

APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUPORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Edmar Ferreira Cota – edmar.elt@gmail.com

Renato Amorim Torres – renatoamorimtorres@gmail.com

Victor Flores Mendes – victormendes@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. A energia eólica é a energia renovável que mais cresce em todo mundo e uma das mais aplicadas para geração de eletricidade. Dentre as tecnologias de aerogeradores empregadas, a tecnologia que utiliza geradores de indução com rotor em gaiola ou squirrel cage induction generator (SCIG) é a mais simples e com menor custo. Já a tecnologia com geradores de indução duplamente excitados ou doubly-fed induction generator (DFIG) é a mais difundida, devido à sua característica de poder funcionar a velocidade variável e ter conversores de menor potência conectados ao rotor. Todavia os códigos de rede de vários países não permitem a desconexão imediata de um aerogerador perante faltas na rede elétrica, sendo que as tecnologias SCIG e DFIG apresentam certa fragilidade a essas faltas, uma vez que os estatores dos geradores são conectados diretamente ao ponto de conexão comum (PCC) da rede elétrica. Neste trabalho é realizado um estudo, baseado em simulações no software Matlab/Simulink, utilizando-se um restaurador dinâmico de tensão ou dynamic voltage restorer (DVR) para aumentar a robustez de aerogeradores SCIG e DFIG perante afundamentos de tensão na rede elétrica.

Palavras-chave: Energia Eólica, Suportabilidade de Aerogeradores a Afundamentos de Tensão, Restaurador Dinâmico de tensão (DVR).

1. INTRODUÇÃO

Dentre as energias renováveis, a que apresenta maior crescimento nas últimas décadas é a energia eólica, pois possui grande potencial energético, abundância de matéria prima, o vento, e menor preço em relação às outras fontes renováveis. O Brasil está entre os 5 países com maior número de novas instalações eólicas em 2014, apesar de ainda estar distante de países como China, EUA e Alemanha no que diz respeito a potência eólica total instalada (GWEC, 2015).

Quanto às tecnologias de aerogeradores existentes, as mesmas podem ser agrupadas nos aerogeradores a velocidade fixa e a velocidade variável. O primeiro grupo, utiliza um gerador SCIG conectado diretamente à rede elétrica, com apenas um soft-starter para uma partida mais suave. Como a velocidade do gerador é fixa, não se consegue a máxima eficiência da turbina para a faixa de velocidades de vento em que o aerogerador opera, sendo essa tecnologia simples e de baixo custo. Essas turbinas se encontram presentes principalmente em países europeus, que investem em energia eólica há mais tempo (Yaramasu *et al.*, 2015).

Já no grupo de aerogeradores a velocidade variável, uma das tecnologias mais usadas é a DFIG, pois como os conversores são conectados ao rotor, os mesmos possuem menor potência (em geral em torno de 30% da potência nominal do gerador), o que diminui seus custos em relação às tecnologias que empregam conversores plenos no estator. Os aerogeradores desse grupo apresentam um custo maior que os de velocidade fixa, porém maximizam o rendimento da turbina eólica (Ibrahim *et al.*, 2011). A Fig.1 representa os aerogeradores com as tecnologias SCIG e DFIG conectados à rede elétrica.

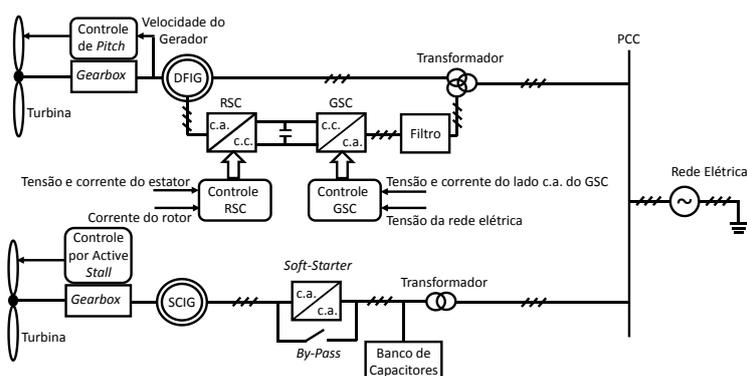


Figura 1 – (a) Aerogeradores com Tecnologia SCIG e DFIG.

Contudo em ambas as tecnologias, o estator do gerador é conectado diretamente ao PCC, o que faz com que as mesmas sejam mais sensíveis a afundamentos de tensão na rede elétrica. Durante tais distúrbios, o gerador SCIG apresenta uma oscilação no torque eletromagnético, que pode levar o aerogerador a ter danos mecânicos (Papathanassiou; Papadopoulos, 2001). Já para o DFIG, além de possuir o mesmo problema, tem o agravante de altas tensões e correntes poderem ser induzidas no rotor do gerador, elevando a tensão do barramento c.c. e podendo provocar danos permanentes aos conversores (Ibrahim *et al.*, 2011).

