boosting*, 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. Esta etapa intermediária aumenta a energia armazenada na fase e observou ser uma forma de melhorar o processo de conversão eletromecânica quando comparado com a situação em que as duas chaves são desligadas ao mesmo tempo. Assim, um ciclo de fase inclui três etapas: magnetização, *flux boosting* e desmagnetização, conforme Figura 4 [8].

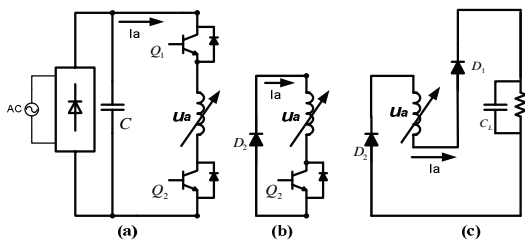


Fig. 4. Região de excitação (a), Região de *flux boosting* (b) Região de desmagnetização (c).

A estratégia de controle do barramento CC é mostrada no diagrama apresentado na Figura 5 que representa o diagrama em blocos da montagem realizada para o controle da tensão gerada pelo GRV. O arranjo consiste de um GRV de 5,0kW 6/4 acoplado em motor trifásico acionado com conversor de frequência. Uma fonte de tensão variável foi utilizada para ajustar a tensão de excitação. O conversor HB foi montado com os módulos de IGBT's de 1200V/50A. Um compensador PI foi projetado com circuitos analógicos.

Três transdutores fotoelétricos devidamente instalados no GRV (θ_{on} fixo em -3° em relação à posição de alinhamento) fornecem sinais em onda quadrada com intervalos de 30° que representam as informações da posição do rotor. Estes sinais

entram no circuito gerador de pulsos que os transforma em uma rampa correspondente ao mesmo intervalo para cada fase. Assim, a variação da largura dos pulsos de gatilhos das chaves superiores ocorre com a comparação do sinal de saída do compensador PI com as três rampas geradas. As chaves inferiores têm intervalo de condução fixo em 30° e não sofrem atuação do controlador. A Figura 6 ilustra a estratégia utilizada.

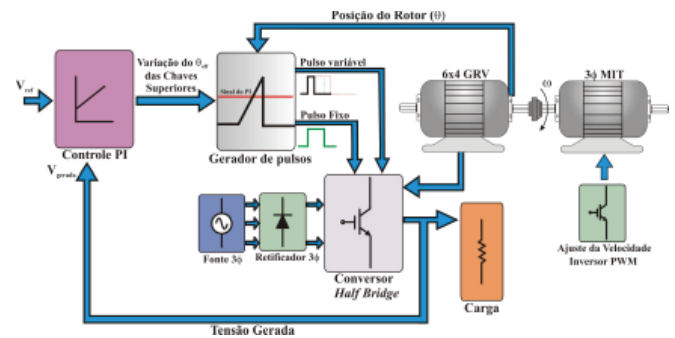


Fig. 5. Diagrama em blocos da plataforma experimental para controle da tensão gerada pelo GRV.

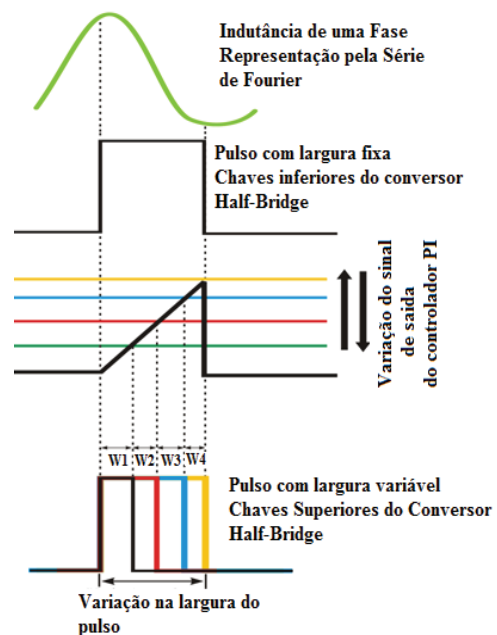


Fig. 6. Estratégia experimental para variação do ângulo de magnetização das chaves superiores.

IV. CONVERSOR CC- CA

Em um gerador eólico a potência ativa escoada para rede é a máxima gerada pelo gerador. Neste caso, o gerador envia para o barramento CC sempre a máxima potência possível e o inversor controla o quanto de potência deve ser injetado para manter o barramento CC na tensão desejada.

No caso deste trabalho, para a conexão do GRV à rede elétrica apresentada na Figura 1, o conversor CC-CA recebe tensão e corrente CC do GRV e entrega potência ativa para a rede com corrente senoidal. A corrente de saída i_L é sintetizada pelo controlador de corrente, que atua sobre o

erro entre a corrente i_L 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 advinda do PLL. No barramento CC, a tensão V_{link} do capacitor é mantida regulada pela estratégia de controle apresentada na seção III.

A. Modelagem do conversor CC-CA

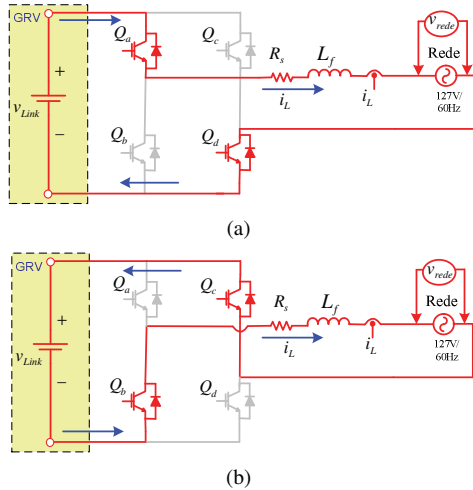


Fig. 7. Etapas de operação do Conversor CC-CA. (a) Etapa 1 e (b) Etapa 2.

