

Controle Robusto de Geradores de Relutância Variável Conectados à Rede Elétrica

Caio R. D. Osório, Filipe P. Scalcon, Rodrigo P. Vieira, Vinícius F. Montagner and Hilton A. Gründling
Power Electronics and Control Research Group - GEPOC
Federal University of Santa Maria - UFSM
Av. Roraima, 1000, Camobi, Santa Maria - RS
Email: caio.osorio@gmail.com, filipescalcon1@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta uma estratégia de controle robusto para um gerador de relutância variável conectado à rede através de um filtro L, para aplicações de geração eólica. Um controlador *sliding mode* é utilizado a fim de regular a tensão do barramento CC. O procedimento de projeto e a análise de estabilidade do controlador são apresentados. Um controlador robusto por realimentação de estados é projetado com base em LMIs, visando regular a injeção de corrente na rede e garantindo performance e estabilidade adequadas para toda a faixa de variação da indutância incerta da rede. Resultados de simulação são apresentados, a fim de demonstrar a regulação da tensão do barramento CC e das correntes injetadas na rede.

Index Terms—Gerador de relutância variável, inversor conectado à rede, controle robusto, energia eólica

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, associada à escassez de combustíveis fósseis, evidencia a necessidade de diversificação da matriz energética, exigindo o uso de fontes renováveis de energia, como a energia eólica. Tradicionalmente, geradores de indução *double-fed* e geradores síncronos de ímã permanente são usados para esta aplicação [1]. Essas máquinas, no entanto, apresentam alto peso e custo, respectivamente.

Outro tipo de máquina vem ganhando atenção no campo da energia eólica: a máquina de relutância variável (MRV). As MRVs são caracterizadas por uma estrutura simples, robustez, baixo custo de produção, a ausência de ímãs permanentes ou enrolamentos no rotor e uma estrutura inerentemente tolerante a falhas [2]. O gerador de relutância variável (GRV) também é capaz de operar em uma ampla faixa de velocidade, não exigindo o uso de uma caixa de engrenagens, o que reduz o peso, o custo e a complexidade do sistema como todo [3]. Essas características tornam a máquina de relutância variável uma opção viável para várias aplicações que exigem operação em velocidade variável e ambientes hostis.

No contexto da integração de fontes de energia renováveis, os inversores conectados à rede são elementos importantes, sendo responsáveis por garantir a injeção de energia de alta qualidade na rede, com correntes injetadas obedecendo a

limites rigorosos de distorção harmônica, como a norma IEEE 1547 [4], [5]. Para atenuar os harmônicos da modulação por largura de pulso (PWM), tais inversores requerem filtros passa-baixa, sendo o filtro L uma alternativa amplamente utilizada [6]. Além disso, esses inversores devem garantir desempenho e estabilidade adequados, mesmo quando operando contra tensões de rede distorcidas e incertezas paramétricas, como a impedância incerta da rede. Neste cenário, controladores de corrente robustos são importantes, sendo o controle de corrente por realimentação de estados projetado por meio de desigualdades matriciais lineares (LMIs) uma ferramenta eficiente, que tem sido empregada com sucesso no controle de corrente robusto de inversores conectados à rede [7]–[9].

Alguns estudos visam abordar a conexão de um GRV à rede [3], [10]–[12]. Em [3], é apresentada uma estratégia de controle para um GRV conectado à rede, acionado por uma turbina eólica de velocidade variável. Uma estratégia de controle de malha fechada é proposta para garantir a operação no ponto de máxima eficiência aerodinâmica. Um controlador PI é usado para controlar a tensão do barramento CC e um controlador de corrente separado é responsável pelo conversor conectado à rede. Resultados experimentais são apresentados para demonstrar o comportamento do sistema para variações de velocidade.

Um esquema de controle para um GRV operando em uma ampla faixa de velocidade é apresentado em [12]. Dois algoritmos distintos de controle de potência são propostos, um para operação em baixa e outro para operação em alta velocidade. Ângulos ótimos de disparo, bem como um controlador de *sliding mode* (SM) são introduzidos para melhorar o desempenho geral do sistema.

