

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE UM DFIG CONECTADO EM REDE FRACA

JEAN PATRICK PRIGOL*, JEAN PATRIC DA COSTA*, EMERSON GIOVANI CARATI*, RAFAEL CARDOSO*, CARLOS MARCELO DE OLIVEIRA STEIN*

*UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco
Pato Branco, PR, Brasil

Emails: jeanprigol@gmail.com, jeanpatric@gmail.com, emerson@utfpr.edu.br, rcardoso@utfpr.edu.br, cmstein@utfpr.edu.br

Abstract— This work demonstrates the contribution to the study of a doubly fed induction generator (DFIG) in wind power system small operating in support voltage control, seeking to improve the quality of power at the connection point of a weak network. To the extent that wind generators are connected to the electric power system, the power injection can cause an imbalance in the frequency and voltage at the connection point, so this work seeks to demonstrate the behavior the voltage at the connection point.

Keywords— Control, voltage, power quality, DFIG.

Resumo— Este trabalho demonstra a contribuição ao estudo de um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) em sistema eólico de pequeno porte operando no suporte ao controle de tensão, buscando melhorar a qualidade de energia no ponto de conexão de uma rede fraca. Na medida que geradores eólicos são conectados ao sistema elétrico de potência, a injeção de potência pode causar um desequilíbrio da frequência e tensão no ponto de conexão, desta maneira este trabalho busca demonstrar o comportamento da tensão no ponto de conexão.

Palavras-chave— Controle, tensão, qualidade de energia, DFIG.

1 Introdução

A crescente demanda por energia elétrica e a preocupação ambiental, impulsionam a expansão da produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis de geração. A energia eólica recebe constantes investimentos e o Brasil em 2015, teve o maior acréscimo da capacidade instalada da América latina, foram 2,754 GW adicionados na matriz energética brasileira. Isto mantém o país figurando entre os dez países com maior capacidade instalada no mundo (GWEC, 2016).

A alta inserção de fontes renováveis, principalmente geração eólica, trazem algumas desvantagens nos parâmetros elétricos afetando a qualidade do sistema de energia, desta maneira é necessário verificar os impactos e corrigir ou limitá-los por meio dos controladores utilizados. Variações na tensão e frequência são os principais efeitos negativos decorrentes desta inserção (Zhao et al., 2015).

Este artigo realiza uma análise do gerador DFIG em sistemas eólicos, desde o equacionamento matemático até sua atuação em serviços ancilares considerando um cenário rural caracterizando uma rede de distribuição fraca. O objetivo deste artigo é apresentar a análise teórica e a validação por simulação dos resultados obtidos.

Grande parte dos trabalhos relacionados ao DFIG, apontam para a implementação apenas do conversor do lado do rotor e toda a estratégia de controle é focada neste conversor. A proposta deste trabalho é inserir um conversor *back-to-back* onde segundo Datta e Ranganathan (1999) o definem como sendo dois conversores um do lado do

rotor (RSC) e o outro do lado da rede (GSC) com um barramento CC comum, observável na Figura 1. Sua utilização permite a integração total do sistema, possibilitando a análise desde o modo sub síncrono até o sobre síncrono em períodos de vento forte e fraco objetivando comparar as diferenças de operação.

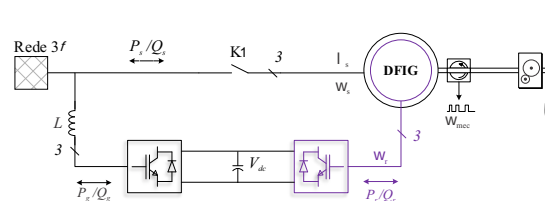


Figura 1: Estrutura básica do DFIG.

