# UTILIZAÇÃO DE UM CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL EM UM SISTEMA EÓLICO DISTRIBUÍDO BASEADO EM UM GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Pedro José dos Santos Neto<sup>\*</sup>, Tárcio André dos Santos Barros<sup>†</sup>, Marcelo Vinicius de Paula<sup>\*</sup>, Ernesto Ruppert Filho<sup>\*</sup>

\* Unicamp Faculdade de engenharia elétrica e de computação (FEEC) Campinas, São Paulo, Brasil

> <sup>†</sup>Unicamp Faculdade de engenharia mecânica (FEM) Campinas, São Paulo, Brasil

## Emails: pedrojsn@ieee.org, tarcio.andre@hotmail.com, mvpaula@outlook.com, ruppert@fee.unicamp.br

**Abstract**— This paper presents a proposal of utilization of a buck boost bidirectional DC-DC converter coupled to a voltage source converter (VSC) to integrate a switched reluctance generator to the three phase electrical grid, in a distributed wind energy conversion system. This bidirectional converter is employed to regulate the SRG excitation voltage in its optimum value, to ensure the balance between low electromagnetic torque ripple and high efficiency. The VSC is utilized to connect the SRG into the electrical grid, controlling the active and reactive power flux. The presented proposal employes the DC-DC converter to regulate the optimum voltage at the SRG side, while the VSC is responsible to maintain the DC bus voltage in a fixed value to allow the DC-AC conversion with the required level and frequency. Slide mode controller is applied to ensure the desired PWM duty cycle to the bidirectional DC-DC converter. The SRG control is done by direct power control by hysteresis of current, in low speeds, and by single pulse control, for high speeds of operation. Simulation results show that the proposal is applicable and that the applied slide mode controller has rapid an robust behavior, as desired.

Keywords— Switched reluctance generator, bidirectional DC-DC converter, wind distributed system, VSC.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma proposta de utilização de um conversor CC-CC bidirecional do tipo *buckboost* interligado a um conversor fonte de tensão (VSC) para integração de um gerador de relutância variável (GRV) à rede elétrica trifásica de baixa tensão, em um sistema eólico distribuído. Esse conversor bidirecional é utilizado para regular a tensão de excitação do GRV em seu valor ótimo, garantindo equilíbrio entre baixa ondulação de torque eletromagnético e alto rendimento. O VSC é utilizado para interligar o GRV à rede elétrica, controlando o fluxo de potências ativa e reativa. A proposta apresentada utiliza o conversor CC-CC para regular a tensão ótima do lado do GRV, enquanto o VSC é responsável por manter a tensão do barramento CC em um valor fixo de 400 V e garantir a conversão CC-CA na frequência e níveis desejados. O controlador por modos deslizantes é aplicado para garantir o ciclo de trabalho PWM desejado ao conversor CC-CC bidirecional. O controle do GRV é feito utilizando controle direto de potência (CDP) com acionamento por histerese de corrente, para baixas velocidades, e por pulso único, para altas velocidades. Os resultados de simulação mostram a validade da aplicação proposta e que o controlador por modos deslizantes aplicado tem desempenho rápido e robusto.

Palavras-chave — Gerador de relutância variável, Conversor CC-CC bidirecional, Sistema eólico distribuído, VSC.

### 1 Introdução

O gerador de relutância variável (GRV) é uma máquina de dupla saliência, com presença de enrolamento apenas no estator. O rotor é constituído de elemento ferromagnético, não apresenta imãs ou enrolamentos e opera pelo princípio da mínima relutância. Devido às suas características de robustez mecânica, alto desempenho em uma ampla faixa de velocidades e facilidade de manutenção e resfriamento, o GRV é indicado como um candidato viável para aplicações em sistemas eólicos (Torrey, 2002; Cardenas et al., 2005; Barros et al., 2017).