No presente artigo, uma estratégia de controle robusta para um GRV conectado à rede é apresentada. O sistema de geração é composto por um GRV auto-excitado operando com um regulador de histerese de corrente e um controlador *sliding mode*, responsável pelo controle de tensão do barramento CC. Um inversor com filtro L é usado como uma interface com a rede, e um controle de corrente robusto baseado em LMIs é aplicado para garantir uma operação estável e um desempenho adequado frente a parâmetros incertos da rede. Resultados de simulação são apresentados para avaliar o desempenho e a robustez do sistema.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer ao INCT-GD e as agências financeiras (CNPq 465640/2014-1, CNPq Projeto 424997/2016-9, CNPq 309536/2018-9, CAPES 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

II. GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

A máquina de relutância variável opera com corrente contínua pulsada, exigindo um conversor estático para operação adequada. Sua principal característica é a estrutura de dupla saliência, responsável por muitas das não linearidades da máquina. A operação como motor ou gerador é definida pelos ângulos de acionamento (θ_{on} e θ_{off}). A modelagem do gerador e o controlador *sliding mode* de tensão serão detalhados nesta seção.

A. Modelagem do Gerador

Uma máquina de relutância variável funcionará como um gerador se suas fases forem excitadas quando a indutância de fase estiver diminuindo. Diferentes topologias de conversor podem ser usadas para excitar o GRV, no entanto, a mais utilizada é a meia ponte assimétrica (*Assymetric Half-Bridge - AHB*), apresentado na Figura 1. A principal razão para isso é o fato de permitir que a máquina seja acionada como gerador e motor [13], com alterações mínimas no conversor. O conversor usado neste trabalho apresenta configuração auto-excitada, onde uma bateria é usada para fornecer energia inicial ao capacitor. Depois da desconexão da bateria, o capacitor passa a fornecer energia para a excitação das fases e limita a ondulação de tensão do barramento CC [14].

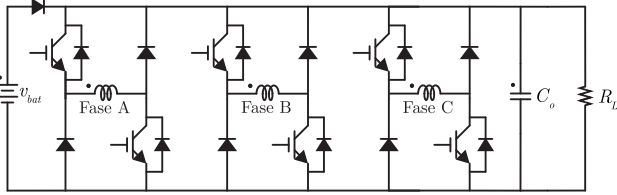


Figura 1. Conversor meia ponte assimétrica auto-excitado.

Para que ocorra a conversão de energia, primeiramente uma fonte externa de movimento deve ser conectada ao GRV, como uma turbina eólica. Uma vez em movimento, as fases do gerador são excitadas contra sua tendência natural, de buscar o alinhamento rotor-estator, comutando-se os interruptores do AHB, como visto na Figura 2 (a). Uma vez que os interruptores são fechados, o torque eletromagnético leva a uma força contra-eletromotriz que converte a energia mecânica da fonte primária em energia elétrica, definindo assim o processo de geração [15], e permitindo que a corrente circule através dos diodos, como visto na Figura 2 (b).

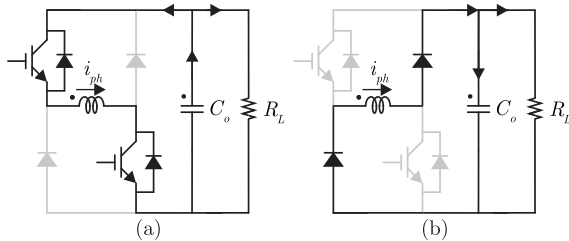


Figura 2. Operação do conversor AHB. (a) Excitação. (b) Geração.

B. Controle de Tensão do Barramento CC

A tensão de saída de um GRV é altamente dependente da carga conectada à máquina. Isso acontece porque o GRV apresenta uma característica de fonte de corrente, que difere da maioria dos geradores, que possuem um comportamento de fonte de tensão [16]. Portanto, um aumento na carga do gerador leva a um aumento na corrente de saída e a uma diminuição na tensão de saída.

Para regular a tensão do barramento CC, independentemente da velocidade do rotor e da condição de carga, o nível de magnetização do gerador deve ser variado. Os dois métodos mais comuns de acionamento do GRV são histerese e pulso único. Este artigo tem como foco o acionamento via histerese, dado que é usado para baixas e médias velocidades [15]. A estrutura de controle utilizada é mostrada na Figura 3.