O processo de modelagem do conversor conectado à rede elétrica foi realizado por intermédio de espaços de estados médios [11][12]. Foram consideradas duas etapas de operação associadas ao conversor em cada intervalo de chaveamento. Durante a etapa 1, de acordo com a Figura 7a, as chaves Q_a e Q_d permanecem fechadas e Q_b e Q_c abertas. Na etapa 2, Figura 7b, as chaves Q_a e Q_d permanecem abertas e Q_b e Q_c fechadas. Assim, o conversor pode de ser descrito por equações de estado lineares como

$$\dot{x} = A_1 x(t) + B_1 u(t) \quad (10)$$

$$\dot{x} = A_2 x(t) + B_2 u(t) \quad (11)$$

Onde:

x = vetor de estado

\dot{x} = derivada do vetor de estado em relação ao tempo

u = vetor de entradas

A = matriz do sistema

B = matriz de entradas

Os vetores de estado e de entradas são respectivamente

$$x = [i_L], \quad u = \begin{bmatrix} V_{Link} \\ V_{Re de} \end{bmatrix} \quad (12)$$

As equações do conversor para as duas etapas de operação já em formato de matrizes de estado são

$$\left[\frac{di_L(t)}{dt} \right] = \left[-\frac{R_s}{L_f} \right] [i_L(t)] + \left[\frac{1}{L_f} \quad -\frac{1}{L_f} \right] \begin{bmatrix} V_{Link} \\ V_{Re de} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\left[\frac{di_L(t)}{dt} \right] = \left[-\frac{R_s}{L_f} \right] [i_L(t)] + \left[-\frac{1}{L_f} \quad -\frac{1}{L_f} \right] \begin{bmatrix} V_{Link} \\ V_{Re de} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

$$A_1 = \left[-\frac{R_s}{L_f} \right] \quad B_1 = \left[\frac{1}{L_f} \quad -\frac{1}{L_f} \right]$$

$$A_2 = \left[-\frac{R_s}{L_f} \right] \quad B_2 = \left[-\frac{1}{L_f} \quad -\frac{1}{L_f} \right]$$

A média das variáveis de estado usando o ciclo de trabalho pode ser escrita como

$$A_{med} = A_1 D + A_2 (1-D) \quad (15)$$

$$B_{med} = B_1 D + B_2 (1-D) \quad (16)$$

Onde D é a razão cíclica (Figura 6). Então, a equação de estados médios é

$$\dot{x} = A_{med} x(t) + B_{med} u(t) \quad (17)$$

Considerando o modelo médio do conversor em equilíbrio, ele pode ser descrito considerando (17) igual a zero. Assim

$$x = -A_{med}^{-1} B_{med} u \quad (18)$$

Substituindo (12), (15) e (16) em (18), tem-se

$$x = \begin{bmatrix} \frac{V_{Link} 2D-1}{L_f} & -\frac{V_{Re de}}{R_s} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde x é a matriz que representa os valores em equilíbrio das variáveis de estado.

Para a obtenção do modelo de pequenos sinais são inseridas perturbações nas variáveis no ponto de operação.

$$x(t) = X + \hat{x}(t) \quad u(t) = U + \hat{u}(t) \quad (20)$$

$$d(t) = D + \hat{d}(t) \quad d'(t) = D' - \hat{d}(t) \quad (21)$$

Substituindo-se o modelo de pequenos sinais na equação de estados médios tem-se

$$\frac{d \begin{bmatrix} X + \hat{x}(t) \end{bmatrix}}{dt} = [A_1 d(t) + A_2 d'(t)] x(t) + [B_1 d(t) + B_2 d'(t)] u(t) \quad (22)$$

Substituindo (20) e (21) em (22) e removendo-se dos termos CC e os termos de 2ª ordem, com o objetivo de linearizar a expressão, tem-se que

$$\frac{d \hat{x}(t)}{dt} = A_{med} \hat{x}(t) + B_{med} \hat{u}(t) + K \hat{d}(t) \quad (23)$$

$$\text{Onde, } K = [A_1 - A_2] X + [B_1 - B_2] U$$

Assim aplicando a Transformada de Laplace em (23) é possível obter a função de transferência da variável de estado em relação à razão cíclica.

$$G_{inv}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{2v_{Link}}{sL_f + R_s} \quad (24)$$

B. Controle da corrente injetada na rede elétrica.

O processo de modelagem do compensador de corrente de saída do conversor CC-CA é baseado no esquema da Figura 8. A referência da corrente de saída i_{refa} , origina-se a partir de uma senoide unitária advinda do PLL (*Phase-Locked Loop*). O valor de pico da corrente de referência é o que determina o quanto de potência ativa será injetada na rede.

