



CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA EM UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE CONTROLE VETORIAL POR ORIENTAÇÃO DO FLUXO DE ESTATOR

Rômulo Lemos Bulhões¹, Eudemario Souza de Santana²

^{1,2} SENAI Cimatec

E-mails: romulo.bulhoes@fieb.org.br, eudemario.santana@fieb.org.br

RESUMO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou através da resolução 482 de 2012 as regras básicas para a geração distribuída (ou seja, o consumidor agora pode emprestar energia para a concessionária) e um dos requisitos desta nova regra é que a fonte primária de energia seja renovável ou que se utilizem fontes com base em cogeração qualificada. Nestas condições, acredita-se que a geração eólica e solar sejam as mais promissoras nos próximos anos. Especificamente no caso da energia eólica, tem-se o desafio de trabalhar com velocidade mecânica variável do eixo do gerador, dadas as condições aleatórias dos ventos, tanto em direção, quanto de potência. No presente trabalho, são apresentados resultados de simulação do controle de potência reativa do estator em um gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) em diferentes situações, utilizando a técnica de controle vetorial por orientação do fluxo de estator, o que permite a manipulação independente das potências reativa e ativa através das correntes rotóricas de eixo direto e em quadratura.

1. INTRODUÇÃO

Os GIDA são geradores com velocidade rotórica variável capazes de fornecer potência à rede elétrica à tensão e frequência constantes. A geração à velocidade variável possui algumas vantagens em relação à geração à velocidade fixa, como um melhor aproveitamento energético [1], redução do estresse mecânico da turbina e dos ruídos produzidos por esta [1], [2], diminuição das pulsações elétricas (*flicker*) e de torque, e aumento da qualidade de energia fornecida à rede [2].

Uma forma de se implantar um gerador à velocidade variável é conectar os terminais do enrolamento de estator à rede através do conversor de frequência. Esta forma de conexão possui algumas desvantagens em relação ao GIDA quanto ao uso de conversores eletrônicos de potência, pois neste último caso a potência do inversor e do seu filtro é da ordem de 1 p.u., o que torna o sistema mais caro e, no caso dos filtros, mais difícil de ser projetado. Além disso, a eficiência total torna-se comprometida, pois há perdas adicionais nos conversores eletrônicos [2], [3].

Os GIDA são amplamente utilizados em turbinas eólicas de grande porte [4] e, além das vantagens de custos reduzidos com os inversores e filtros e de uma melhor eficiência energética, o controle do fator de potência pode ser feito de uma forma relativamente barata, operando de forma similar a um gerador síncrono [2], [5]. Isso porque, em condições de baixo escorregamento, uma fração da potência total do GIDA flui através dos enrolamentos de rotor.

O controle de velocidade de eixo das turbinas eólicas é tradicionalmente baseado no controle vetorial por orientação de fluxo do estator, pois esta técnica possibilita o desacoplamento da corrente do rotor do GIDA em componentes de potência ativa e reativa. Com o controle de velocidade do eixo do rotor do GIDA, pode-se controlar a velocidade de giro da turbina, através da utilização de um controlador de corrente [6]. Contudo, tal controlador precisa ser cuidadosamente sintonizado para garantir estabilidade do sistema e resposta adequada dentro de todo range de operação [7]. Esse trabalho, entretanto, ficou restrito ao controle do fator de potência.

2. SISTEMA TURBINA-GERADOR

O gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) interligado à turbina eólica é mostrado na Figura 9 1.

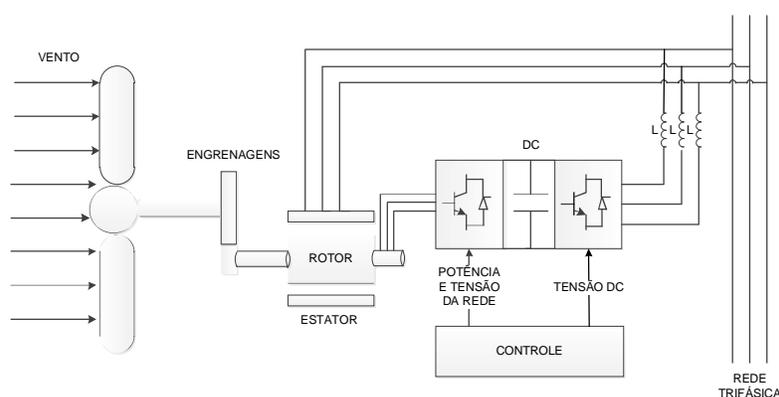


Figura 9: GIDA interligado à rede elétrica
Fonte: Própria, baseado de [8].