Para caracterizar o desempenho ótimo do GRV, consideram-se a alta eficiência e a baixa ondulação no torque eletromagnético. Essas características são dependentes dos ângulos de acionamento, da tensão de excitação da máquina e da velocidade do rotor (Kioskeridis and Mademlis, 2006; Narla et al., 2012; Nasirian et al., 2013). Por não haver expressão analítica relacionando essas variáveis, alguns trabalhos propõem técnicas de otimização para o GRV em sistemas eólicos (Dhifaoui et al., 2014; Barros et al., 2016; dos Santos Neto et al., 2018). Nesses casos, evidenciouse que a tensão de excitação é um parâmetro fundamental para o desempenho ótimo do GRV. Além disso, a proposta defendida por (Barros et al., 2017; dos Santos Neto et al., 2018) e seguida neste trabalho, aplica a técnica de controle direto de potência (CDP) para acionamento do GRV, considerando a operação por histerese de corrente, em baixas velocidades, e por pulso único, em altas velocidades de operação.

Para utilização do GRV conectado à rede elétrica convencional, têm-se as propostas apresentadas por (Cardenas et al., 2005; Viajante et al., 2016; Barros et al., 2017). Em todos esses casos a tensão de excitação do GRV é mantida fixa no valor do barramento CC controlado pelo conversor fonte de tensão CC-CA (VSC). Para atender as condições de operação ótima, este trabalho propõe o uso de um conversor CC-CC bidirecional do tipo buck-boost capaz de seguir a referência de tensão ótima do GRV em função da velocidade de operação e, simultaneamente, atender as condições de tensão fixa no barramento CC requerida pelo controle de tensão do VSC. Um controlador por modos deslizantes é utilizado para obter resposta rápida e robusta.

O sistema proposto, apresentado na Figura 1, foi implementado no ambiente *Matlab-Simulink* para testes e é composto dos seguintes elementos:

- GRV trifásico 12/8 (polos do estator/polos do rotor), 2 kW, 1500 rpm, faixa de operação 60-157 rad/s.
- Conversor em meia ponte assimétrica trifásico (AHB) para acionamento do GRV por controle direto de potência.
- Conversor CC-CC bidirecional do tipo *buck-boost* com controle de tensão e uso de controlador por modos deslizantes.
- VSC trifásico para com controle de tensão do barramento CC e controle do fluxo de potência ativa e reativa.

Detalhes da estratégia de CDP para acionamento do GRV e do controle do VSC reproduzidas neste trabalho podem ser consultadas em (Barros et al., 2017). Neste artigo, foca-se no projeto e controle do conversor CC-CC bidirecional, conforme será detalhado nas próximas seções. Os resultados apresentados aqui mostram a viabilidade da proposta, levando em consideração o benefício da operação ótima do GRV e o desempenho satisfatório do controle por modos deslizantes utilizado.

# 2 Operação do Gerador de Relutância variável

## 2.1 Princípio de operação

A máquina de relutância variável opera no modo de geração se as fases forem excitadas quando a indutância é decrescente, ou seja, quando  $dL/d\theta < 0$ . Ignorando a saturação, a dinâmica elétrica do GRV em uma fase é dada por:

$$V_{dc} = Ri + L\left(\theta\right)\frac{di}{dt} + e \tag{1}$$

em que  $V_{dc}$  é a tensão CC de excitação, R é a resistência do enrolamento, i é a corrente de fase,

 $L(\theta)$  é a indutância em função da posição angular  $\theta, e = i\omega\partial L/\partial\theta$  é a força contra eletromotriz e  $\omega$ é a velocidade rotacional.

## 2.2 Operação em sistemas eólicos

Quando a velocidade de vento está abaixo da velocidade nominal, a operação em velocidade variável é utilizada para aumentar a eficiência da geração. O perfil otimizado da potência produzida pelo gerador pode ser expresso por:

$$P_{otm} = k_{otm}\omega^3 \tag{2}$$

em que  $P_{otm}$  é a potência ótima requerida,  $k_{otm}$ é uma constante que depende da aerodinâmica da pá, dos parâmetros da turbina eólica e da caixa de engrenagem;  $\omega$  é a velocidade angular.