Alguns autores mostram as possibilidades das estratégias de controle utilizadas no funcionamento do DFIG situados em fazendas eólicas, estas análises permitem evidenciar maneiras de controlar a máquina conectada em sistema de geração distribuída em baixa tensão, observe:

- Utilizando controladores PI, Ko et al. (2007) propõem controlar a tensão no ponto de conexão (PC) de um DFIG em um local remoto, atuando sobre o conversor *back-to-back* de maneira a modificar as potências tanto do GSC quanto do RSC.
- O algoritmo proposto por Naidu e Singh (2014) compara a tensão no PC com o seu valor de referência e atua no GSC alterando a corrente de referência do eixo em quadratura,

de forma a controlar os reativos trocados entre o conversor e a rede, contribuindo para a regulação da tensão.

Existindo várias possibilidades para contribuir com a regulação de tensão e frequência no PC, este artigo irá analisar e apresentar a variação de tensão no PC, em um cenário de uma rede fraca em baixa tensão através de simulação.

2 Modelo do DFIG

O equacionamento matemático é de fundamental importância para o estudo do DFIG e a transformação de *Park*, permite eliminar equações oscilantes no tempo. Esta transformação pode ser aplicada nas equações da máquina tanto para variáveis do estator quanto do rotor, porém é mais conveniente utilizar transformações distintas (Krause et al., 2002).

Dada a equação,

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc_s} \quad (1)$$

onde

$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (2)$$

$$(\mathbf{f}_{abc_s})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (3)$$

$\mathbf{K}_s =$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (5)$$

a velocidade angular ω e o deslocamento angular θ são relacionados através da equação (5) com ξ sendo apenas uma variável de integração, $\mathbf{f}_{qd0s}$, $\mathbf{f}_{abc_s}$ podem ser funções que expressam as tensões, correntes ou fluxos em eixos síncronos $qd0$ e em eixos estacionários abc , respectivamente. Já a matriz $\mathbf{K}_s$ é a responsável pela transformação de abc para $qd0$ sendo variante em potência. De maneira semelhante utiliza-se uma matriz de transformação para as variáveis do rotor. Com o objetivo da obtenção das equações de tensão em eixos síncronos $qd0$, primeiro deve-se obter as equações de tensão do estator e rotor em coordenadas abc . O circuito equivalente apresentado na Figura 2 junto a aplicação das leis de *Kirchhoff*, são utilizados para obter as equações (6) e (7) em coordenadas abc .

$$\mathbf{v}_{abc_s} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{abc_s} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc_s} \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_{abc_r} = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_{abc_r} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc_r} \quad (7)$$

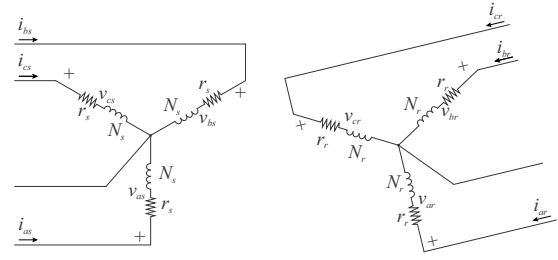


Figura 2: Circuito elétrico equivalente do DFIG.

A partir das equações (4, 6, 7), é possível definir equações em eixos síncronos $qd0$ de tal maneira que permita eliminar as variações da indutância simplificando a análise matemática desta máquina.

Depois que obtém-se as equações no referencial arbitrário obtido ao utilizar a transformação $\mathbf{K}_s$, é necessário fazer uma substituição que transformará para o referencial do fluxo estatórico, para isto basta substituir ω por ω_e (velocidade angular do fluxo estatórico). Desta maneira é possível controlar as potências ativa (P_s) e reativa (Q_s) do estator independentemente uma da outra (Bim, 2014).

A Figura 3 mostra a configuração no referencial do fluxo estatórico onde negligenciando a resistência do estator, observa-se o vetor de tensão adiantado 90° em relação ao vetor fluxo, na prática, há um pequeno erro devido a queda de tensão na resistência estatórica (Marques, 2004; Lima, 2009; Li et al., 2009).