Nos códigos de rede atuais, se faz necessário que o aerogerador continue conectado à rede mesmo durante um afundamento de tensão. A Fig. 2 mostra a curva de suportabilidade de aerogeradores para o código brasileiro. Como se nota, apenas para afundamentos de tensão abaixo de 0,2 p.u., o aerogerador pode-se desconectar imediatamente, enquanto que para tensões acima de 0,9 p.u., o aerogerador não pode se desconectar.

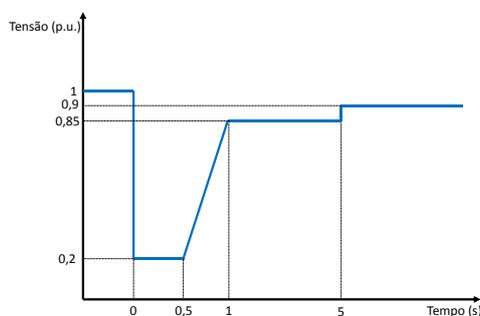


Figura 2 – Curva de suportabilidade de aerogeradores a afundamentos de tensão (ONS, 2009).

Assim neste trabalho pretende-se, com o auxílio do DVR, restaurar a tensão nos terminais dos aerogeradores DFIG e SCIG, perante afundamentos equilibrados e desequilibrados. Com isso, aumenta-se a suportabilidade de tais tecnologias de aerogeradores durante as faltas, para que as mesmas estejam dentro das normas estabelecidas pela ONS. Os resultados serão obtidos por meio de simulações no *software Matlab/Simulink*.

2. AEROGERADORES COM TECNOLOGIA SCIG e DFIG

Para a simulação dos aerogeradores SCIG e DFIG, deve-se primeiro modelar a turbina eólica como (Akhmatov, 2003). Assim para cada velocidade do vento (V), existe uma velocidade angular da turbina (e conseqüentemente um valor para velocidade angular do gerador, ω_m) que permite uma máxima extração de potência do vento pela turbina (P_t). A Fig. 3 mostra para um aerogerador DFIG e outro SCIG, as curvas de potência da turbina pela velocidade do gerador, para diversas velocidades do vento, desde a de *cut-in* (4m/s para o DFIG e 6m/s para o SCIG) até a nominal (12m/s). Como se observa no aerogerador com a tecnologia DFIG, o mesmo sempre extrai a maior potência do vento, pois permite variação na velocidade do gerador. Já para a tecnologia SCIG, apenas na velocidade de vento nominal o aerogerador apresenta o máximo rendimento. Essas turbinas são as mesmas utilizadas nesse trabalho.

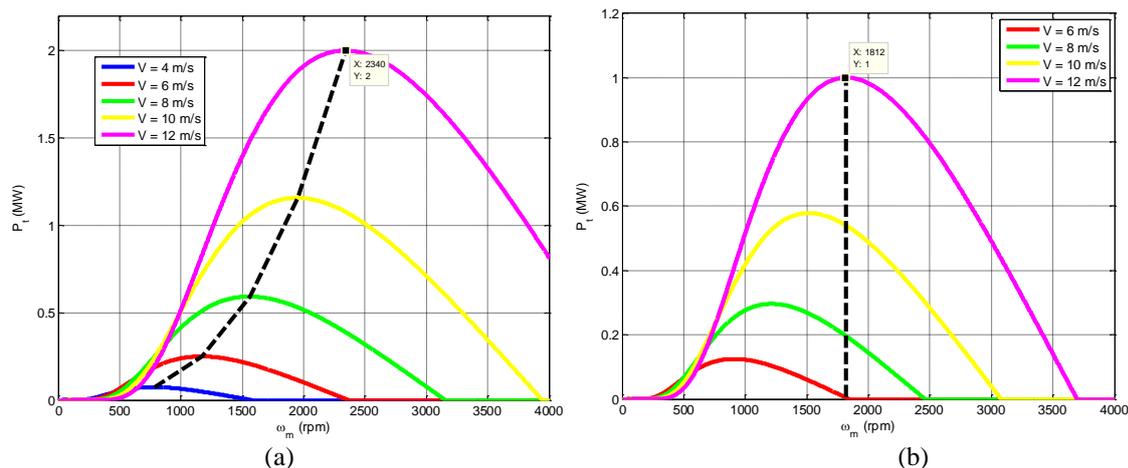


Figura 3 – Potência da turbina pela velocidade angular do gerador em várias velocidades de vento para (a)DFIG e (b)SCIG.