Considerando a operação de histerese, os ângulos de excitação do gerador (θ_{on} e θ_{off}) são mantidos fixos. A corrente de magnetização é controlada em torno de um valor de referência durante o estágio de excitação. Essa referência é fornecida por outro controlador, que a determina com base no erro de rastreamento de tensão do barramento CC. Uma vez que uma fase atinja θ_{on} , os interruptores do conversor para essa fase são ligados e a corrente aumenta. Quando a corrente excede o valor máximo da banda de histerese, os interruptores são desligados. A corrente começa a diminuir até atingir o valor mínimo da banda de histerese. Neste ponto, os interruptores são ligados novamente. Este processo é repetido até o final da excitação, em θ_{off} .

O bloco “*sig*” é responsável pela lógica de comutação, que com base em θ_{on} , θ_{off} e θ , determinará qual fase será excitada. O regulador de histerese gera os sinais de acionamento para os interruptores de cada fase.

C. Projeto do Controlador Sliding Mode

O projeto do controlador SM é baseado no processo de geração descrito na Figura 2 [17]. A partir do circuito apresentado, é possível aplicar as Leis de Tensão e Corrente de Kirchhoff para obter as expressões abaixo.

$$\dot{i}_{ph} = -\frac{1}{L}V_{cc} - \frac{r_{ph}}{L}i_{ph} - \frac{1}{L}i_{ph}\omega_r \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{cc} = -\frac{1}{R_L C_o}V_{cc} + \frac{1}{C_o}i_{ph} \quad (2)$$

onde V_{cc} é a tensão do barramento CC, i_{ph} é a corrente em uma fase do GRV, ω_r é a velocidade rotórica, L é a indutância da fase, r_{ph} é a resistência de fase, C_o é o capacitor do barramento CC e R_L é a resistência equivalente de carga.

Definindo-se x_1 como o erro de rastreamento de tensão,

$$x_1 = v_o^* - V_{cc}, \quad (3)$$

e assumindo que a tensão de referência é mantida constante, x_2 pode ser definido como a derivada deste erro,

$$x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{V}_{cc} = \frac{1}{R_L C_o}V_{cc} - \frac{1}{C_o}i_{ph}. \quad (4)$$

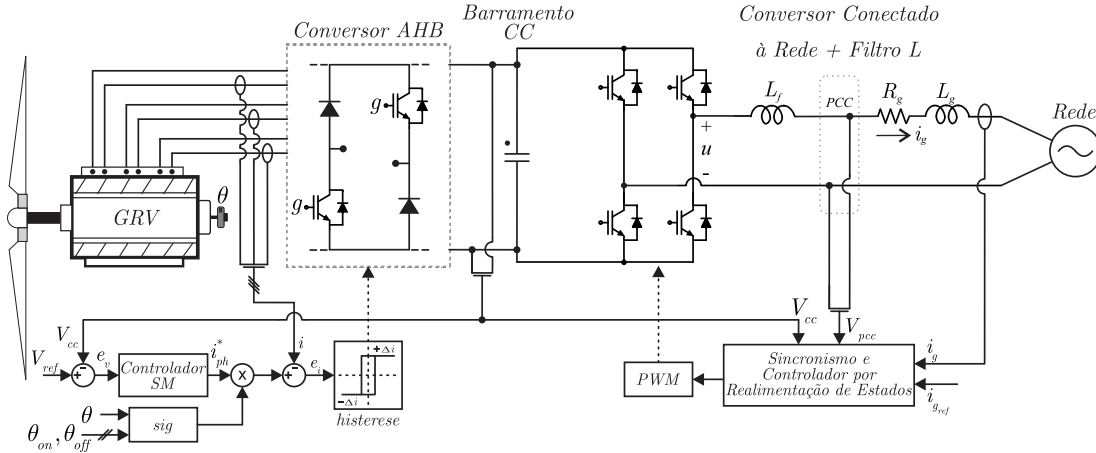


Figura 3. Estrutura proposta de um sistema de geração eólica baseado em um gerador de relutância variável conectado à rede.

O modelo em espaço de estados é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/R_L C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C_o \end{bmatrix} u \quad (5)$$

onde

$$u = \dot{i}_{ph}. \quad (6)$$

A superfície de deslizamento é definida como

$$\sigma = kx_1 + x_2, \quad (7)$$

onde $k > 0$. A lei de controle é dada como uma combinação dos estados

$$u \triangleq \alpha x_1 + \beta x_2. \quad (8)$$

Com base em (6), a corrente de fase de referência pode ser obtida da lei de controle como

$$i_{ph}^* = \int u dt. \quad (9)$$

Resolvendo-se a integral e adicionando-se a função sinal, a corrente de referência pode ser escrita como

$$i_{ph}^* = \alpha \int x_1 dt + \beta x_1 + \gamma \text{sign}(\sigma). \quad (10)$$

D. Análise de Estabilidade

Considerando-se a função candidata a Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2. \quad (11)$$

Uma condição suficiente para a existência de um modo deslizante é obtida quando o sistema garante a seguinte condição

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} < 0 \quad (12)$$

onde

$$\dot{\sigma} = k\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = kx_2 + \dot{x}_2 \quad (13)$$

Resolvendo (12) resulta em (14).

$$\dot{V} = \frac{1}{C_o} \left[-\alpha k x_1^2 + x_2^2 \left(k C_o - \frac{1}{R} - \beta \right) - \gamma |\sigma| + \left(-\alpha + k^2 C_o - k \frac{1}{R} - k\beta \right) x_1 x_2 \right] \quad (14)$$

Assim, é possível projetar os ganhos do controlador, α e β , a fim de garantir a estabilidade da função candidata a Lyapunov (14), resultando em

$$\begin{aligned} \alpha &> 0 \\ \beta &> k C_o - \frac{1}{R} \\ \gamma &> 0 \end{aligned} \quad (15)$$

III. INVERSOR CONECTADO À REDE POR FILTRO L

Considerando o inversor conectado à rede por meio de filtro L, mostrado na Figura 3, apresenta-se nesta seção a modelagem e o controle robusto das correntes injetadas na rede. Os parâmetros do circuito são dados por: indutância do filtro $L_f = 2$ mH, resistência de rede $R_g = 0.5\Omega$, e indutância de rede L_g assumida como um parâmetro incerto, contido no intervalo de 1 mH a 5 mH.

A. Modelagem em Espaço de Estados

Note que a indutância do filtro (L_f) e da rede (L_g) estão associadas em série, podendo ser reescritas como $L = L_f + L_g$. Devido a incerteza em L_g , o parâmetro L também é incerto, contido no intervalo dado por

$$L \in [L_{\min}, L_{\max}]. \quad (16)$$

Aplicando a Lei das Tensões de Kirchoff, o modelo médio em tempo contínuo da planta é dado por

$$\frac{di_g}{dt} = -\frac{R}{L} i_g + \frac{1}{L} u - \frac{1}{L} v_g \quad (17)$$

onde u é a entrada de controle, v_g é a entrada de distúrbio, e i_g é a corrente injetada na rede (saída a ser controlada).

Para a implementação de um controlador digital, considere a discretização da planta com um período de amostragem T_s , e a inclusão de um estado adicional ϕ , para representar o atraso de implementação. Para garantir rastreamento de referências senoidais e rejeição de distúrbios, adiciona-se um controlador

ressonante, cujos estados internos são dados por ξ . Deste modo, o modelo aumentado pode ser escrito como

$$\begin{aligned} i_g(k+1) &= a(L) i_g(k) + b_u(L) \phi(k) - b_g(L) v_g(k) \\ \phi(k+1) &= u(k) \\ \xi(k+1) &= \mathbf{R}\xi(k) + \mathbf{T}i_{ref}(k) - \mathbf{T}i_g(k) \end{aligned} \quad (18)$$

onde

$$a(L) = 1 - T_s \frac{R}{L}, \quad b_u(L) = T_s \frac{1}{L}, \quad b_g(L) = T_s \frac{1}{L} \quad (19)$$

e

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Sistemas sujeitos a incertezas paramétricas podem ser descritos por modelos politópicos. Deste modo, (18) pode ser reescrito como

$$\begin{bmatrix} i_g(k+1) \\ \phi(k+1) \\ \xi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\alpha) & b_u(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\mathbf{T} & 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_g(k) \\ \phi(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} -b_g(\alpha) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} i_{ref}(k) \quad (21)$$

Para obter o modelo (21), os parâmetros em (19) são calculados para cada valor extremo (vértice) de L , e então combinados de forma convexa em uma representação politópica de dois vértices [18], dada por

$$(a, b_u, b_d)(\alpha(k)) = \sum_{j=1}^2 \alpha_j(k) (a_j, b_{u,j}, b_{d,j}) \quad (22)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_j(k) \geq 0, \quad j = 1, 2. \quad (23)$$

De forma compacta, (21) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} \rho(k+1) &= \mathbf{G}(\alpha)\rho(k) + \mathbf{H}_u u(k) + \mathbf{H}_g(\alpha)v_g(k) \\ &+ \mathbf{H}_r i_{ref}(k) \end{aligned} \quad (24)$$

B. Controle Robusto de Corrente

Considere a lei de controle por realimentação de estados dada por

$$u(k) = \mathbf{K}\rho(k) \quad (25)$$

Para obter o controle adequado da corrente injetada na rede frente à incertezas paramétricas, emprega-se aqui um controlador robusto por alocação de polos, projetado por meio de LMIs [8], [9].

No domínio do tempo discreto, considerando um raio de alocação de polos definido por um número escalar, contido no círculo de raio unitário, se existirem matrizes simétricas definidas positivas \mathbf{Q} e \mathbf{J} , que satisfaçam as LMIs, então o ganho de realimentação de estados é dado por

$$\mathbf{K} = \mathbf{J}\mathbf{Q}^{-1} \quad (26)$$

Este ganho garante estabilidade robusta em malha fechada contra incerteza e até mesmo variações arbitrariamente rápidas em L_g , além de um limite para o modo das respostas

transitórias. Ainda, considerando a inclusão de um controlador ressonante em 60 Hz, baseado no princípio do modelo interno, este ganho garante rastreamento de referências senoidais de corrente e rejeição de distúrbios harmônicos na tensão de rede, nesta frequência.

Cabe observar que (25) demanda a medição de apenas uma variável (i_g), sendo os demais estados obtidos internamente no DSP. Deste modo, a estratégia apresentada tem custo de implementação compatível com qualquer outra por realimentação dinâmica de saída, com a vantagem de tratar sistematicamente da robustez contra incerteza paramétrica.

IV. RESULTADOS

A fim de validar a estratégia de controle proposta, resultados de simulação foram obtidos usando o *software* Matlab/Simulink. O GRV analisado neste artigo possui as seguintes características: 3 fases, 2 kW, velocidade nominal de 1500 rpm, 12 polos no estator e 8 no rotor (configuração 12x8). O conversor AHB foi construído usando-se $C_0 = 2250 \mu F$.

O modelo do GRV utilizado neste trabalho foi obtido a partir de dados experimentais de magnetização, na forma de tabelas de busca ITBL e TTBL [2], [19], [20]. Com o valor do fluxo magnético e a posição relativa da fase, é possível determinar o valor de corrente usando-se ITBL. Assim, com o valor de corrente e a posição relativa da fase, é possível determinar o valor do torque eletromagnético, usando-se TTBL. A Figura 4 apresenta as tabelas do GRV utilizado.

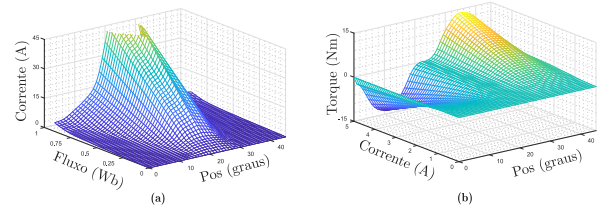


Figura 4. Diagrama de blocos do modelo de simulação do GRV.

Para os resultados apresentados abaixo, o barramento CC é inicialmente carregado pelo GRV conectado a uma carga resistiva. Uma vez que a tensão do barramento CC atinja o valor de referência, a carga resistiva é desconectada e a conexão à rede é realizada. A tensão de referência é mantida constante em 200V para todos os resultados. A tensão eficaz da rede é igual a 127 V.

A Figura 5 mostra a capacidade de rastreamento do sistema, com uma mudança na amplitude de corrente em $t = 0,80s$. É possível verificar uma boa resposta transiente e em regime. A tensão do barramento CC também é controlada com sucesso, com uma ondulação máxima de 4,5 %. As correntes GRV aumentam a fim de manter a tensão do barramento CC, apresentando uma amplitude variável devido à potência oscilante que está sendo injetada na rede.

A Figura 6 apresenta a resposta do sistema à variação paramétrica, onde em $t = 0,80s$ a indutância de rede é variada abruptamente de $L_g = 5 \text{ mH}$ para $L_g = 1 \text{ mH}$. Pode-se notar um aumento da ondulação de corrente após a

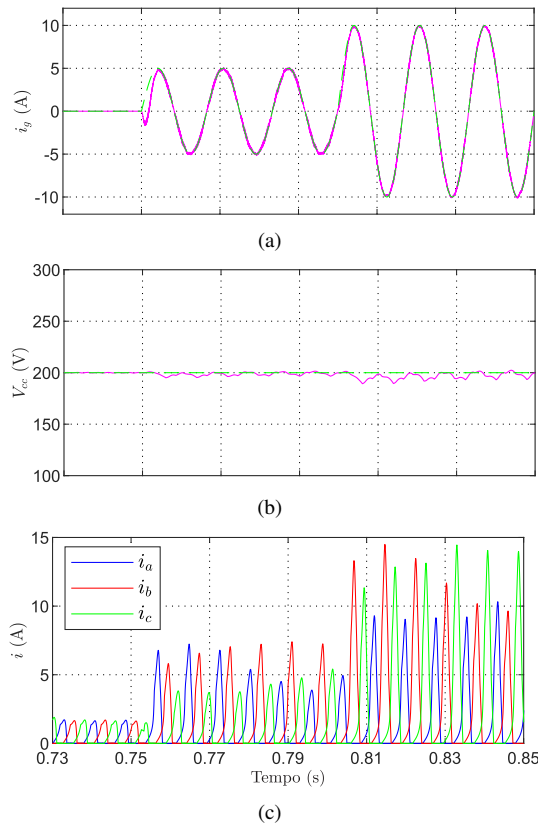


Figura 5. (a) Respostas transitórias e em regime permanente para uma variação em amplitude da referência para corrente injetada na rede ($i_{g,ref} = 5A$ para $i_{g,ref} = 10A$). (b) Tensão do barramento CC correspondente ao ensaio em (a). (c) Correntes trifásicas no GRV correspondentes ao ensaio em (a).

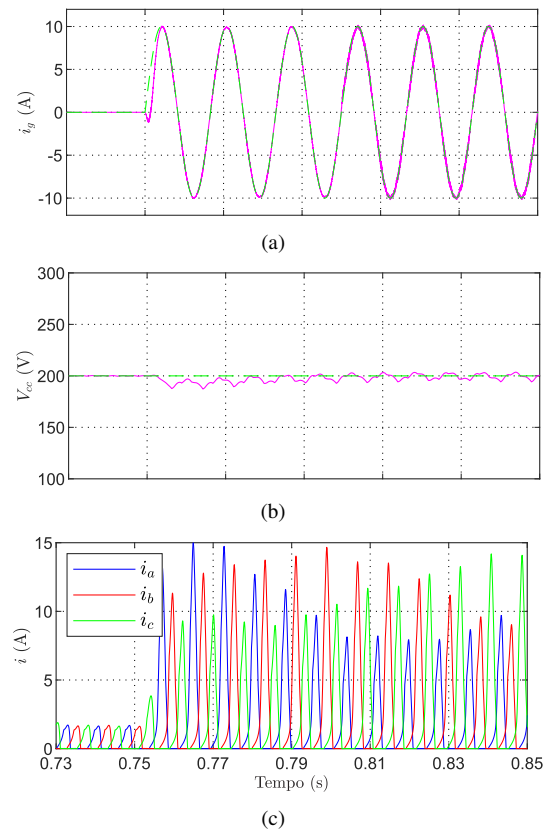


Figura 6. (a) Respostas transitórias e em regime permanente para uma variação de indutância da rede ($l_g = 5mH$ para $l_g = 1mH$) para corrente injetada na rede. (b) Tensão do barramento CC correspondente ao ensaio em (a). (c) Correntes trifásicas no GRV correspondentes ao ensaio em (a).

variação, no entanto, as correntes injetadas na rede apresentam bom desempenho para ambas as condições. Mais uma vez, o controlador *sliding mode* é capaz de controlar a tensão do barramento CC, com uma ondulação menor que 10V. A Figura 7 mostra a capacidade do sistema para operação com velocidade variável. A velocidade do rotor é reduzida de 100 rad/s para 75 rad/s em $t = 0,8s$. Boa resposta transitória é observada, acompanhada por uma diminuição na frequência das correntes do gerador.