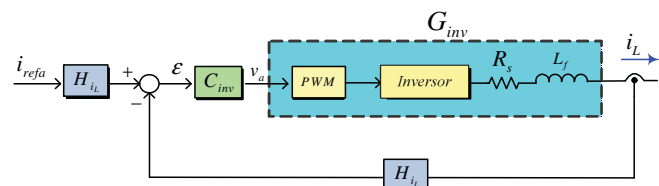


Fig. 8. Controle da corrente de saída do conversor CC-CA

Em razão da dificuldade do compensador PI (Proporcional Integral) em eliminar o erro de regime quando atua em variável alternada, o controlador utilizado foi o Proporcional Ressonante (P+RES), que é capaz zerar o erro de regime em sistemas alternados em coordenadas abc ou $\alpha\beta$. Pode ser empregado tanto em sistemas trifásicos, quanto monofásicos. O compensador P+RES atuando em sistemas de variáveis estacionárias apresenta a mesma resposta em frequência do compensador PI atuando em sistemas de variáveis síncronas [13] [14].

Para o projeto do compensador P+RES, os ganhos K_p e K_i podem ser obtidos através do projeto de um controlador PI convencional. Assim, inicialmente a partir da função de transferência do conversor CC-CA, equação 24 e os valores da Tabela I, foi possível projetar um compensador PI (equação 25) que garanta boa estabilidade ao conversor.

$$C_{PI}(s) = 0,59096 \cdot \frac{(s + 5,646e3)}{s} \quad (25)$$

O diagrama de Bode do sistema compensado é apresentado na Figura 9. A frequência de cruzamento escolhida foi de 1,0kHz que representa 1/10 da frequência de chaveamento [12]. Neste caso, a margem de fase do sistema foi de 50,1°.

TABELA I

Parâmetros do Conversor Conectado à Rede Elétrica

Parâmetros	Valores
H_{IL}	1/30
L_f	7mH
R_s	0,3 Ω
v_{Link}	310V
F_{ch}	10KHz

Dessa forma, de posse dos ganhos do compensador PI convencional foi possível projetar o compensador P+RES através da função de transferência mostrada pela equação:

$$C_{inv} = C_{P+RES}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (26)$$

Onde K_p e K_i são os ganhos do compensador e ω_0 é a frequência angular de ressonância que no caso é 377 rad/s.

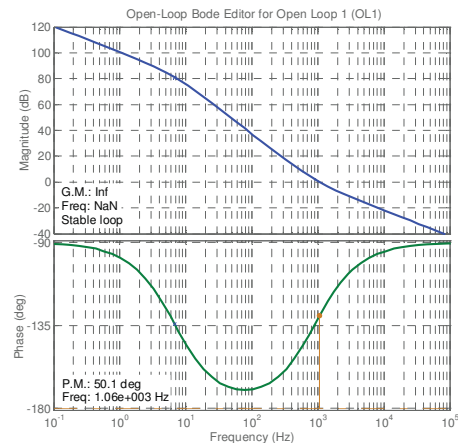


Fig. 9. Digrama de Bode do sistema compensado

A Figura 10 mostra os diagramas de Bode da função de transferência do compensador P+RES. Observa-se que o ganho é bastante elevado na frequência de ressonância e, conseqüentemente, alcança um erro em regime permanente próximo de zero. O pico na frequência de ressonância pode ser ajustado modificando o valor de K_i , assim o ganho integral do regulador pode ser feito suficientemente grande para eliminar todos os erros de estado estacionário [14].

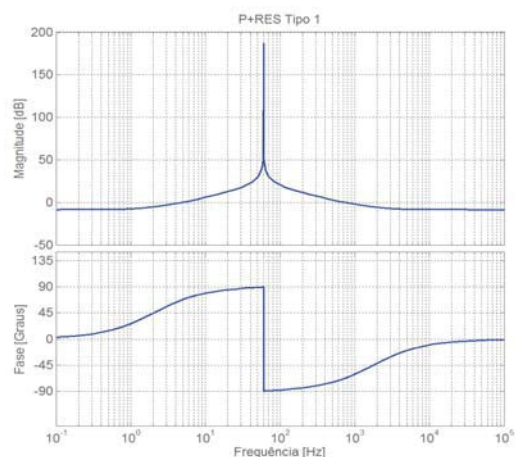


Fig. 10. Diagrama de Bode do Compensador P+RES

A Figura 11 apresenta o esquema de ligação para a conexão do Gerador a Relutância Variável com a rede elétrica. O GRV através do sistema de controle de tensão fornece uma tensão contínua regulada em 310V. O acoplamento entre o gerador e o conversor CC-CA se dá através de um banco de capacitores C_{Link} . O controle da