O próximo passo para a implementação dos aerogeradores é modelar os geradores. O SCIG possui uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo, enquanto que o DFIG tem uma máquina de indução com rotor bobinado. Ambos modelos das máquinas são idênticos, a não ser pela tensão do rotor ser nula para o SCIG. Como pode ser obtido em (Novotny; Lipo, 1996), as equações do modelo de uma máquina de indução em coordenadas girantes ($dq0$) são dadas por:

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_{dq0s} &= R_s \vec{i}_{dq0s} + \frac{d\vec{\psi}_{dq0s}}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_{dqs} & \vec{\psi}_{dq0s} &= L_{ls} \vec{i}_{dq0s} + L_m (\vec{i}_{dqs} + \vec{i}_{dqr}) \\
 \vec{v}_{dq0r} &= R_r \vec{i}_{dq0r} + \frac{d\vec{\psi}_{dq0r}}{dt} + j(\omega_s - \omega_e) \vec{\psi}_{dqr} & \vec{\psi}_{dq0r} &= L_{lr} \vec{i}_{dq0r} + L_m (\vec{i}_{dqr} + \vec{i}_{dqs}) \\
 T_e &= \frac{3P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) & \frac{2J}{P} \frac{d\omega_e}{dt} &= T_e - T_m
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Nas equações acima todos subscritos $dq0$ se referem às coordenadas de eixo direto, de quadratura e de seqüência zero respectivamente. Já s e r correspondem a estator e rotor. Os termos v , i e ψ significam tensão, corrente e enlace de fluxo respectivamente. Já R_s e R_r são as resistências dos enrolamentos do estator e rotor, enquanto que L_{ls} , L_{lr} e L_m são as indutâncias de dispersão do estator, de dispersão do rotor e de magnetização. Por fim, ω_s é a frequência das variáveis do estator (no caso igual a da rede), ω_e é a velocidade elétrica de giro da máquina, T_e é o torque eletromagnético, T_m o torque de carga (no aerogerador será o da turbina), P é o número de par de polos e J é o momento de inércia do gerador.

Deve-se atentar que as variáveis do rotor são referidas ao estator e o torque eletromagnético pode ser obtido de várias formas. Outra observação é que na coordenada de seqüência zero não há acoplamento entre as variáveis do rotor e estator. Além disso, no caso de distúrbio na rede elétrica, existe uma dinâmica da máquina para componentes de seqüência positiva e negativa (existe também para seqüência zero, caso os enrolamentos do estator sejam aterrados).

A tecnologia SCIG não possui um controle sobre a velocidade do gerador. Logo em regime de operação normal, o mesmo gira praticamente com velocidade fixa, tendo um escorregamento máximo entre 1 e 2%. Ainda para compensar os reativos do gerador, é necessário instalar um banco de capacitores, sendo que esse banco pode ser chaveado segundo a potência reativa do gerador (Papathanassiou; Papadopoulos, 2001). Já tecnologia DFIG possui conversores na configuração *back-to-back* conectados ao rotor do gerador, como já mostrado na Fig. 1. Neste trabalho o conversor conectado do lado do rotor da máquina é denominado de RSC (*rotor side converter*), enquanto que o conversor conectado à rede elétrica é denominado de GSC (*grid side converter*).

O RSC é responsável por controlar a potência ativa e reativa que flui pelo estator da máquina. Para isso, o mesmo possui internamente às malhas de potência ativa (P_s) e reativa (Q_s) do estator, malhas que controlam a corrente do rotor em referencial girante (i_{dr} e i_{qr}). Deve-se ainda ressaltar, que externamente à malha de potência ativa, há um seguidor de máxima potência ou *maximum power point tracking* (MPPT) que tem o objetivo de fazer com que o aerogerador extraia para qualquer velocidade do vento, entre a nominal e a de *cut-in* a maior potência possível. Para isso, utiliza-se da velocidade mecânica do gerador (ω_m). A Fig. 4 (a) representa o controle do conversor RSC.

Já o GSC possui malhas internas que controlam as correntes do lado c.a. do conversor (i_d^{GSC} e i_q^{GSC}). Essas malhas são utilizadas para controlar, através de malhas externas, a potência reativa no conversor (Q^{GSC}) e a tensão no barramento c.c. (v_{cc}^{GSC}). Além disso, projetou-se um filtro LCL no lado c.a. do GSC para filtrar os harmônicos de corrente oriundos do conversor, segundo (Liserre; Blaabjerg; Hansen, 2001). O controle do conversor GSC está na Fig. 4(b).