Percebe-se que o eixo do rotor é interligado ao eixo da turbina através da caixa de engrenagens, nesse caso.

O circuito do rotor é conectado com a rede elétrica através do uso de um conversor PWM bidirecional, também conhecido como conversor *back-to-back* na literatura [6], [7], [9]–[15]. Tal equipamento é composto pelo conversor ao lado da máquina (CLM), conversor ao lado da rede (CLR) e um barramento CC, que interliga os dois.

A tensão do barramento CC é controlado por meio do CLR, enquanto que a potência na saída da turbina e a tensão nos terminais do estator são feitos através do CLM [1].

Os indutores na saída do CLR servem como filtros para atenuação dos “ripples” de corrente alternada, reduzindo-se com isso as distorções harmônicas provocadas na rede

elétrica. Como outra solução para mitigação desse problema, poder-se-ia utilizar, como exemplo, um filtro LCL [3].

O modelo escolhido para o sistema de eixos da turbina eólica (entenda-se, todo o conjunto) foi um modelo de eixos rígidos, conforme apresentado na Figura 10 2.

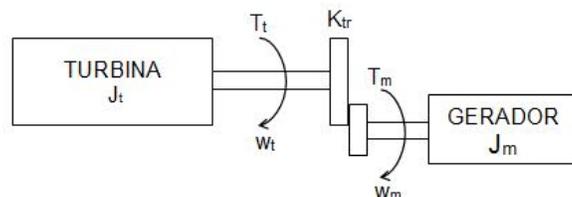


Figura 10: Conjunto turbina-gerador
Fonte: Própria, baseado de [3].

O movimento do eixo do gerador é representado por:

$$J_m \cdot \frac{d}{dt} w_m = \frac{T_{eixo}}{K_{tr}} + T_{em} \quad (1)$$

3. CONTROLE POR ORIENTAÇÃO DO FLUXO DE ESTATOR

As equações das potências ativa e reativa do estator sob orientação do fluxo de estator, são apresentadas segundo [16] e [17].

$$P_s = 3 \left(r_s [(i_{sq})^2 + (i_{sd})^2] - w_1 \frac{L_m}{L_s} \psi_s i_{rq} + i_{sd} \frac{d}{dt} \psi_s \right) \quad (2)$$

$$Q_s = 3 \left(w_1 \frac{(\psi_s)^2}{L_s} - w_1 \frac{L_m}{L_s} \psi_s i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \frac{d}{dt} \psi_s \right) \quad (3)$$

Em regime permanente $\left(\frac{d\psi_s}{dt} = 0 \right)$ e considerando a resistência desprezível $r_s \cong 0$, obtém-se:

$$P_s = -3 \frac{L_m}{L_s} V_s I_{rq} \quad (4)$$

$$Q_s = 3 \frac{L_m}{L_s} V_s \left(\frac{V_s}{w_1 L_m} - I_{rd} \right) \quad (5)$$

Percebe-se, com isso, que se podem controlar as potências ativa e reativa, de forma desacoplada, sendo a primeira dependente apenas da corrente de eixo em quadratura rotor (I_{rq}) e a segunda da corrente de eixo direto do rotor (I_{rd}), pois as outras variáveis são constantes, considerando um barramento infinito da rede elétrica.



O torque eletromecânico apresentado sob orientação do fluxo do estator é dado por:

$$T_{em} = -3 \frac{P}{4} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{V_s}{\omega_1} \cdot I_{rq} \quad (6)$$

A equação (6) é útil na interpretação dos resultados relacionados à velocidade mecânica do rotor que são apresentados na seção 5.