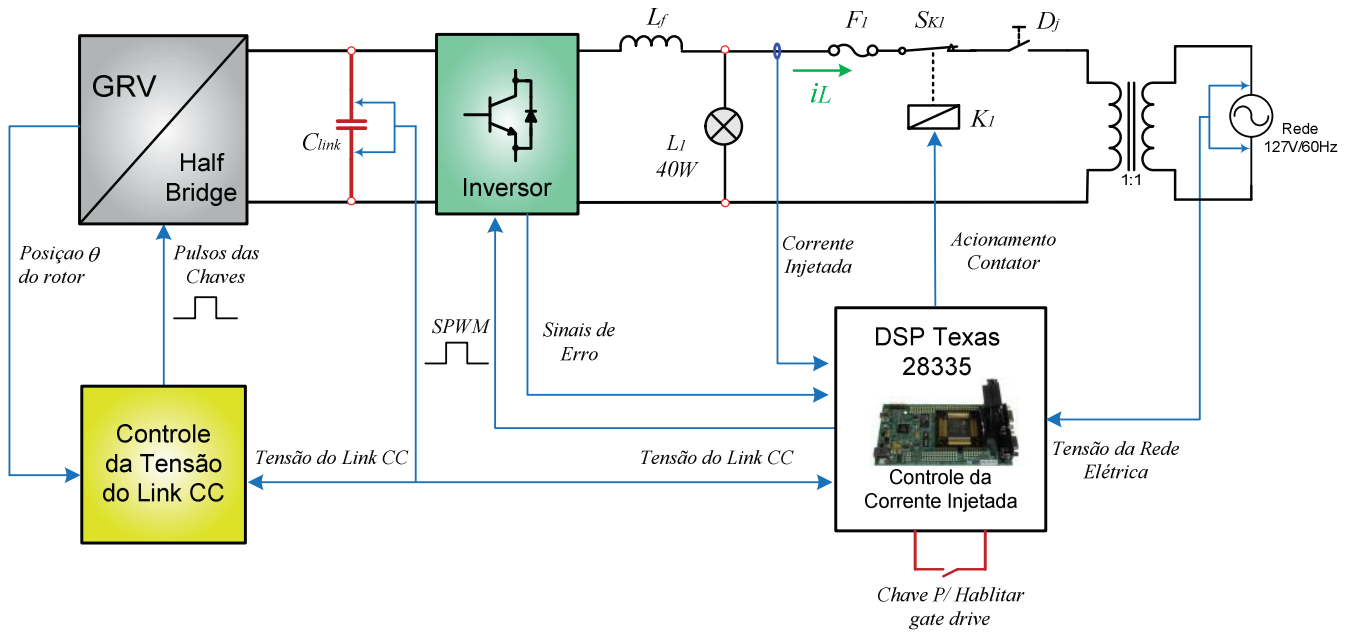


Fig. 11. Esquema de ligação para a conexão do GRV a rede elétrica

corrente é realizado por um compensador P+RES rodando em um DSP 28335. O quantitativo de potência ativa injetada na rede é realizado alterando o valor do *setpoint* do pico de corrente injetada, o qual é feito via software e em tempo real através do ambiente de programação da Texas, o *Code Composer*.

Ainda em relação à Figura 11, uma chave externa foi ligada em uma entrada digital do DSP (utilizando interrupção externa) para desligar os pulsos de PWM a qualquer instante e assim, fazer a desconexão do GRV com o conversor CC-CA.

O circuito de proteção consiste de um disjuntor manual, fusível ultrarrápido, contator K_I (acionado pelo DSP) para conexão/desconexão com a rede além das proteções do próprio conversor CC-CA, que sinalizam quando ocorre curto circuito ou sobre corrente. Estes sinais de erro são tratados pelos DSP através de interrupções externas.

Uma lâmpada L_I adicionada ao circuito logo após o indutor de acoplamento, viabiliza a verificação do sentido da corrente i_L . Dessa forma é possível verificar se a corrente está no sentido GRV para a rede, indicando assim que o GRV está entregando potência para a rede elétrica, ou se a lâmpada está sendo alimentada pela rede.

Foi utilizado um filtro RC passa-baixa para filtrar as componentes de alta frequência. Este filtro foi sintonizado em aproximadamente 2kHz.

Em relação à discretização do compensador P+RES, esta foi realizada através do método de *Tustin* ou Transformação *Bilinear*. Dessa forma, aplicando-se a equação 27 na equação 26 é possível obter os coeficientes da equação discretizada para o compensador P+RES projetado e assim, realizar sua implementação em microcontrolador ou em processador digital de sinais (DSP).

$$C(z) = C(s) \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} \quad (27)$$

C. Esquema do PLL (Phase-Locked Loop).

O sincronismo com a rede elétrica é realizado com o PLL monofásico digital apresentado na Figura 12. O esquema de PLL utilizado é uma versão modificada encontrada em [13]. Seu princípio da operação é baseado no produto escalar entre o vetor de tensão \mathbf{v} e o vetor ortogonal \mathbf{u}_\perp . Quando o PLL é sincronizado com a tensão da rede os dois vetores são ortogonais e o produto é zero. Um filtro passa-baixa é utilizado para eliminar as oscilações advindas do produto dos vetores de tensão \mathbf{v} e \mathbf{u}_\perp . O compensador PI atua para minimizar o erro $\varepsilon = 0 - \mathbf{v} \times \mathbf{u}_\perp$, 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 \mathbf{u}_\perp corresponde à senoide unitária sincronizada com a tensão da rede e é utilizada para gerar a corrente de referência do conversor CC-CA.

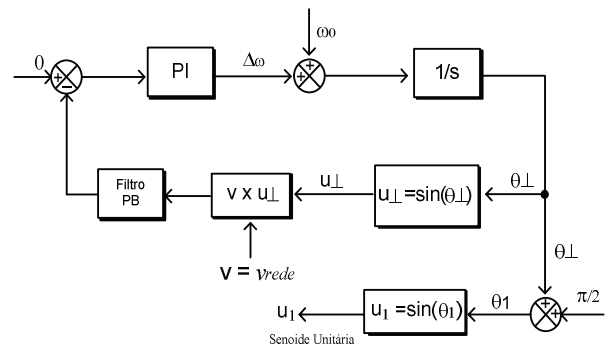


Fig. 12. Esquema do PLL

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.