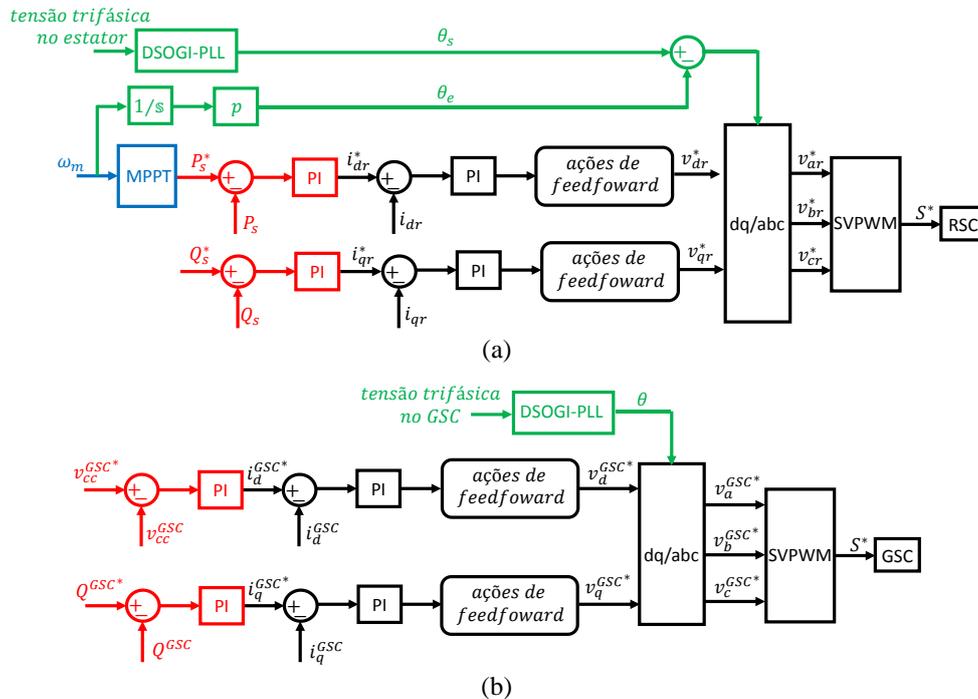


Figura 4 – Controle (a) RSC e (b) GSC.

A estratégia de chaveamento utilizada foi o SVPWM (*space vector pulse width modulation*), que permite maior aproveitamento da tensão do barramento c.c. (Hava; Kerkman; Lipo, 1999). Além disso, como as malhas de controle

4. RESULTADOS

Como já dito anteriormente a tecnologia DFIG é a mais aplicada em turbinas eólicas e em muitos países há aerogeradores SCIG. Logo não é estranho que parques eólicos com aerogeradores DFIG e SCIG estejam próximos. Assim nesse trabalho dois aerogeradores, cada um de uma tecnologia, estarão conectados à rede elétrica como demonstrado na Fig. 5(a). Em ambos será estudado o comportamento para um afundamento com tensão residual de 0,2 p.u. no PCC durante 0,5 segundos, com e sem a proteção do DVR. A velocidade de vento será a nominal, com os geradores gerando a máxima potência.

4.1 Afundamento Trifásico

Em primeiro momento será simulado um afundamento trifásico equilibrado no PCC entre os intervalos de 1 a 1,5 segundos. A Fig. 6 mostra as tensões de fase da rede, imposta pelo DVR e nos aerogeradores. Nota-se que a tensão nos aerogeradores é restaurada ao seu valor nominal com a atuação do restaurador dinâmico de tensão. Ainda na Fig. 6 é mostrada a tensão no barramento c.c. do DVR. Durante a falta essa tensão eleva-se, devido a energia consumida pelo dispositivo dos aerogeradores. Logo é necessário a instalação do *chopper* nesse barramento a fim de limitar a tensão, como demonstrado.

Na Fig. 7 é representada a corrente do estator, o torque eletromagnético, a potência ativa e reativa para o aerogerador SCIG sem e com o DVR. Como se observa, sem o restaurador, a corrente apresenta valores bem maiores no início e principalmente no final do afundamento. Isso se deve ao fato de que nesses instantes, há uma componente natural (transitório) e forçada (permanente), sendo que a componente forçada é maior quanto mais elevada à tensão do gerador (Morren; Haan, 2007). Para o caso com proteção, percebe-se um transitório mais evidente somente no início da falta. A justificativa para tal é que o DVR demanda um tempo para restaurar a tensão do gerador como está na Fig. 6c.

Quanto ao torque eletromagnético, o mesmo diminui com o SCIG sem proteção, o que faz com que o aerogerador acelere. Essa aceleração depende do momento de inércia da turbina e tende a ser menor para aerogeradores de grande porte. Além disso, as oscilações de conjugado são maiores para o caso sem o DVR, elevando as chances de danos mecânicos.

Já a potência ativa decai em módulo durante o afundamento para o SCIG sem DVR. Isso é a causa da diminuição do torque eletromagnético e aceleração do gerador, que converte uma parcela da potência absorvida pela turbina do vento, em energia cinética. Com a proteção, o aerogerador consegue continuar gerando aproximadamente a mesma potência ativa, com exceção dos instantes após o início da falta, uma vez que sua tensão é restaurada.

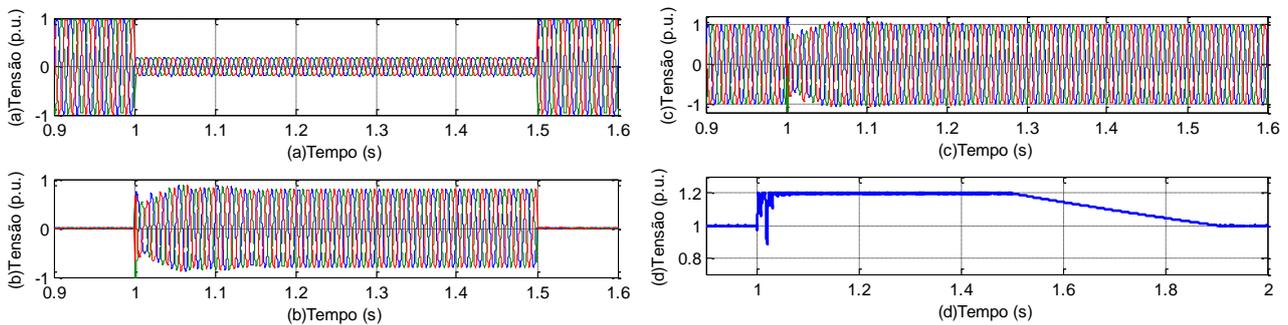


Figura 6 – Tensão (a) de fase da rede (b) do DVR (c) de fase nos aerogeradores e (d) no barramento c.c. do DVR