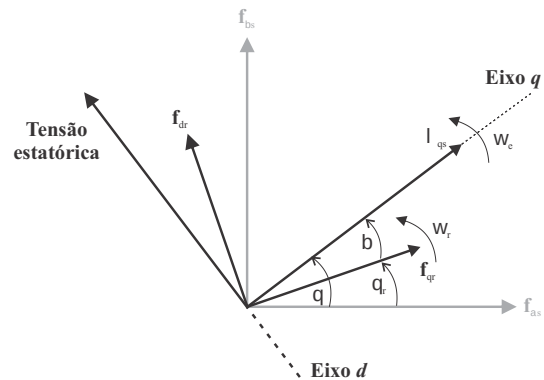


Figura 3: Referencial do fluxo estatórico para as variáveis do rotor e estator.

Definido o referencial no fluxo estatórico, reescreve-se as equações de tensão da máquina considerando $\lambda_{ds} = 0$, desta forma obtém-se:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \dot{\lambda}_{qs} \quad (8)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (9)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{dr} + \dot{\lambda}'_{qr} \quad (10)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{qr} + \dot{\lambda}'_{dr} \quad (11)$$

De maneira semelhante, as equações para o fluxo neste referencial podem ser reescritas como:

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + M) i_{qs} + M i'_{qr} \quad (12)$$

$$0 = (L_{l_s} + M) i_{ds} + M i'_{dr} \quad (13)$$

$$\lambda'_{qr} = (L'_{lr} + M) i'_{qr} + M i_{qs} \quad (14)$$

$$\lambda'_{dr} = (L'_{lr} + M) i'_{dr} + M i_{ds} \quad (15)$$

As equações desenvolvidas são parte fundamental para o projeto dos controladores PI de correntes rotóricas, que comporão a malha interna uma vez que na malha externa terá o controle de potência.

Os resultados obtidos neste artigo, embora simulados, foram feitos utilizando dados de uma máquina que foi ensaiada para obter os parâmetros elétricos para a análise teórica e simulada. A Tabela 1, expressa os resultados obtidos com o ensaio.

Tabela 1: Parâmetros do DFIG

Parâmetros	Valor
R_s	1,201 Ω
R'_r	1,201 Ω
L_{l_s}	6,950 mH
L'_{lr}	6,950 mH
M	153,060 mH

onde o subscrito “s” refere-se a variável do estator e o subscrito “r” refere-se a variável do rotor e ainda o sobrescrito ‘ significa que a variável está referida ao estator.

3 Projeto dos controladores

A modelagem matemática do DFIG apresenta as características dinâmicas da máquina e são utilizadas para o projeto do controlador proporcional e integral (PI) empregado. O controle PI é o mais utilizado em sistemas com DFIG e é um método de controle clássico com boa resposta dinâmica para controlar as correntes do rotor em um sistema de tensão equilibrada (Costa, 2010).

O conversor do lado do gerador controlará a potência ativa e reativa do estator conforme já abordado anteriormente. É necessário realizar o projeto de controle das correntes rotóricas para efetivar o controle destas potências que são calculadas pelas equações (16) e (17).

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{M}{L_{l_s} + M} v_{ds} i'_{dr} \quad (16)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} \frac{\lambda_{qs} - M i'_{qr}}{L_{l_s} + M} v_{ds} \quad (17)$$

Considerando a resistência estatórica muito pequena e um baixo acoplamento entre as malhas de corrente de eixo direto e quadratura, e definindo a rede elétrica como distúrbio, as equações diferenciais da máquina podem ser expressas sob

a forma das equações (18) e (19) que tem característica linear e de primeira ordem:

$$\frac{d}{dt} i'_{qr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{qr} + \frac{v'_{qr}}{L_{eq}} \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} i'_{dr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{dr} + \frac{v'_{dr}}{L_{eq}} \quad (19)$$

Este sistema descrito pelas equações (18) e (19) é linear e invariante no tempo, deste modo poderá ser realizado o projeto do controlador PI utilizando uma técnica clássica. Portanto deve-se reescrever o sistema sob a forma de função de transferência descrita por:

$$G(s) = \frac{i'_{qr}(s)}{v'_{qr}(s)} = \frac{1}{sL_{eq} + R'_r} \quad (20)$$

Marques (2004) descreve uma técnica de projeto do controlador PI, onde considera-se que o zero do controlador PI irá cancelar o pólo de (20) e os ganhos do controlador PI de eixo q serão calculados pelas equações:

$$K_{iq} = B_{wq} R'_r \quad (21)$$

$$K_{pq} = B_{wq} L_{eq} \quad (22)$$

onde B_w é a banda passante à malha fechada do sistema. De maneira semelhante determina-se os ganhos do controlador PI para o eixo d :

$$K_{id} = B_{wd} R'_r \quad (23)$$

$$K_{pd} = B_{wd} L_{eq} \quad (24)$$

com L_{eq} sendo representado por:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{M + L_{l_s}}{L'_{lr} M + L_{l_s} M + L'_{lr} L_{l_s}} \quad (25)$$

onde,

M = indutância mútua,

R'_r = resistência do rotor referida ao estator,

L_{l_s} = indutância de dispersão do estator,

L'_{lr} = indutância de dispersão do rotor.

Marques (2004) faz um estudo detalhado do comportamento da banda passante para diversos casos e a partir desta análise, percebe-se a importância do ajuste da banda passante em detrimento de alguns resultados. Ao reduzir a banda passante, por exemplo, reduz-se as oscilações em amplitude de tensão da rede porém exige-se um maior esforço dos conversores para fornecer a corrente do rotor necessária durante mudanças da referência.

O sistema tem a característica de ter menores oscilações no tempo com B_w e a potência ativa aumentando, ou seja, isto implica em um compromisso com as referências de potência em virtude de maiores ou menores oscilações da resposta frente a mudanças na referência podendo impactar na estabilidade do sistema eólico.

4 Característica da rede simulada

Os estudos realizados consideram o gerador conectado em rede fraca. Conhecendo a impedância da linha (Z_{cc}) e a tensão no ponto de conexão (V_{CC}), determina-se a potência de curto circuito (Z_{CC}):

$$S_{CC} = V_{CC}^2 / Z_{CC} \quad (26)$$

$$\rho_{CC} = S_{CC} / P \quad (27)$$

onde P é a potência a ser injetada no PC e ρ_{CC} é a razão da potência de curto circuito S_{CC} com P , classificando uma rede fraca para valores inferiores a 8 (Jain, 2010). A configuração da rede será conforme apresenta a Figura 4.

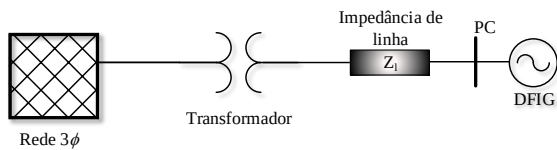


Figura 4: Rede elétrica.

A estrutura de rede apresentada na Figura 4, possui como impedância de linha $Z_l = (0,642 + j0,083)\Omega/km$ e o gerador DFIG possui uma potência de 3 kW. Este cenário pode ser facilmente implementado para fins de verificação experimental.

O transformador está caracterizado por uma resistência de 0,0004Ω e uma reatância de 0,096Ω e com base nestas características é demonstrado na Figura 5 a curva do ângulo em função da distância considerada e percebe-se que quanto mais distante dos terminais do transformador, o ângulo tende a ser o ângulo da linha de distribuição que é predominantemente resistiva, e este é de fato uma característica determinante ao analisar a variação de tensão no PC.

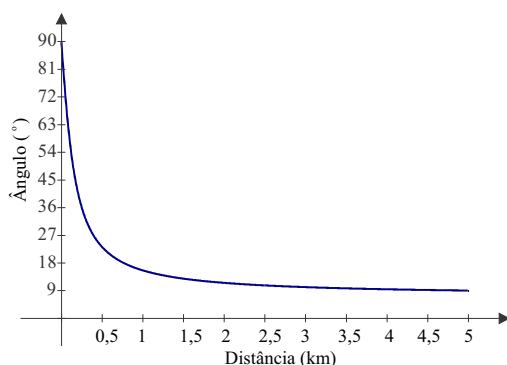


Figura 5: Ângulo ao longo da rede.

De acordo com Rocabert et al. (2012), as linhas de distribuição tem a característica predominantemente resistiva e a mudança da potência ativa influencia de forma direta a variação da tensão no PC, e através da equação 28 verifica-se a importância dos valores iniciais de tensão e potência para início de análise e a Figura 6 demonstra

o comportamento real do DFIG no cenário configurado.

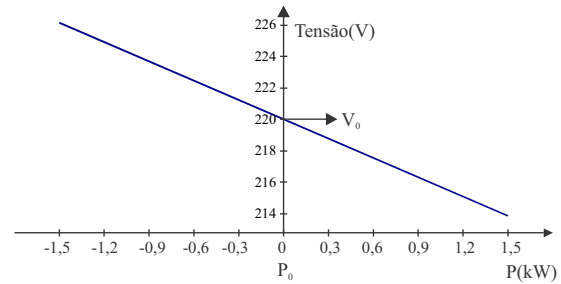


Figura 6: Característica de variação da tensão em função da potência ativa.

$$V - V_0 = -k_p(P - P_0) \quad (28)$$

A constante de inclinação (*droop*) k_p foi definida para o sistema e apresentou um valor de $4,083 \times 10^{-3}$ e possibilita desta maneira obter a tensão resultante em função da potência aplicada.

5 Regulação de tensão

Vários autores como Ezzat et al. (2013), Kim et al. (2012), demonstram possibilidades de controlar o DFIG durante faltas na rede, para o presente trabalho a análise se dá com a rede em operação normal facilitando o uso do controle tipo PI. Em grande parte dos trabalhos apresentados, não são direcionados ao estudo do comportamento da máquina em redes “fracas” o que permite análises acerca deste ponto e as consequências de inserção das fontes renováveis nestas redes.

De acordo com Zhang et al. (2014), é possível controlar uma turbina eólica utilizando uma orientação indireta ao fluxo do estator, o estudo em questão é destinado a uma micro rede e um dos modos de operação permite ao gerador ser controlado para ajudar a restabelecer a tensão e frequência do sistema diante um ilhamento. Especialmente este modo de operação é interessante a sua análise devido ao comportamento do gerador operando na regulação da tensão e frequência do sistema. Baseado nesta observação é possível implementar um controle com estas características porém mantendo o controle proposto de malha interna de corrente e externa de potência.

Outros trabalhos como Arani e Mohamed (2015) e Tan et al. (2016) utilizam na estrutura de controle a medição de torque do gerador, para reduzir a necessidade deste sensor o controle utilizado não terá malha de controle de torque.

A operação do DFIG possui características especiais quanto ao fornecimento de potência ativa e reativa. O trabalho de Engelhardt et al. (2011), demonstra por meios gráficos, a limitação de operação e fornecimento de potência. Estas definições impactam diretamente no dimensionamento dos

conversores e sua capacidade de contribuir na regulação da tensão no PC. De maneira semelhante Tian et al. (2013) e Kim et al. (2016), também analisam a capacidade de potência ativa e reativa, observando os limites de corrente e tensão do rotor e limite de corrente do estator.

No trabalho de Rocabert et al. (2012) reforça a importância da sincronização do DFIG a rede, de maneira a proporcionar o controle de potência ativa e reativa injetado na rede com propósito de controlar a tensão e frequência no PC.