Todo o sistema apresentado na Figura 1 foi simulado em conjunto, ou seja, o GRV fornece uma tensão regulada no barramento CC e o conversor CC-CA 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 conversor CC-CA trabalham desacoplados.

Os testes de simulação foram realizados com os seguintes critérios: tensão de referência do controlador de tensão em 310V 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 13 mostra o comportamento da tensão no barramento CC durante o transitório de carga. Observa-se que o valor de referência (310V) 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 13 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 14.

Em relação à potência, foram realizadas medições na entrada do Conversor CC-CA, ou seja, no barramento CC e na saída do conversor, no ponto de conexão com a rede elétrica. A Figura 15 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 da aproximadamente 900W. No instante de dois segundos quando a referência muda para 20A a potência é de 1800W

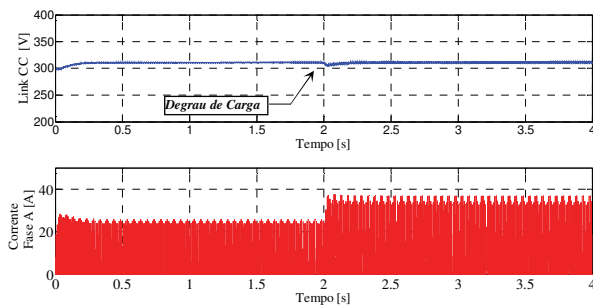


Fig. 13. Tensão gerada (superior) e corrente de fase (abaixo) durante transitório de carga

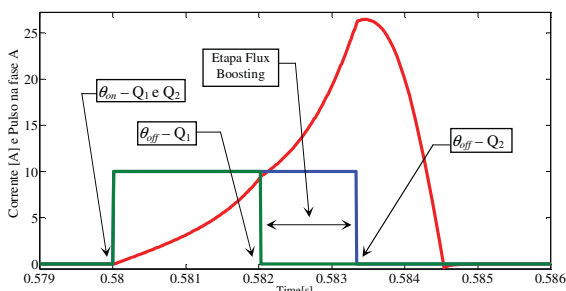


Fig. 14. Corrente da Fase A e Pulsos Q_1 e Q_2

A forma da corrente injetada na rede e a tensão da rede elétrica são mostradas na Figura 16. Percebe-se que a corrente está em fase com a tensão, o que indica que somente potência ativa é entregue na rede.

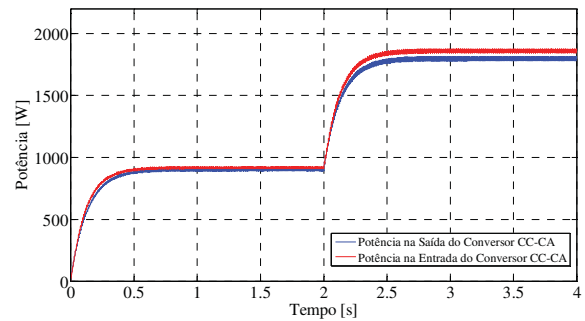


Fig. 15. Potência no Barramento CC e Potência entregue à rede durante o transitório de carga

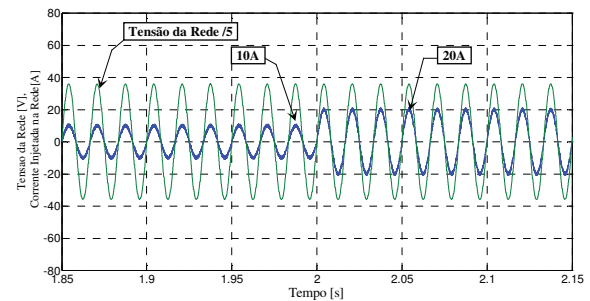


Fig. 16. Tensão da rede e Corrente injetada na rede

A Figura 17 apresenta a DHT (*Distorção Harmônica Total*) da corrente injetada na rede elétrica que foi de 1.61%. A análise foi realizada por FFT (*Fast Fourier Transform*).

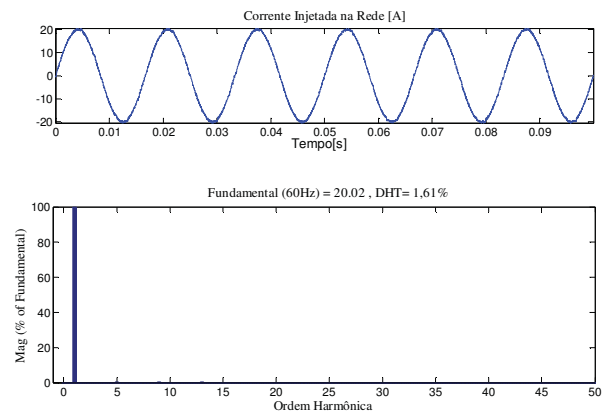


Fig.17. Corrente injetada na rede e sua análise espectral

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 18a mostra o instante de conexão do GRV com a rede elétrica. Um zoom desta figura é mostrado na Figura 18b. Aqui foi ajustado no DSP o *setpoint* de corrente injetada para 4A de pico. Estes gráficos apresentam as formas de onda da tensão regulada no barramento CC, corrente em uma

das fases do GRV, tensão da rede elétrica no ponto de conexão e a corrente injetada na rede.