Para verificar a baixa distorção harmônica da corrente injetada na rede, obtida com o controlador proposto, apresenta-se a análise harmônica da forma de onda de corrente mostrada na Figura 6 (a). O conteúdo harmônico pode ser visto na Figura 8. É realizada uma comparação com os limites da norma IEEE 1547 [5], a partir da qual fica claro que a corrente injetada na rede está de acordo com os limites determinados, para ambas as condições de rede.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma estratégia de controle robusto de um gerador de relutância variável conectado à rede para aplicações de energia eólica. Uma técnica *sliding mode* foi usada para regular a tensão do barramento CC na saída do gerador de relutância variável. Considerando dois estados, o erro de rastreamento da tensão de saída e sua derivada,

uma descrição em espaço de estados do gerador e uma lei de controle *sliding mode* foram obtidas. Um controlador robusto por realimentação de estado projetado com base em LMIs é empregado para sintetizar a corrente injetada na rede, garantindo estabilidade e desempenho adequado para toda a faixa de indutância incerta da rede. Os resultados de simulação validam a técnica proposta frente às variações de carga, de velocidade e contra incerteza paramétrica, comprovando a eficácia do sistema tanto para regular a tensão do barramento CC quanto para injetar corrente na rede.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 26–33, May 2002.
- [2] C. R. D. Osorio, R. P. Vieira, and H. A. Grundling, "Sliding mode technique applied to output voltage control of the switched reluctance generator," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct 2016, pp. 2935–2940.
- [3] R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, G. Asher, J. Clare, and P. Wheeler, "Control system for grid generation of a switched reluctance generator driven by a variable speed wind turbine," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, vol. 2, Nov 2004, pp. 1879–1884 Vol. 2.
- [4] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, October 2006.

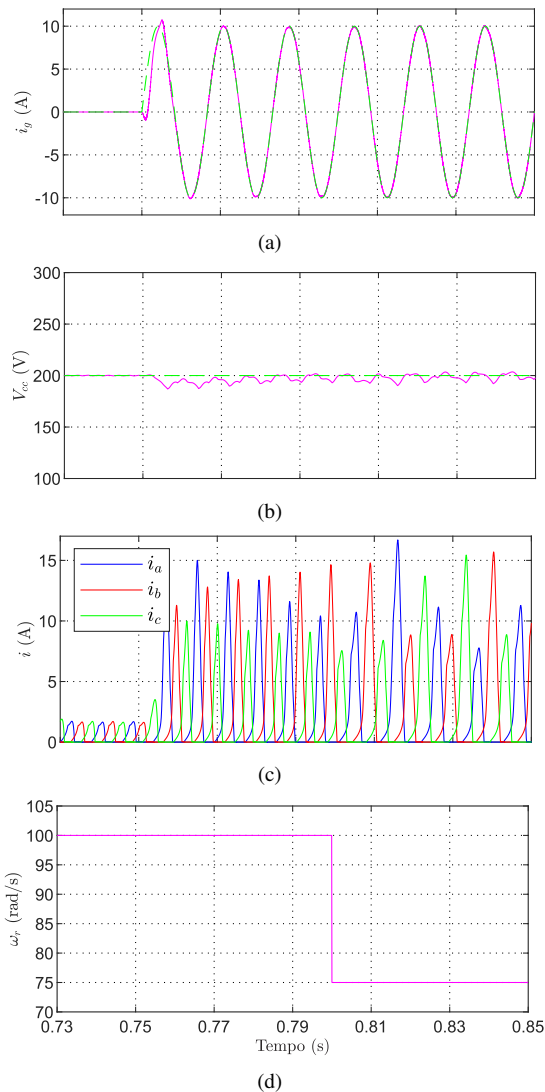


Figura 7. (a) Respostas transitórias e em regime permanente para uma variação na velocidade rotórica do GRV ($\omega_r = 100\text{rad/s}$ para $\omega_r = 75\text{rad/s}$) para corrente injetada na rede. (b) Tensão do barramento CC correspondente ao ensaio em (a). (c) Correntes trifásicas no GRV correspondentes ao ensaio em (a). (d) Velocidade rotórica correspondente ao ensaio em (a).