Em baixas e médias velocidades, a força contra eletromotriz é menor que a tensão de excitação do GRV e, assim, a corrente de fase decresce após a fase de excitação. Nesse caso, o acionamento por histerese de corrente pode ser utilizado. Em altas velocidades, a força contra eletromotriz se torna maior que a tensão de excitação. Nessa situação, deve-se operar por pulso único. Maiores detalhes sobre a estratégia de comutação entre esses dois modos de operação é apresentado em (Barros et al., 2017).

#### 2.3 Parâmetros ótimos

A potência gerada pelo GRV não pode ser expressa por uma função analítica por conta da característica chaveada e não linear da corrente elétrica produzida. Considerando simplificações, a potência média pode ser representada por:

$$P_{out} = \frac{N_s N_r V_{dc}^2}{w} \{ \int_{\theta_{on}}^{\theta} \frac{(\theta - \theta_{on})}{L(\theta)} d\theta + \int_{\theta_{on}}^{\theta} \frac{(\theta_{off} - \theta - \theta_{on})}{L(\theta)} d\theta \}$$
(3)

em que  $N_s$  and  $N_r$  são o número de polos do estar e do rotor, respectivamente,  $V_{dc}$  é a tensão de excitação do GRV,  $\theta$  é a posição angular do rotor, e w é a velocidade mecânica.

A potência produzida é diretamente influenciada pelos ângulos de acionamento, pela tensão de excitação e pela velocidade de operação. A escolha desses parâmetros afeta a eficiência do gerador e a ondulação de torque eletromagnético. Diferentes combinações de tensão de excitação e ângulos podem retornar a mesma potência de saída. Contudo, esses parâmetros escolhidos podem resultar em uma combinação com alta eficiência, porém com alta ondulação de torque eletromagnético, o que é prejudicial para o sistema eólico.

Uma proposta para encontrar os ângulos ótimos e a tensão de excitação ótima por meio de



Figura 1: Sistema eólico proposto com GRV, conversor AHB, conversor CC-CC bidirecional intermediário e VSC trifásico.

planejamento de experimentos computacionais e otimização multiobjetivo é apresentado em (dos Santos Neto et al., 2018). A metodologia desenvolvida pelos autores foi aplicada ao GRV estudado neste artigo. Como resultado, obtiveram-se os ângulos de acionamento e a tensão ótima em função da velocidade de operação do GRV. Para conexão à rede elétrica, faz-se necessário o uso de um conversor CC-CC bidirecional capaz de seguir a tensão ótima de referência em um lado do conversor, e permitir a tensão constante exigida no lado do VSC. A descrição do projeto e controle desse conversor é feita a seguir.

# 3 Projeto e parâmetros do conversor CC-CC bidirecional

O conversor proposto para realizar a integração entre o GRV e o VSC é o buck-boost bidirecional, mostrado na Figura 2. O controle de tensão do VSC, detalhado em (Barros et al., 2017) é responsável por manter a tensão do barramento CC constante no lado do VSC. Considerando uma rede trifásica 220 V, a tensão do barramento CC escolhida foi de 400 V. Os dados de tensão ótimos obtidos pelo planejamento de experimentos computacionais retorna uma faixa de valores entre 200-400 V, dependendo da velocidade de operação e do modo de acionamento do GRV (histerese de corrente ou pulso único). Assim, do ponto de vista do GRV, o conversor atua como um elevador de tensão. Do ponto de vista do VSC, o conversor deve atuar como um abaixador de tensão.

Da Figura 2, tem-se que os sinais de controle para as chaves S1 e S2 devem ser opostos. A modulação por largura de pulso (PWM) é adotada para acionamento das chaves do conversor CC-CC. Assumindo componentes ideais, as principais equações que governam esse conversor são dadas como segue.



Figura 2: Conversor CC-CC bidirecional do tipo *buck-boost*.