Como pode ser observada nesta figura, a forma de onda de corrente (letra D) antes do instante de conexão é a corrente na lâmpada L_1 . Ela está com a fase invertida em relação à tensão da rede elétrica. Isto indica que a corrente está sendo fornecida pela rede elétrica. Depois do instante de conexão, quando o sistema de controle assume a operação do conversor CC-CA, a forma de onda apresentada é a corrente injetada na rede. Esta corrente está em fase com tensão da rede elétrica, o que indica que houve uma inversão de fase e o GRV está impondo corrente para a rede. Neste caso, apenas potência ativa está sendo transferida para a rede.

Embora a tensão do barramento CC fornecida pelo Gerador a Relutância Variável se mantenha praticamente constante durante todo ensaio, em razão da ação do controlador de tensão, ela possui uma pequena oscilação não visível devido ao seu valor ser pequeno em relação à escala utilizada no osciloscópio (200V/div).

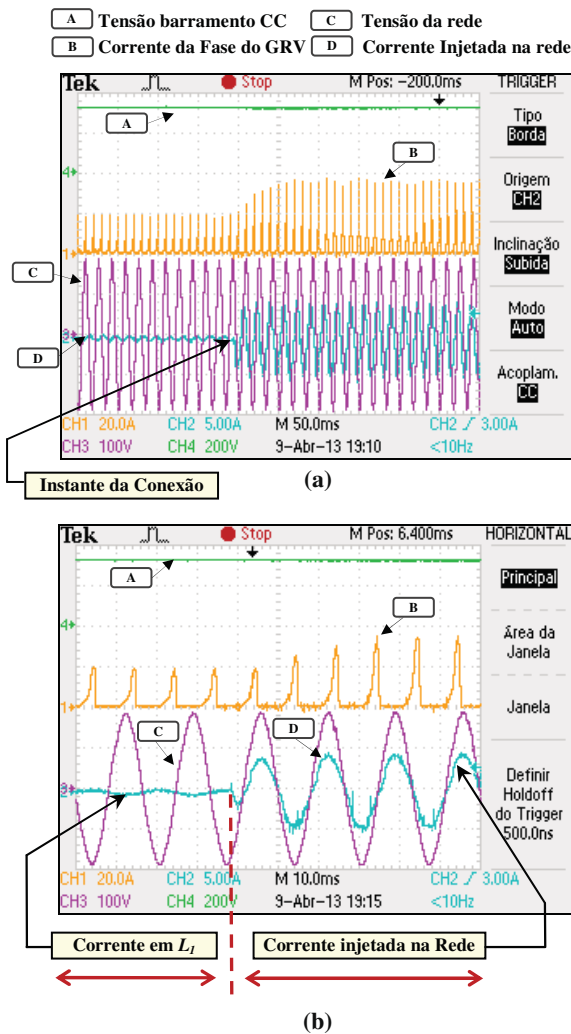


Fig. 18. (a) Formas de ondas do instante de conexão com a rede elétrica. (b) Zoom das formas de ondas.

As Figuras 19a e 19b mostram o comportamento do sistema no instante de desconexão do GRV com a rede elétrica. Pode ser notado que antes do instante de desconexão, como indicado na Figura 19b, a forma de onda da corrente apresentada (letra D) é a corrente injetada na rede e logo após a desconexão fica apenas a corrente na lâmpada L_1 . Percebe-se ainda que houve uma inversão de fase da corrente, indicando que a rede passa a fornecer corrente para a lâmpada.

Um ensaio com degrau de carga foi realizado. Inicialmente foi ajustado um *setpoint* de corrente injetada para 4A e em seguida este valor foi alterado para 10A de pico. A Figura 20 apresenta as formas de ondas obtidas durante este ensaio. É possível notar o instante de mudança do *setpoint* de corrente. O sistema de controle percebe a alteração do *setpoint* e corrige o valor da corrente injetada no mesmo semi ciclo. Neste caso, o sistema de controle foi capaz de regular adequadamente a corrente. Observa-se também que a tensão do barramento CC manteve-se constante evidenciando o perfeito funcionamento do controle da tensão gerada.

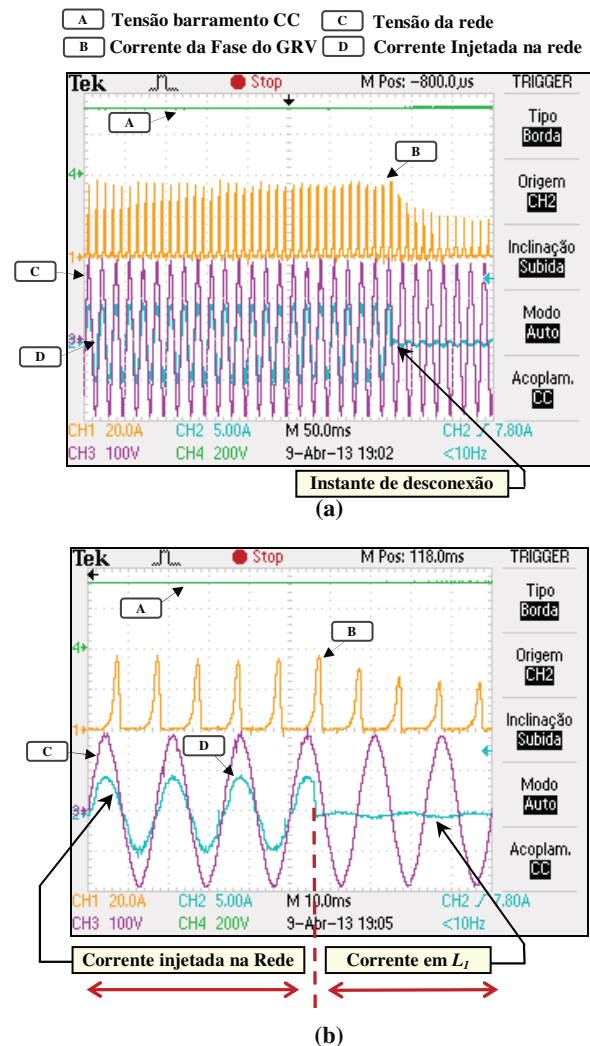


Fig. 19. (a) Formas de ondas do instante de desconexão com a rede elétrica. (b) Zoom das formas de ondas.