- [5] "IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces," *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, pp. 1–138, April 2018.
- [6] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, ser. Wiley - IEEE. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] C. Olalla, R. Leyva, A. El Aroudi, and I. Queinnec, "Robust LQR control for PWM converters: An LMI approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2548–2558, July 2009.
- [8] L. A. Maccari, Jr., J. R. Massing, L. Schuch, C. Rech, H. Pinheiro, R. C. L. F. Oliveira, and V. F. Montagner, "LMI-based control for grid-connected converters with LCL filters under uncertain parameters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 7, pp. 3776–3785, July 2014.
- [9] C. R. D. Osorio, G. G. Koch, L. C. Borin, I. Cleveston, and V. F. Montagner, "A robust quasi-deadbeat controller and relaxations applied to grid-connected inverters," *Brazilian Power Electronics Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 320–329, 2018.
- [10] G. P. Viajante, M. A. A. Freitas, J. A. Santos, V. R. Bernardeli, M. E.

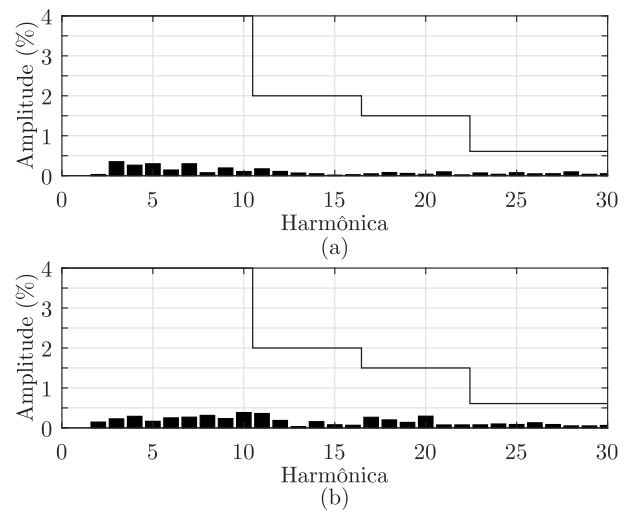


Figura 8. Conteúdo harmônico da corrente da rede, respeitando os limites da norma IEEE 1547. (a) THD= 1.24% para $L_g = 5\text{mH}$. (b) THD= 2.67% para $L_g = 1\text{mH}$.

- Oliveira, C. X. Rocha, D. A. Andrade, and L. C. Gomes, "Switched reluctance generator in connection with the three-phase power grid," in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, June 2015, pp. 1527–1532.
- [11] G. P. Viajante, E. N. Chaves, C. A. Queiroz, M. A. A. Freitas, L. C. Miranda, D. P. A. Silva, S. B. Silva, L. C. Gomes, and R. T. Fidelis, "A grid connection scheme of a switched reluctance generator using p+resonant controller," in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, June 2017, pp. 1–6.
- [12] T. A. d. S. Barros, P. J. d. S. Neto, P. S. N. Filho, A. B. Moreira, and E. R. Filho, "An approach for switched reluctance generator in a wind generation system with a wide range of operation speed," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8277–8292, Nov 2017.
- [13] A. Arifin, A. B. Ibrahim, and S. C. Mukhopadhyay, "State of the Art of Switched Reluctance Generator," *Energy and Power Engineering (EPE)*, vol. 04, no. 06, pp. 447–458, 2012.
- [14] V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante, and L. G. Cabral, "Self-excited switched reluctance generator," in *XI Brazilian Power Electronics Conference*, Sep. 2011, pp. 55–60.
- [15] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 3–14, Feb 2002.
- [16] E. S. L. Oliveira, M. L. Aguiar, and I. N. Silva, "Strategy to Control the Terminal Voltage of a SRG Based on the Excitation Voltage," *IEEE Latin America Transaction*, vol. 13, no. 4, pp. 975–981, 2015.
- [17] Y. Z. Liu, Z. Zhou, J. L. Song, B. J. Fan, and C. Wang, "Based on sliding mode variable structure of studying control for status switching of switched reluctance starter/generator," in *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2015, Nov 2015, pp. 934–939.
- [18] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, PA: SIAM Studies in Applied Mathematics, 1994.
- [19] T. A. Dos Santos Barros, P. J. Dos Santos Neto, M. V. De Paula, A. B. Moreira, P. S. Nascimento Filho, and E. Ruppert Filho, "Automatic characterization system of switched reluctance machines and nonlinear modeling by interpolation using smoothing splines," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 26 011–26 021, 2018.
- [20] F. P. Scalcon, R. P. Vieira, and H. A. Gründling, "Sliding mode speed control applied to the switched reluctance motor," in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct 2018, pp. 695–700.