### 3.1 Relação de transferência

A relação de transferência de tensão do conversor bidirecional operando no modo *buck* e no modo *boost* são dadas, respectivamente, por:

$$\frac{V_{vsc}}{V_{dc}} = D \tag{4}$$

$$\frac{V_{dc}}{V_{vsc}} = \frac{1}{1-D} \tag{5}$$

em que  $V_{vsc}$  é a tensão mantida constante pelo conversor VSC,  $V_{dc}$  é a tensão de excitação aplicada ao conversor AHB e D é o ciclo de trabalho PWM do conversor bidirecional.

## 3.2 Ondulação de corrente no indutor

A ondulação de corrente no indutor do conversor bidirecional é dada por

$$\Delta i_{L_b} = \frac{V_{dc}}{L_b} DT_s \tag{6}$$

em que  $i_{L_b}$  é a corrente elétrica no indutor e  $T_s$  é o período de chaveamento na operação PWM.

Considerando uma operação no modo de condução contínua (MCC), tem-se que projetar o indutor de forma que

$$L_b > \frac{2V_{dc}D^2T_s}{I_{L_b\max}} \tag{7}$$

na qual  $I_{L_b \max}$  é a máxima corrente que circula no indutor.

Para determinação dos esforços nos componentes do conversor apresentado, tem-se que:

$$V_{S1} = V_{S2} = V_{dc} + V_{vsc}$$
(8)

em que  $V_{S1}$  e  $V_{S2}$  são as tensões nas chaves de potência e diodos S1 e S2, respectivamente.

### 3.4 Ondulação de pico a pico da tensão de saída

O *ripple* de tensão no lado do GRV é determinado pela escolha do capacitor  $C_1$  da seguinte forma:

$$\Delta V_{dc} = \frac{V_{dc}DTs}{R_{dc}C_1} \tag{9}$$

em que  $R_{dc}$  é a resistência equivalente do circuito.

Considerando as equações apresentadas, a Tabela 1 apresenta os parâmetros do conversor bidirecional *buck-boost* projetado neste trabalho.

Tabela 1: Parâmetros do conversor bidirecional

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$L_b$	2 mH	$\int f_{ch}$	$30 \mathrm{~kHz}$
$C_1$	2,2 mF	$ $ $C_2$	$4 \mathrm{mF}$
$V_{dc}$	200-400 V	$ $ $V_{vsc}$	400 V

Para que seja possível um chaveamento em alta frequência e considerando a faixa de tensão trabalhada, as chaves de potência do tipo MOS-FET foram escolhidas.

#### 4 Controlador por modos deslizantes

O princípio de funcionamento do controlador por modos deslizantes aplicado neste trabalho é detalhado em (Lascu et al., 2004). A ideia principal do método é conduzir o estado do sistema da condição inicial para o estado desejado através de uma superfície de chaveamento. As principais características desse controlador são a robustez e a velocidade de resposta.



Figura 3: Diagrama do controlador por modos deslizantes.

O objetivo do controlador mostrado na Figura 3 é controlar a tensão do lado do GRV do conversor CC-CC bidirecional. A tensão de referência  $V_{ref}$ , em função da velocidade de operação, foi obtida através da otimização do desempenho do GRV utilizando planejamento de experimentos computacionais (dos Santos Neto et al., 2018). A expressão do erro de tensão é dada por:

$$e_V = V_{ref} - V_{dc} \tag{10}$$

O conjunto  $\xi$  da superfície de chaveamento é definido como:

$$\xi = e_V + k_d \frac{de_V}{dt} \tag{11}$$

sendo que  $k_d$  é uma constante definida de acordo com a resposta desejada.

O controlador foi projetado de forma a encontrar o ciclo de trabalho D para o acionamento por PWM. A lei de controle que reproduz esse comportamento é dada por:

$$D = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) eval\left(\xi\right) \tag{12}$$

em que  $k_p$  e  $k_i$  são os ganhos de um controlador PI e a função *eval* é responsável por determinar a reação do sistema em função da posição do estado no espaço de estados.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a configuração da função eval como um ganho linear com saturação, assumindo a forma:

$$eval(S_1) = \begin{cases} \xi k_e, & \text{se } l_{\min} < \xi k_e < l_{\max} \\ l_{\max}, & \text{se } \xi k_e > l_{\max} \\ l_{\min}, & \text{se } \xi k_e < l_{\min} \end{cases}$$
(13)

em que  $k_e$  é um ganho de ajuste de projeto e  $l_{max}$ e  $l_{min}$  são os valores máximos e mínimos de saturação, respectivamente.

Os parâmetros do controlador por modos deslizantes utilizados são explicitados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do controlador por modos deslizantes

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$k_d$	0,1	$k_p$	0,02
$k_i$	0,035	$k_e$	20
$l_{max}$	+15	$l_{min}$	-15

#### 5 Resultados e discussão

O sistema mostrado na Figura 1 foi implementado no *software Matlab-Simulink*. A simulação foi discretizada com frequência de amostragem de 30 kHz. Utilizou-se um perfil de velocidade em rampa para simular o comportamento do sistema em toda faixa de operação (60-157 rad/s). O resultado obtido para a potência gerada pelo GRV é mostrado na Figura 4.

O GRV trabalha auto-excitado. O CDP começa a atuar no instante  $t_i = 2 \ s$ . Esse tempo é necessário para realização da pré-carga do capacitor  $C_2$  do lado do VSC e, em sequência, do capacitor  $C_1$  da ponte AHB. A comutação entre as operações por histerese de corrente e por pulso único é realizada nos instantes  $t_p e t_h$  ao se atingir a velocidade base de 100 rad/s. Pelos detalhes dados na Figura 4, observa-se que a comutação é feita de forma suave. O erro máximo entre a potência de referência e a potência gerada foi de cerca de 3%.



Figura 4: Comparação entre a potência gerada e a potência de referência para a simulação em rampa.

O perfil das correntes elétricas geradas pelo GRV, em cada uma das três fases, é mostrada na Figura 5. O fluxo de corrente é iniciado em  $t_i$  para uma velocidade de 60 rad/s e operação por histerese de corrente. O controle por pulso único, por sua vez, atua até a velocidade nominal de 157 rad/s. O formato da corrente em cada modo de operação é apresentado nos detalhes da Figura 5.



Figura 5: Perfil das correntes elétricas gerada pelo GRV.

A tensão  $V_{dc}$  controlada pelo conversor buckboost bidirecional é mostrada na Figura 6. Notase que a tensão produzida segue adequadamente a de referência proveniente do processo de otimização por planejamento de experimentos computacionais, com erro máximo de 1,8%. Até o instante  $t_i$ , tem-se a pré-carga dos capacitores do conversor CC-CC. Nos instantes de comutação  $t_p$  e  $t_h$ ocorre uma mudança acentuada do nível tensão. Ainda assim, o controlador por modos deslizantes projetado teve robustez e eficiência para seguir a referência desejada. Conforme mencionado, a operação do GRV na tensão ótima permite o balanço adequado entre alta eficiência e baixa ondulação de torque eletromagnético.



Figura 6: Tensão elétrica do lado do GRV.

Um importante aspecto a ser analisado é como a variação de tensão do lado do GRV afeta a estabilidade do barramento CC controlado pelo VSC. Essa análise é detalhada na Figura 7. A pré-carga do barramento CC é realizada até instante  $t_{pc}$  e, a partir desse momento, a tensão dejada de 400 V é atingida. Observa-se que no momento do início da injeção de potência ativa  $(t_i)$  o barramento CC não é perturbado. Pequenas perturbações de cerca de 1% da tensão nominal ocorrem nos instantes de comutação  $t_p$  e  $t_h$ , sendo consideradas desprezíveis. Pode-se concluir que a tensão do barramento CC se mantém estável com a atuação adequada do conversor buck-boost.



Figura 7: Tensão elétrica do lado do VSC.

A corrente elétrica injetada e a tensão na rede elétrica , quando se atinge a potência nominal (2 kW), são apresentadas na Figura 8. Para os testes realizados, não há circulação de potência de reativa. Portanto, evidencia-se a operação com fator de potência unitário. A distorção harmônica total (DHT) encontrada foi de 2,8%. Percebe-se, assim, que o VSC atua de maneira satisfatória, regulando a tensão do barramento CC e sintetizando a corrente elétrica de maneira desejada.



Figura 8: Tensão da rede elétrica e corrente elétrica injetada.

#### 6 Conclusões

Um proposta de utilização de um conversor CC-CC bidirecional em um sistema eólico com GRV foi apresentada neste trabalho. Apresentaram-se as características de projeto do conversor *buckboost* bidirecional e a estratégia de controle por modos deslizantes adotada. Os resultados de simulação demonstram que, com a inserção do conversor CC-CC, o CDP atua de forma satisfatória, garantindo o rastreamento de máxima potência e a comutação suave entre a operação por histerese de corrente e por pulso único. O controlador por modos deslizantes teve atuação rápida e robusta, permitindo a regulação de tensão do lado do GRV.

Evidenciou-se ainda que, seguindo a metodologia de projeto adequada, a tensão do barramento CC não é afetada significativamente pela a operação do conversor CC-CC. Com isso, verificou-se que o VSC consegue sintetizar a corrente elétrica CA injetada na rede elétrica com níveis e qualidade de energia adequados. Um *setup* para verificação experimental da metodologia apresentada encontra-se em fase de desenvolvimento.

#### Agradecimentos

Processos n° 2016/08645-9, 2017/21087-8, 2017/21640-9 Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

### Referências

Barros, T. A. S., dos Santos Neto, P. J., Nascimento Filho, P. S., Moreira, A. B. and Ruppert Filho, E. (2016). Approach for performance optimization of switched reluctance generator in variable-speed wind generation system, *Renewable Energy* 97: 114–128.

- Barros, T. A. S., dos Santos Neto, P. J., Nascimento Filho, P. S., Moreira, A. B. and Ruppert Filho, E. (2017). An Approach for Switched Reluctance Generator in a Wind Generation System With a Wide Range of Operation Speed, *IEEE Transactions on Power Electronics* **32**(11): 8277–8292.
- Cardenas, R., Pena, R., Perez, M., Clare, J., Asher, G. and Wheeler, P. (2005). Control of a Switched Reluctance Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20(4): 781–791.
- Dhifaoui, R., Liouane, N. and Yahia, H. (2014). Differential evolution method-based output power optimisation of switched reluctance generator for wind turbine applications, *IET Renewable Power Generation* 8(7): 795–806.
- dos Santos Neto, P. J., Barros, T. A. S., de Paula, M. V., de Souza, R. R. and Ruppert Filho, E. (2018). Design of Computational Experiment for Performance Optimization of Switched Reluctance Generator in Wind Systems, *IEEE Transactions on Energy Conver*sion **33**(1): 406–419.
- Kioskeridis, I. and Mademlis, C. (2006). Optimal efficiency control of switched reluctance generators, *IEEE Transactions on Power Elec*tronics **21**(4): 1062–1072.
- Lascu, C., Boldea, I. and Blaabjerg, F. (2004). Direct torque control of sensorless induction motor drives: a sliding-mode approach, *IEEE Transactions on Industry Applications* 40(2): 582–590.
- Narla, S., Sozer, Y. and Husain, I. (2012). Switched Reluctance Generator Controls for Optimal Power Generation and Battery Charging, *IEEE Transactions on Industry Appli*cations 48(5): 1452–1459.
- Nasirian, V., Kaboli, S. and Davoudi, A. (2013). Output power maximization and optimal symmetric freewheeling excitation for switched reluctance generators, *IEEE Transactions on Industry Applications* **49**(3): 1031– 1042.
- Torrey, D. A. (2002). Switched reluctance generators and their control, *IEEE Transactions* on *Industrial Electronics* **49**(1): 3–14.
- Viajante, G., Andrade, D., Chaves, E., Bernadelli, V., Queiroz, C., Freitas, M., Santos, J. and Gomes, L. (2016). A grid connection scheme of a switched reluctance generator for active power injection using P-resonant (P-RES) controller, *Electric Power Systems Research* 141: 572–579.