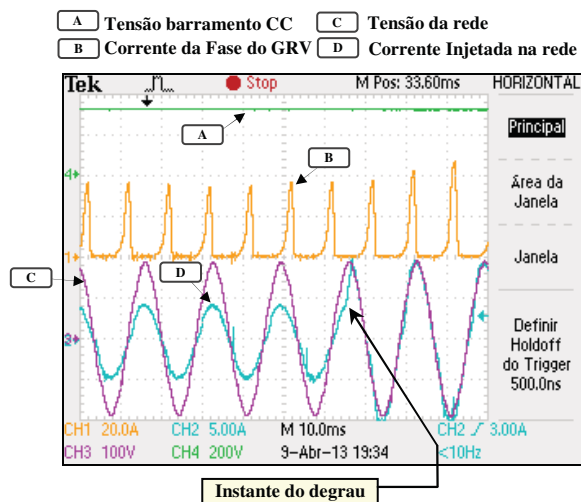


Fig. 20. Formas de onda do instante de degrau de carga.

A Figura 21 ilustra a atuação do compensador P+RES, que faz com que a corrente injetada na rede elétrica siga a referência. Nesta figura é apresentada a corrente elétrica injetada na rede elétrica amostrada pelo DSP e a referência interna de corrente, ambas obtidas através do armazenamento em variáveis de programação do tipo vetores dos pontos das formas amostradas pelo DSP. A Figura 22 mostra a análise espectral da corrente injetada na rede elétrica. Neste caso, a DHT foi de 3,11%.

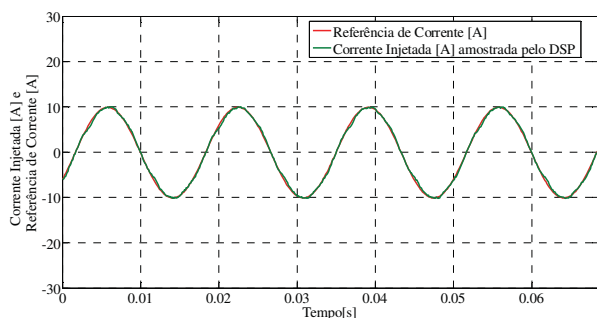


Fig. 21. Formas de onda da referência de corrente e da corrente injetada amostrada pelo DSP.

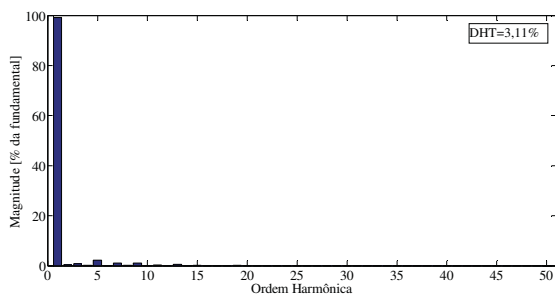


Fig. 22. Análise espectral da corrente injetada na rede.

A plataforma experimental desenvolvida neste trabalho pode ser vista nas fotos da Figura 23.

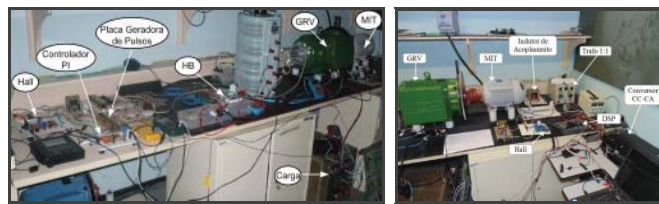


Fig. 23. Fotos da plataforma experimental.

VII. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a modelagem e o controle de um Gerador a Relutância Variável para conexão com a rede elétrica. O principal objetivo do trabalho foi apresentar uma estratégia para injeção de potência ativa através do controle da corrente injetada. Os resultados da simulação e os resultados experimentais mostram que o objetivo foi alcançado com sucesso. Além de apresentar o assunto da conexão do GRV com a rede elétrica, o documento também serve como um tutorial para a utilização da Máquina a Relutância Variável como gerador. Assim, também foi apresentada uma técnica de controle da tensão gerada pelo GRV (barramento CC), baseada na variação do ângulo de magnetização, utilizando uma etapa intermediária entre as etapas de magnetização e desmagnetização de cada uma das fases. 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. Para a injeção de potência ativa na rede foi utilizado um conversor CC-CA acoplado ao GRV através de um capacitor de barramento e sincronizado por um algoritmo de PLL. O quantitativo de potência ativa injetada na rede foi regulado através do controle de corrente por um compensador P+RES, que é capaz de eliminar erros de regime permanente mesmo em sistemas de variáveis alternadas. A estratégia proposta foi implementada na forma de simulação e validada experimentalmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo financiamento deste projeto e ao IFG/PIQS pelo apoio.