6 Resultados de simulação

Os resultados obtidos por meio de simulação, são apresentados para evidenciar o fato de que em redes fracas com o valor de resistência da rede elétrica não sendo desprezível, uma mudança na potência ativa resulta na variação do valor da tensão no PC. Utilizando um sistema de distribuição em baixa tensão 220 V de fase, configurou-se uma rede de 5 km para conexão do DFIG onde será utilizado a potência máxima para verificar os extremos de variação da tensão no PC em três cenários distintos, quais sejam: sem carga, carga parcial e carga máxima em relação a potência nominal do gerador.

O primeiro cenário de simulação é apresentado na Figura 7 na qual é possível observar que aos 400 ms de simulação a tensão no PC se elevou, passando de 219,17V para 232,58V representando uma elevação de 6,1% pois o gerador passou a fornecer 3kW de potência ao sistema. Nesta forma de operação têm-se o gerador operando em sua potência máxima e nenhuma carga junto a PC que poderia provocar alteração do perfil inicial de tensão.

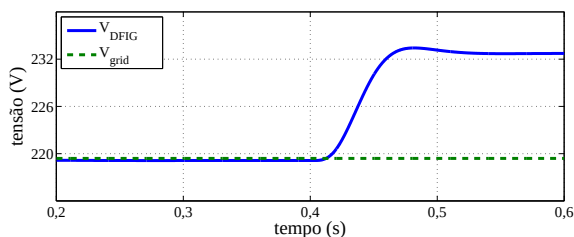


Figura 7: Regulação de tensão sem carga.

Da mesma forma que injetar potência ativa no PC provoca uma elevação da tensão, quando é absorvido energia neste mesmo PC a tensão tende a cair. Observe na Figura 8, em 250 ms uma carga de 1kVA e $FP = 0,8$ indutivo é conectada junto ao PC e a tensão cai 2,0%, em 400 ms o gerador passa a fornecer 3 kW ao sistema, e a tensão passa a se elevar em relação a rede ficando uma elevação de 4,2%, portanto no PC está em 228,50V contra 219,28V da rede, diferença de potencial necessário para que ocorra o fluxo de potência ativa excedente do gerador para a rede.

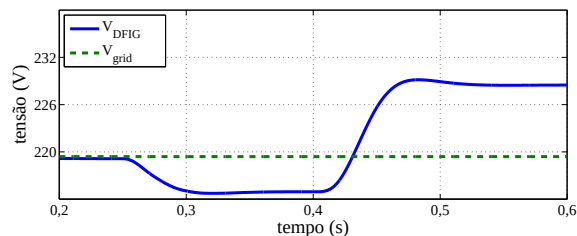


Figura 8: Regulação de tensão com carga conectada, 1kVA e $FP = 0,8$ indutivo.

No próximo cenário, demonstrado na Figura 9, uma carga com 3kVA e $FP = 0,95$ indutivo é conectada no PC aos 250 ms e percebe-se uma queda mais acentuada da tensão, 6,2% e quando o gerador passa a fornecer 3kW a tensão volta a ser restabelecida pelo fato que a demanda de energia da carga está sendo fornecida pelo gerador que está próxima a ela, evitando assim que a energia seja transmitida pela linha de transmissão ocasionando perdas.

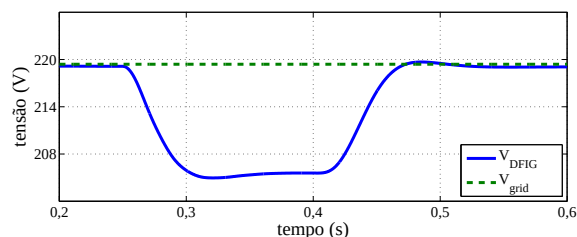


Figura 9: Regulação de tensão com carga conectada 3kVA e $FP = 0,95$ indutivo.

7 Conclusões

Em redes fracas, a variação na amplitude de tensão é obtida com a mudança da quantidade de potência injetada na rede. O ângulo da rede diminui ao passo que aumentam-se as distâncias bem como reduz-se a quantidade de potência que pode ser adicionada ao PC para manter os níveis de tensão dentro de limites seguros.