4. METODOLOGIA

Este trabalho dispõe-se a analisar a eficácia do controle vetorial por orientação do fluxo de estator, aplicado a um gerador de indução duplamente alimentado, para a realização do controle de potência reativa deste. O GIDA, quando utilizado em uma turbina eólica, está sujeito a diferentes tipos de variações e de comportamento da potência de eixo do rotor, dadas as condições aleatórias do vento. Para representar algumas possibilidades, foram escolhidos três cenários passíveis de acontecimento, enumerados a seguir:

1. Potência de eixo constante com fator de potência 0,92 indutivo e, após certo instante, fator de potência 0,92 capacitivo.
2. Potência decrescente de eixo durante certo tempo e, após 20 segundos, constante, com fatores de potência (a) 0,92 Capacitivo, (b) 0,92 Indutivo e (c) Unitário.
3. Mudança abrupta da potência de eixo, com fator de potência 0,92 indutivo.

Ou seja, duas variáveis foram escolhidas para a manipulação e obtenção dos diferentes tipos de resultados: a potência aplicada no eixo do rotor do GIDA e o fator de potência, que é o *set-point* da malha de controle. Considerou-se também que a rede elétrica é representada por um barramento infinito, cujas tensões trifásicas encontram-se balanceadas e com valores eficazes constantes.

Foi escolhido como *software* de simulação o *toolbox* Simulink, pertencente ao programa Matlab, cuja versão utilizada foi a 2013a. O tempo de simulação escolhido para cada situação foi de quarenta (40) segundos. Normalmente, as mudanças de uma das variáveis (potência de eixo e fator de potência) ocorreram na metade desse período, exceto na última situação, em que a variação da potência de eixo aconteceu no intervalo de 19 a 21 segundos.

Como condição inicial, para a simulação das condições propostas, foi ajustado no programa uma velocidade de 1800 rpm para o rotor do gerador. É importante salientar que o período de acionamento do GIDA, que ocorre em torno de 1 segundo, não foi objeto de estudo deste trabalho.

Foi utilizado um controlador proporcional-integral para a realização do controle de potência reativa e os dados do motor empregado estão descritos no apêndice A.

O esquemático completo das etapas envolvidas para a realização da simulação é mostrado na Figura 93.

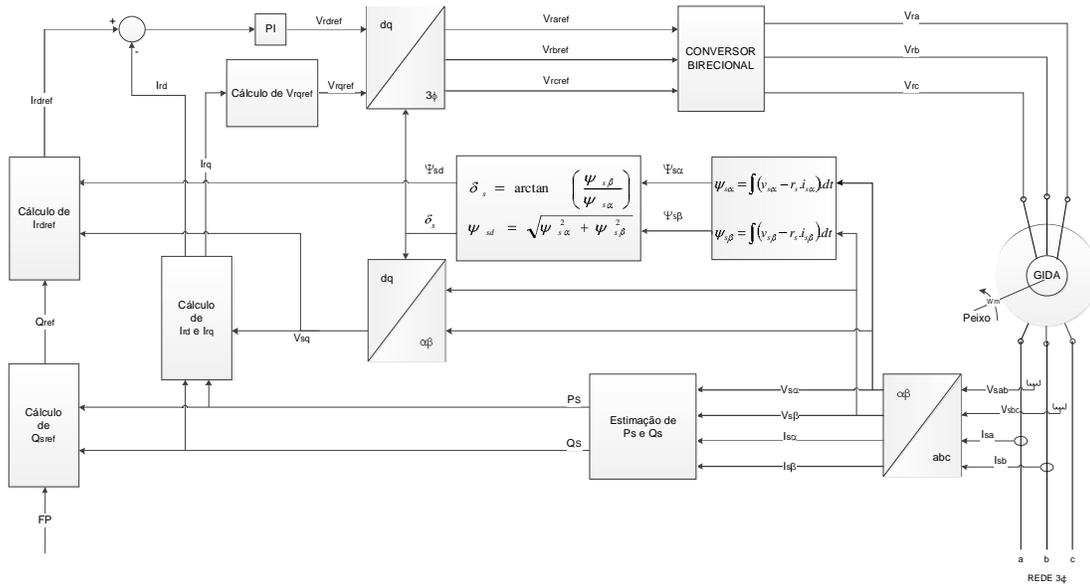


Figura 11: Esquemático completo do controle de potência reativa do estator
 Fonte: Própria, baseado de [17]

O *set-point* do controlador é a corrente de eixo direto do rotor, que é definido através da potência reativa de referência, que por sua vez é determinada pela potência ativa do estator e pelo fator de potência escolhido.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Potência de eixo constante com fator de potência 0,92 indutivo e, após certo instante, fator de potência 0,92 capacitivo.

A potência de eixo utilizada foi de 2 kW. Inicialmente, o fator de potência é de 0,92 indutivo e após 20 segundos torna-se 0,92 capacitivo. A Figura 4 mostra a potência de eixo aplicada e a velocidade rotórica.

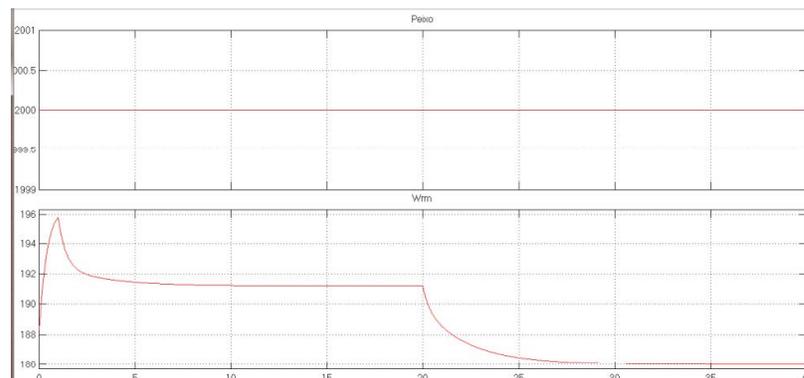


Figura 12: Potência de eixo x velocidade de giro do rotor

Percebe-se que há uma diminuição da velocidade rotórica quando o fator de potência muda de indutivo para capacitivo. Isso ocorre pois há um leve aumento da corrente de eixo em quadratura, conforme mostra a Figura 7, provocando uma diminuição no torque eletromagnético (ver equação (6)) e, conseqüentemente, na velocidade de giro do rotor (ver equação (1)).

A Figura 5 mostra o controle do fator de potência reativa. O valor em azul representa o *set-point* e o traço em vermelho, o valor produzido pela máquina.

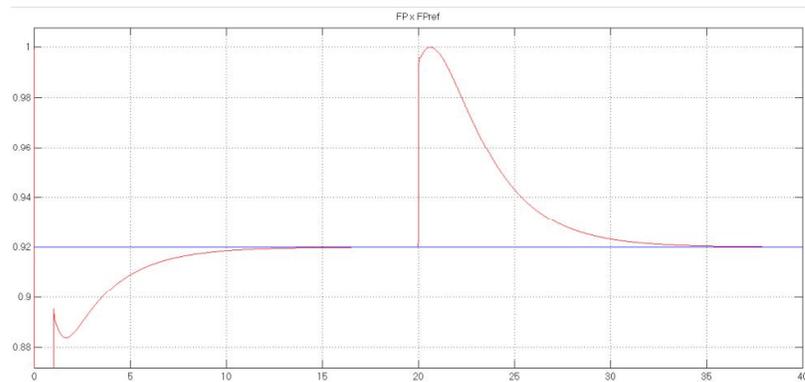


Figura 13: Controle do Fator de Potência – Potência constante de eixo

Para a condição proposta, não é possível que a alteração do fator de potência de 0,92 indutivo para 0,92 capacitivo ocorra sem que antes o fator de potência seja unitário.

O princípio utilizado para realizar o controle da potência reativa é a existência de uma relação aproximadamente linear entre esta e a corrente de eixo diretor, o que pode ser identificado implicitamente nos gráficos mostrados na Figura 6, estando de acordo com a equação (5).

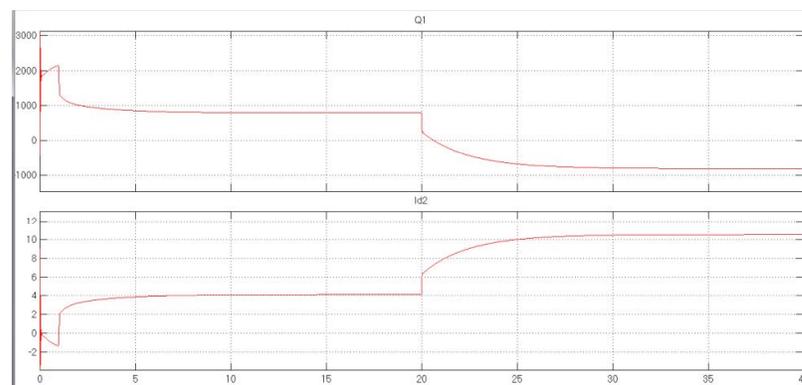


Figura 14: Potência Reativa x Corrente de eixo direto do rotor – Potência constante de eixo

A Figura 7 mostra o comportamento da potência ativa *versus* a corrente de eixo em quadratura do rotor. Nota-se que existe uma relação praticamente linear entre

potência ativa do estator e a corrente de eixo em quadratura do rotor, corroborando a equação (4). O resultado é análogo ao da Figura 6, mostrando um controle desacoplado entre as potências ativa e reativa.

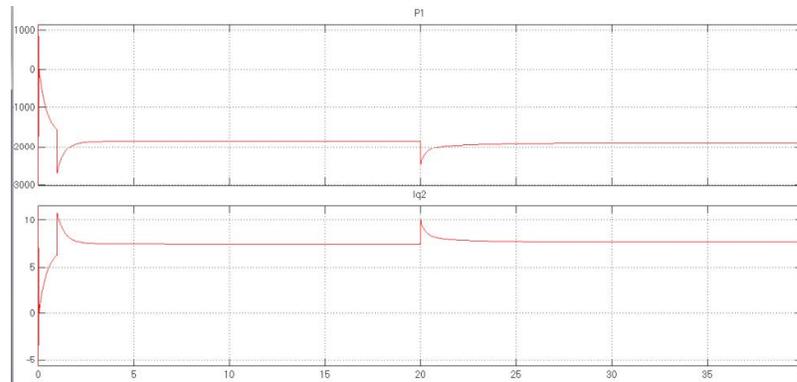


Figura 15: Potência Ativa x Corrente de eixo em quadratura do rotor – Potência constante de eixo

5.2. Potência de eixo decrescente durante certo tempo e, após 20 segundos, constante, com fatores de potência (a) 0,92 Capacitivo, (b) 0,92 Indutivo e (c) Unitário.

A potência de eixo aplicada foi a mesma nas situações (a), (b) e (c).

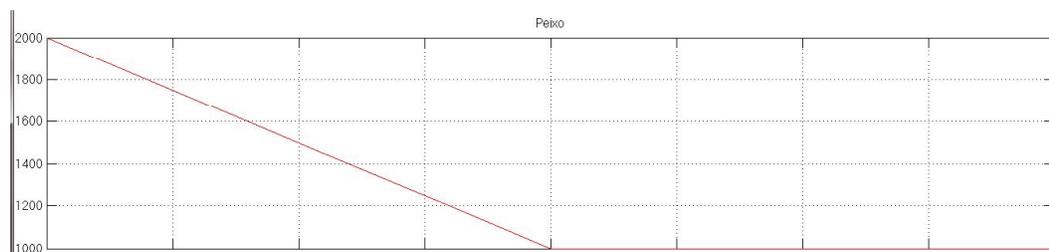


Figura 16: Potência de eixo aplicada.

A Figura 9 mostra o controle do fator de potência para as situações 5.2(a), 5.2(b) e 5.2(c). Percebe-se que os valores convergem para os seus *set-points*, mostrando um controle adequado para os três cenários simulados.

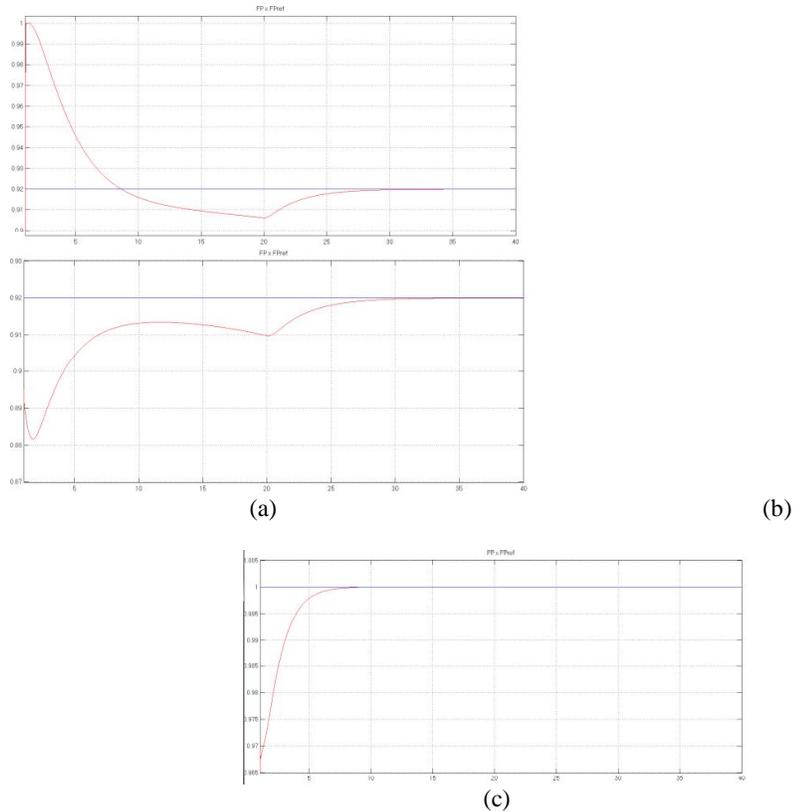


Figura 17: Controle do Fator de Potência – *Set-Point*: (a) 0,92 Capacitivo; (b) 0,92 Indutivo; (c) Unitário.

5.3. Mudança abrupta da potência de eixo aplicada, com fator de potência 0,92 indutivo.

A mudança abrupta da potência de eixo é aplicada a partir dos 19 segundos e finaliza após os 21 segundos. A Figura 10 apresenta a potência de eixo aplicada e a velocidade de giro do rotor.

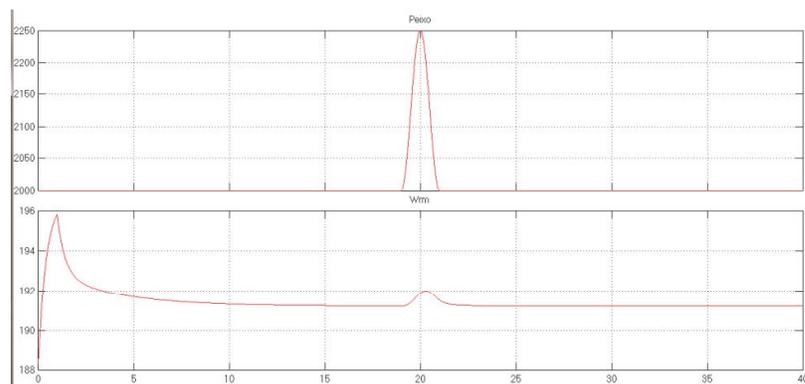


Figura 18: Potência de eixo *versus* Velocidade rotórica

Por último, a Figura 19 11 apresenta o controle do fator de potência para este cenário.

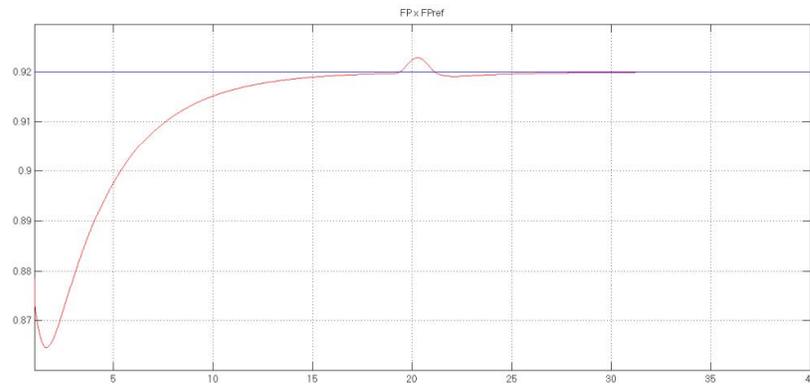


Figura 19: Mudança abrupta de potência – Set-point: 0,92 Indutivo

A mudança abrupta da potência de eixo aplicada ao rotor provocou uma pequena variação no fator de potência produzido pelo GIDA, menor do que 1%, provando a robustez da malha de controle.

4. CONCLUSÃO

O controle do GIDA empregando a orientação de fluxo de estator foi investigado e, como mostrado em literatura, funcionou adequadamente para possibilitar o controle independente das potências ativa e reativa. Os gráficos mostrados evidenciaram que o fator de potência foi adequadamente controlado em regime permanente nos diversos cenários estudados. Deve-se salientar, contudo, que os sistemas de controle de fator de potência são pensados de forma que não desestabilizem o sistema de geração devido aos transitórios de mudança do fator de potência de referência ou da intensidade do vento, sendo necessário impelir a potência reativa ao valor de referência durante o estado estacionário.

Durante as variações, em especial no caso 5.2 mostrado na seção 5, o fator de potência divergiu temporariamente do valor de referência (apenas durante os transitórios), sendo necessário avaliar outros valores de ganhos do controlador PI ou mesmo o emprego de outro tipo de controlador que melhore o desempenho dinâmico do sistema de geração.

REFERÊNCIAS

- [1] X.-J. Yao, S. Liu, X.-D. Wang, C.-C. Guo, Z.-X. Xing, and H.-L. Jiang, "Doubly-fed induction generator control for variable-speed wind power generation system," *2009 Int. Conf. Mechatronics Autom.*, pp. 855–859, Aug. 2009.
- [2] S. MÜLLER, M. DEICKE, and R. W., "Doubly Fed Induction Generator Systems," *IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE*, 2002.

- 
- [3] K. F. da Silva, “Controle e integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados.,” Universidade de São Paulo, 2006.
- [4] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2nd ed. Wiley, 2011, p. 788.
- [5] M. M. Pereira, “Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante,” Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- [6] D. Zhi and L. Xu, “Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance,” *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 22, 2007.
- [7] L. Xu and P. Cartwright, “Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation,” *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 2006.
- [8] “SimPowerSystems For Use with Simulink.” 2003.
- [9] M. B. de C. Salles, “Modelagem e Análises de Geradores Eólicos de Velocidade Variável Conectados em Sistemas de Energia Elétrica,” Universidade de São Paulo, 2009.
- [10] E. Tremblay, S. Atayde, A. Chandra, and S. Member, “Comparative Study of Control Strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems : A DSP-Based Implementation Approach,” vol. 2, no. 3, pp. 288–299, 2011.
- [11] H. Voltolini, “Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com Aplicação em Sistemas Eólicos,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [12] D. Plants and M. Kayıkç, “Reactive Power Control Strategies for,” vol. 22, no. 2, pp. 389–396, 2007.
- [13] J. L. da Silva, “Estratégia de Controle e Supervisão de um Gerador de Indução Duplamente Excitado para Turbinas Eólicas,” 2009.
- [14] A. Tapia, G. Tapia, J. J. Ostolaza, and R. Sáenz, “Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator,” *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 18, 2003.
- [15] S. Y. Liu, “Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [16] E. Bim, *Máquinas Elétricas e Acionamento.*, 2nd ed. Rio de Janeiro: Campus: Elsevier, 2012.

- [17] H. H. de A. Segnini, “Controle do Fluxo de Potência da Máquina de Indução Duplamente Alimentada,” Universidade Estadual de Campinas, 2006.

APÊNDICE A- Parâmetros do Gerador de Indução

Tensão nominal de estator	$V_n = 220 (\Delta) = 127 (Y)$
Corrente nominal de estator	$I_n = 9A$
Resistência de estator	$r_s = 0,7\Omega (Y)$
Resistência de rotor referida ao estator	$r_r = 1\Omega$
Indutância de dispersão de estator	$L_{l1} = 5,21 \text{ mH}$
Indutância de dispersão de rotor referida ao estator	$L_{l2}' = 5,21 \text{ mH}$
Indutância de magnetização	$L_m = 65,45 \text{ mH}$
Frequência nominal de estator	$f_1 = 60 \text{ Hz}$
Potência nominal de estator	$P_n = 2,24 \text{ kW}$
Velocidade mecânica nominal	$\omega_n = 176 \text{ rad/s} = 1680 \text{ rpm}$
Torque nominal	$T_n = 12,73 \text{ Nm}$
Escorregamento nominal	$s_n = 0,067$
Fator de potência nominal	$FP_n = 0,8$
Constante de inércia	$J = 0,05 \text{ kgm}^2$
Potência de perdas rotacionais	$P_r = 65,37 \text{ W}$
Torque de perdas rotacionais	$T_r = 0,35 \text{ Nm}$

Fonte: [17].