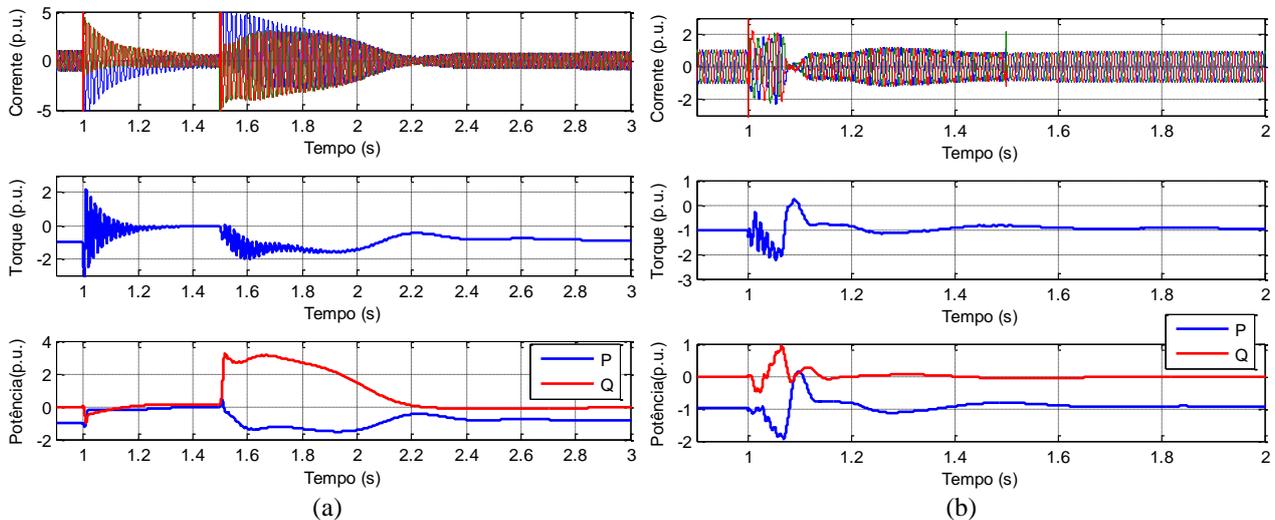


Figura 7 – Afundamento trifásico para o SCIG (a) sem DVR e (b) com DVR.

A última variável analisada para o SCIG é a potência reativa. Sem o DVR, no início do afundamento a máquina diminui sua magnetização, fazendo com que o aerogerador tenha um fluxo de potência reativa capacitivo. Contudo o banco de capacitores para correção de fator de potência diminui sua energia armazenada com queda de tensão, e antes do fim da falta o SCIG tem um fluxo de potência reativa indutivo. Com a tensão no PCC restaurada, a máquina aumenta sua magnetização (o que pode levá-la à saturação), tornando o fator de potência mais indutivo e tendo um pico de potência reativa de mais de 3 p.u. Todavia, à medida que o tempo passa, a potência reativa tende a zero, pois o banco de capacitores volta a elevar sua tensão. Com o DVR, a potência reativa do SCIG apenas oscila inicialmente, devido ao transitório da corrente, tendendo a um valor nulo antes do fim da falta.

Os resultados para o DFIG estão apresentados na Fig. 8. Os gráficos de corrente, dizem respeito às correntes do rotor e como se observa se tornam deformadas sem o DVR, que se deve a componente natural do enlace de fluxo do estator (Morren; Haan, 2007). Além disso, essas correntes praticamente dobram de amplitude no intervalo da falta e demoram a estabilizar após a mesma, o que pode causar danos aos conversores.

Para o torque eletromagnético, o mesmo é bastante oscilante sem o restaurador, novamente devido a componente natural do enlace de fluxo do estator, que distorce correntes do estator e rotor. Além disso, o seu valor médio diminui durante o afundamento, devido à queda da potência ativa entregue à rede, ocorrendo o inverso após a falta. Na presença do dispositivo de proteção, o torque do DFIG oscila apenas no início do afundamento, devido ao transitório da tensão restaurada, o que também causa um pequeno transitório na potência ativa.

Já a potência reativa do DFIG não há grandes variações tanto com e sem o DVR, diferentemente do ocorrido com o SCIG. Isso se deve principalmente pelo fato dos conversores do DFIG controlarem a potência reativa, o que não ocorre no SCIG.

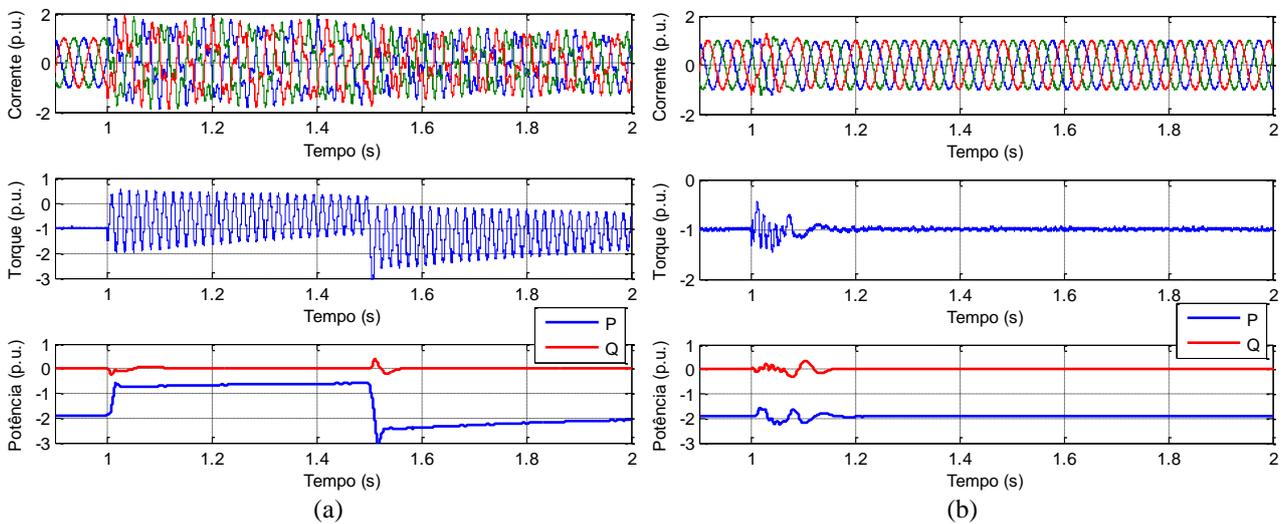


Figura 8 – Afundamento trifásico para o DFIG (a) sem DVR e (b) com DVR.

4.2 Afundamento Monofásico

O afundamento mais comum a que os aerogeradores estão sujeitos é o monofásico. Assim sendo, neste item será analisado esse afundamento no intervalo de 1 a 1,5 segundos, com uma tensão residual de 0,2 p.u. A Fig. 9 mostra as tensões de fase no PCC, as tensões impostas pelo DVR e as tensões de linha nos aerogeradores. Novamente se nota que a tensão nas turbinas eólicas é restaurada para o valor nominal durante a falta. Uma observação é que foi analisada a tensão de linha para os geradores, devido ao fato que um afundamento desequilibrado gera tensões de fase de sequência zero e a mesma não é compensada pelo DVR. Contudo esse fato não é um problema, uma vez que os geradores não são aterrados e não há circulação de correntes de sequência zero.

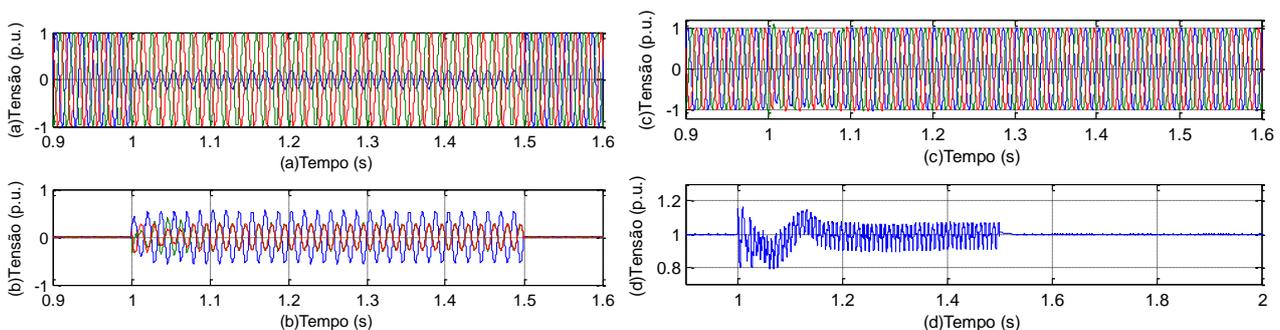


Figura 9 – Tensão (a) de fase na rede (b) do DVR (c) de linha nos aerogeradores e (d) no barramento c.c. do DVR.

Ainda na Fig. 9 é representada a tensão no barramento c.c. do DVR. Como se observa a mesma não aumenta demasiadamente como no caso anterior, uma vez que a potência absorvida pelo dispositivo é bem menor. Contudo o mesmo apresenta oscilações devido ao desequilíbrio das tensões na rede, tendo em vista que esse barramento não é controlado.

A Fig. 10 apresenta os resultados durante a falta para o SCIG, com e sem proteção. Como se percebe, sem o restaurador, a corrente do estator torna-se desequilibrada com picos elevados no início e fim do afundamento. Já com o DVR, a corrente apresenta um transitório inicial e depois tende a se tornar mais equilibrada, apesar de apresentar distorções até o fim da falta.

Para o torque eletromagnético, as oscilações são mais severas para o SCIG sem proteção, tanto durante quanto após o afundamento. Isso se deve ao fato de que em um afundamento desequilibrado, as correntes e enlaces de fluxo da máquina também tendem a se tornar desequilibrados, gerando variações bruscas no conjugado.

Avaliando as potências ativa e reativa, tem-se que para o caso com o restaurador, que as variações são mais brandas, sendo mais nítidas no início da falta, devido aos transitórios da corrente. Já sem o dispositivo de proteção, as alterações de potências são mais elevadas, com a potência ativa reduzindo durante o afundamento, enquanto a potência reativa se torna indutiva durante quase todo intervalo após início da falta. As justificativas para tais comportamentos são a mesmas das já descritas para o afundamento trifásico e são mais brandas devido ao menor número de fases que diminuem as tensões.

Por fim a Fig. 11 mostra os resultados para o DFIG. Como no caso trifásico, as correntes do rotor e o torque eletromagnético são mais oscilatórios e atingem grandes amplitudes sem o DVR, sendo que com o dispositivo de proteção essas variáveis quase que não se modificam com o afundamento. Já para as potências ativa e reativa, não se vê grandes diferenças, a não ser pelas variações ao final do afundamento que ocorrem para a situação sem DVR.

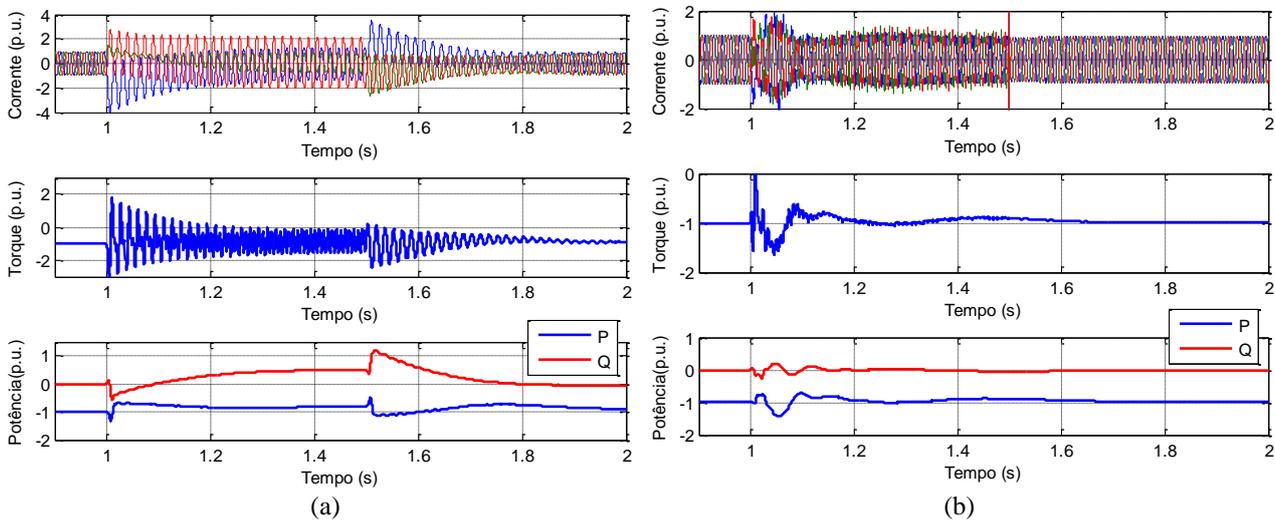


Figura 10 – Afundamento monofásico para o SCIG (a) sem DVR e (b) com DVR.

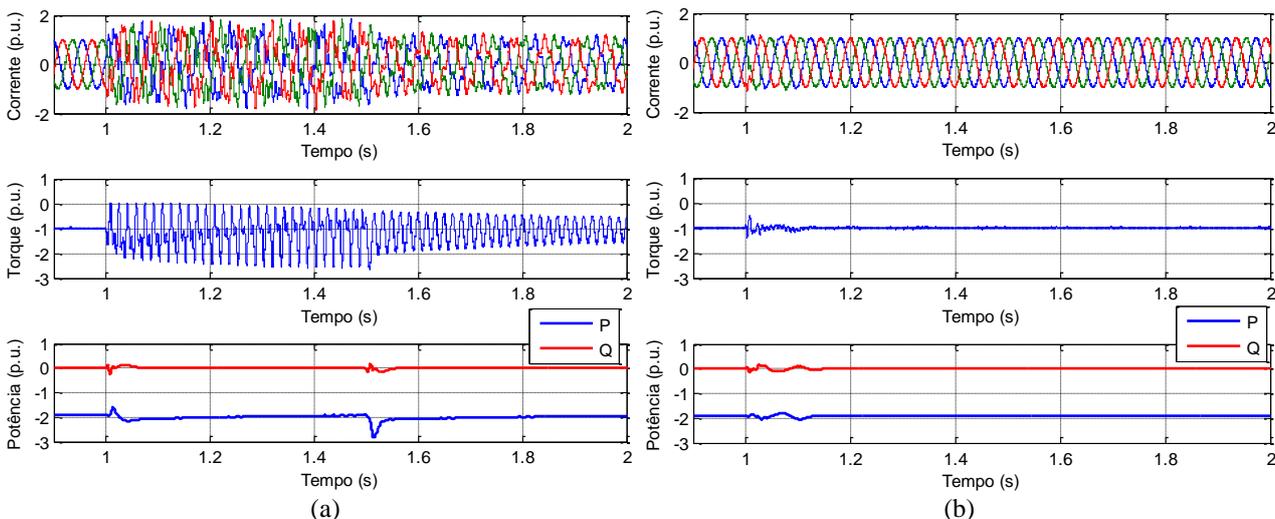


Figura 11 – Afundamento monofásico para o DFIG (a) com DVR e (b) sem DVR.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram discutidos os problemas que aerogeradores SCIG e DFIG possuem com afundamentos de tensão na rede elétrica, além das condições impostas pelo código de rede brasileiro para que os mesmos possam operar

durante tais distúrbios. Também foram apresentadas as principais características dessas tecnologias de aerogeradores e suas modelagens.

Resultados de simulação com e sem DVR, mostram como a suportabilidade perante afundamentos de tensão dos aerogeradores SCIG e DFIG melhoram com o acréscimo do restaurador. Com o dispositivo de proteção, as oscilações de torque eletromagnético dos gerados diminuem consideravelmente, podendo evitar danos mecânicos. Além disso, as potências ativa e reativa conseguem manter-se em torno dos valores anteriores a falta. Por fim, as correntes de rotor para o DFIG e estator para o SCIG, apresentam menores distorções e acréscimos em amplitude, protegendo os enrolamentos dos geradores e seus conversores.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da CEMIG/ANEEL através do projeto P&D470, bem como a CAPES, CNPQ e Fapemig.

REFERÊNCIAS

- Akhmatov, V. Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power, Technical University of Denmark (Tese de PhD), Abril 2003.
- Global Wind Energy Council - GWEC. Global Wind Statistics 2014, 2015.
- Hava, A. M.; Kerkman, R. J.; Lipo, T. A. Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, v. Vol. 14, n. Nº 1, p. 49 - 61, Janeiro 1999.
- Ibrahim, A. O. et al. A Fault Ride-Through Technique of DFIG Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorers. IEEE Transactions on Power Electronics, v. Vol. 26, n. Nº. 3, p. 871 - 882, Março 2011.
- Liserre, M.; Blaabjerg, L.; Hansen, S. Design and control of an LCL-filter Based Three-Phase Active Rectifier, v. Vol: 41, n. Nº: 5, p. 1281-1291, 2001.
- Mendes, V. F. et al. Doubly-fed Induction Generator Ride-Through Fault Capability Using Resonant Controllers for Asymmetrical Voltage Sags. The Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation 2015, v. 4, Abril 2015.
- Morren, J.; HAAN, S. W. H. D. Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007. 174 - 180, Vol.22, No: 1.
- Novotny, D. W.; Lipo, T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. 1ª. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1996.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Submódulo 3.6 - Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão à Rede Básica, 2009.
- Papathanassiou, S. A.; Papadopoulos, M. P. Mechanical Stresses in Fixed-Speed Wind Turbines Due to Network Disturbances. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 16, n. 4, p. 361 - 367, Dezembro 2001.
- Rodríguez, P. et al. New Positive-Sequence Voltage Detector for Grid Synchronization. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '06., 18 - 22 Junho 2006. 1 - 7.
- Teodorescu, R.; Liserre, M.; Rodríguez, P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2011.
- Wessels, C.; Gebhardt, F.; Fuchs, F. W. Fault Ride-Through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults. IEEE Transactions on Power Electronics, v. Vol. 26, n. Nº. 3, p. 807 - 815, Março 2011.
- Yaramasu, V. et al. High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies. Proceedings of the IEEE, v. 103, n. 5, p. 740 - 788, Maio 2015.

DVR APPLIED TO DFIG AND SCIG WIND TURBINES TO INCREASE LOW VOLTAGE RIDE THROUGH

Abstract. Wind power is the fastest growing renewable energy worldwide and one of the most applied for electricity generation. Among the wind turbine technologies, the squirrel cage induction generator (SCIG) is the simplest and lowest cost. Since the doubly excited induction generator (DFIG) is the most widespread, due to its characteristic of being operated at variable speed and it has less power converters connected to the rotor. However, grid codes of several countries don't allow immediate disconnection of a wind turbine during voltage sags in the electrical grid and the SCIG and DFIG are technologies that presents a certain fragility to these faults, since their stators are directly connected to the common connection point (PCC). This paper presents a simulation in Matlab / Simulink software using a dynamic voltage restorer (DVR) to increase the robustness of SCIG and DFIG wind turbines during voltage sags in the electric grid.

Key words: Wind power, Low Voltage Ride Through, Dynamic Voltage Restorer.