Na medida em que fontes geração distribuída são inseridas no sistema elétrico o perfil de tensão muda, não permitindo apenas injeção de potência mas também sendo necessário que cada nova fonte de geração distribuída faça o controle adequado de tensão contribuindo com o manutenção do sistema.

Com os resultados de simulação pode-se evidenciar as diversas características de uma rede fraca comprovando e exemplificando este cenário de inserção de pequenas fontes de geração no sistema de distribuição, desta forma reforçando a ideia de que cada nova fonte inserida tem sua importância para a qualidade de energia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq, FINEP, Fundação Araucária e UTFPR-Campus Pato Branco pelo apoio financeiro.

Referências

- Arani, M. e Mohamed, Y. (2015). Analysis and impacts of implementing droop control in dfig-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability, *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Bim, E. (2014). *Máquinas Elétricas e Acionamento*, 3 edn, Elsevier, Rio de Janeiro.
- Costa, J. P. d. (2010). *Contribuição ao estudo do gerador de indução duplamente alimentado: operação durante distúrbios na rede Elétrica*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.
- Datta, R. e Ranganathan, V. (1999). Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors, *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)* 4: 2623–2630.
- Engelhardt, S., Erlich, I., Feltes, C., Kretschmann, J. e Shewarega, F. (2011). Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 26(1): 364–372.
- Ezzat, M., Benbouzid, M., Mueen, S. e Harnfors, L. (2013). Low-voltage ride-through techniques for dfig-based wind turbines: state-of-the-art review and future trends, *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* pp. 7681–7686.
- GWEC (2016). Global wind statistics 2015.
- Jain, P. (2010). *Wind Energy Engineering*, McGraw-Hill Professional.
- Kim, J., Member, S., Seok, J.-k., Member, S. e Muljadi, E. (2016). Adaptive Q-V scheme for the voltage control of a dfig-based wind power plant, 31(5): 3586–3599.
- Kim, K.-H., Jeung, Y.-C., Lee, D.-C. e Kim, H.-G. (2012). LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization, *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Ko, H.-S., Yoon, G.-G. e Hong, W.-P. (2007). Active use of dfig-based variable-speed wind-turbine for voltage regulation at a remote location, *IEEE Transactions on Power Systems* 22(4): 1916–1925.
- Krause, P. C., WASYN CZUK, O. e SUDHOFF, S. D. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drives Systems*, 2 edn, IEEE PRESS, Hoboken.
- Li, S., Chaloo, R. e Nemmers, M. J. (2009). Comparative study of dfig power control using stator-voltage and stator-flux oriented frames, *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting* pp. 1–8.
- Lima, F. K. d. A. (2009). *Aerogerador baseado em máquina de indução duplamente alimentada - suportabilidade para afundamento de tensão*, PhD thesis, COPPE/UFRJ.
- Marques, J. (2004). *Turbinas eólica: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação*, Master's thesis, UFSM.
- Naidu, N. K. S. e Singh, B. (2014). Experimental implementation of a doubly fed induction generator used for voltage regulation at a remote location, *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F. e Paper, I. (2012). Control of Power Converters in AC Microgrids.pdf, *IEEE Transactions on Power Electronics* 27(11): 4734–4749.
- Tan, Y., Meegahapola, L. e Muttaqi, K. M. (2016). A suboptimal power-point-tracking-based primary frequency response strategy for dfigs in hybrid remote area power supply systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 31: 93–105.
- Tian, J., Su, C. e Chen, Z. (2013). Reactive power capability of the wind turbine with Doubly Fed Induction Generator, *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* pp. 5312–5317.
- Zhang, L., Hou, J., Xin, H., Wang, Z. e Gan, D. (2014). Maximum power estimation and droop control of dfig-based wind turbines in multi-mode microgrids, *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* pp. 1–6.
- Zhao, Y., Chai, J. e Sun, X. (2015). Virtual synchronous control of grid-connected dfig-based wind turbines, *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* pp. 2980–2983.