ANEXOS

TABELA A1
Dados do Protótipo do GRV

Características	Valores
Potência de Saída	5,0 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
Resistência do enrolamento de fase	0,5 Ω

REFERÊNCIAS

- [1] D.J. Powell; G.W. Jewell; Calverley “Iron Loss in a Modular Rotor Switched Reluctance Machine for the More-Electric Aero-engine”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, n° 10, pp. 3934- 3936, October 2005.
- [2] Y.J. Bao; K.W.E. Cheng, “Research on a Novel Switched Reluctance Generator for Wind Power Generation” *Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, pp.1-6, 2011.
- [3] Y.Chang, C.M. Liaw, “On The Design of Power Circuit and Control Scheme for Switched Reluctance Generator” *Transactions on Power Electronics*, vol. 23, n° 1, pp 445 – 454, July 2008.
- [4] Y.C. Chang, C.M. Liaw. “Establishment of a Switched-Reluctance Generator-Based Common DC Microgrid System” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, n° 9, pp. 2512-2527, September 2011.
- [5] Y. Lingzhi, *et all*. “Research on Grid-Connected Inverter of SRG Wind Power Generation System Based on SVPWM Over-Modulation Scheme” *Control and Decision Conference*, vol. 3, pp 2494-2498, 2010.
- [6] S. Kouro, *et all* “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters” *Transactions on Power Electronics*, vol. 57, n° 8, pp 2553- 2580, August 2010.
- [7] D. A. Andrade, R. Krishnan, "Characterization of Switched Reluctance Machines Using Fourier Series Approach" in *Proc. of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, pp. 48-54, September 2001.
- [8] G.P.Viajante, *et all*, "Estratégia para Melhoria da Eficiência da Conversão Eletromecânica de Energia do GRV" *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 16, pp. 367-375, Novembro 2011.
- [9] A. W. F. V. Silveira, D. A. Andrade, A. Fleury, L. C. Gomes, C. A. Bissochi Jr, H. de Paula “Generated Voltage Control in a Switched Reluctance Motor/Generator” *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 15, pp. 203-212, Agosto 2010.
- [10] V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, L. C. Gomes, A. W. F. V. Silveira, G. P. Viajante, A. B. Fernandes. “Switched Reluctance Machine Modeling Including Core Magnetic Saturation - The Self Excited Operation Mode”, in *Proc. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2049- 2054, 2012.
- [11] R.D. Middlebrook; S, J. A.Cuk " A General Unified Approach To Modelling Switching-Converter Power Stages". In *Proc. of Power Electronics Specialists Conference*. Cleveland, pp. 1-6, 1976.
- [12] R. W. Erickson, D. Maksimóvic, *Fundamentals of Power Electronics*, Second Edition, 2004.
- [13] M.G. Villalva *et all* “Modeling and Control of a Three-Phase Isolated Grid-Connected Converter for Photovoltaic Applications” *Controle & Automação*, vol.22 n° 3, pp. 229-237, 2011.
- [14] D. N, Zmood, D. G,HolmeS, “Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters With Zero Steady-State Error”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 18, n° 3, pp. 814- 822, May 2003.

DADOS BIOGRÁFICOS

Ghunter Paulo Viajante: Possui graduação em Engenharia de Computação pela PUC/Goiás (2006), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFG (2009) e UFU (2013). Atualmente é professor efetivo do IFG-Campus Itumbiara. Trabalha nas seguintes áreas: Sistemas Microcontrolados, Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas.

Darizon Alves de Andrade: É bacharel (1984) e mestre em engenharia (1987) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil, e Ph.D. (1994) pela Universidade de Leeds, Leeds, Reino Unido, Durante o ano 2000 foi professor visitante com o Grupo de Controle de Máquinas Elétricas na VTEC, EUA, onde realizou pesquisas sobre novas estratégias para modelagem de Máquinas a Relutância Variável.

Marcos Antônio Arantes de Freitas: Engenheiro eletricitista (1991), mestre (1994) e doutor (2002) pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor efetivo do IFG-Campus Itumbiara. Trabalha nas seguintes áreas: Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência.

Victor Régis Berladelli: É Engenheiro de Telecomunicações pela UNIMINAS (2005), Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2008). Atualmente é aluno de doutorado na Universidade Federal de Uberlândia na área de Máquinas Elétricas.

Luciano Coutinho Gomes: Bacharel, Mestre e Doutor pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, em 1995, 2002 e 2008, respectivamente, todos em engenharia elétrica. Atualmente é Professor Assistente na UFU. Suas áreas de interesse são relacionadas à simulação e técnicas de Controle Digital de Máquinas Elétricas.

Augusto. W. F. V. Silveira: Graduou-se em Engenharia de Computação pela PUC/Goiás. Obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Leciona na faculdade de engenharia elétrica (FEELT) da UFU, onde realiza pesquisa para o desenvolvimento das estratégias de Controle e Acionamento de Máquinas Elétricas.

Josemar Alves dos Santos Jr: Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Paulista (2006). É Mestre Engenharia Elétrica e Computação pela Universidade Federal de Goiás (2011). Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia onde pesquisa na área de Máquinas Elétricas.

Felippe dos Santos e Silva: Graduou-se em Engenharia Elétrica (2008) na PUC/Goiás. Atualmente é mestrando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia na área de Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas.