

UM ESTUDO DA APLICAÇÃO DE RESTAURADORES DINÂMICOS DE TENSÃO EM TURBINAS EÓLICAS COM A TECNOLOGIA DE GERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO

EDMAR F. COTA, THIAGO M. DE SOUZA, LENIN M. F. MORAIS, VÍCTOR F. MENDES

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia - Belo Horizonte/MG, CEP: 31270-901
E-mails: edmar.elc@gmail.com, thiagomsouza2009@gmail.com, lenin@cpdee.ufmg.br, victormendes@cpdee.ufmg.br

Abstract— The number of wind farms has grown in the Brazilian market and they are established in several countries. Among the wind turbine technologies, the technology doubly fed induction generator (DFIG) is the most widespread due to its characteristic of being operated at variable speed and its converter, which is connected to the rotor circuit, is dimensioned for partial power of the machine. However, grid codes of several countries do not allow immediate disconnection of a wind turbine during voltage sags in the electrical grid and the DFIG technology presents a certain fragility to these faults, since their stators are directly connected to the common connection point (PCC). One way to increase the robustness of DFIG against momentary voltage sags is using a dynamic voltage restorer (DVR). Therefore, with the help of MATLAB / SIMULINK software, this work presents a study of the application of the DVR to the DFIG, focusing on DVR's losses and transformer inrush currents.

Keywords— Wind power, doubly-fed induction generator, low voltage ride through, dynamic voltage restorer, transformer inrush currents and power losses.

Resumo— O número de usinas eólicas cresce dentro do mercado brasileiro e já está consolidada em diversos países. Dentre as tecnologias de aerogeradores, a tecnologia que utiliza geradores de indução duplamente alimentados ou “doubly-fed induction generator” (DFIG) é a mais difundida devido à sua característica de poder funcionar a velocidade variável e seu conversor, que é conectado ao circuito do rotor, ser dimensionado para apenas uma potência parcial da máquina. Todavia, os códigos de rede de vários países não permitem a desconexão imediata de um aerogerador perante faltas na rede elétrica, sendo que a tecnologia DFIG apresenta certa fragilidade a essas faltas, uma vez que, os estatores dos geradores são conectados diretamente ao ponto de conexão comum (PCC) da rede elétrica. Uma das formas de se aumentar a suportabilidade do DFIG perante afundamentos momentâneos de tensão é utilizando um restaurador dinâmico de tensão ou “dynamic voltage restorer” (DVR). Logo esse trabalho, com o auxílio do software MATLAB/SIMULINK, apresenta um estudo da aplicação do DVR ao DFIG, com ênfase nas perdas do DVR e nas correntes de *inrush* do transformador.

Palavras-chave— Energia eólica, gerador de indução duplamente alimentado, restaurador dinâmico de tensão, afundamentos momentâneos de tensão, correntes de *inrush* em transformadores e perdas elétricas.

1 Introdução

Dentre as tecnologias de aerogeradores, tem-se que, a com gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) e a de gerador síncrono com ímãs permanentes ou *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) são as mais aplicadas, devido à sua maior eficiência para diversas velocidades do vento (YARAMASU et al., 2015). Contudo o DFIG, como mostra a Fig. 1, possui ainda a vantagem de ter um menor custo, uma vez que seus conversores são conectados ao rotor e possuem somente uma parcela da potência nominal da máquina, geralmente 30%.

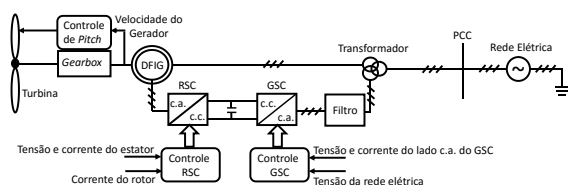


Figura 1 - Aerogerador com Tecnologia DFIG.

Entretanto o DFIG tem seu estator conectado diretamente ao ponto de conexão comum (PCC), a não ser por um transformador, e durante afundamentos momentâneos de tensão (AMTs), altas correntes são induzidas no rotor, bem como, elevadas oscilações no torque eletromagnético. Estas anormalidades podem

danificar o conversor do DFIG bem como trazer danos mecânicos ao gerador (WESSELS; GEBHARDT; FUCHS, 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 (ONS, 2009), em que os aerogeradores devem operar acima desta curva durante um AMT.

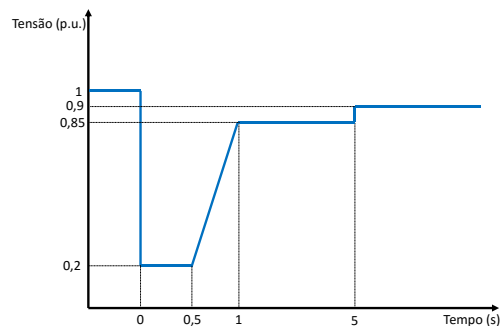


Figura 2 - Curva de suportabilidade de aerogeradores a afundamentos de tensão pelo código de rede brasileiro [3].

Existem várias formas de se tentar melhorar a suportabilidade do DFIG perante AMTs, sendo os mais comuns a utilização de dispositivos *crowbar* e STATCOM. Porém, o primeiro não impede as oscilações de torque eletromagnético, enquanto o

segundo necessita de elevada potência, tendo alto custo.

Esses dois problemas podem ser contornados com o uso de um DVR que restaura a tensão no PCC. Como o mesmo opera apenas em intervalos de tempo muito curto, sua potência pode ser menor do que a potência do gerador eólico (IBRAHIM et al., 2011).

Deste modo, este trabalho apresenta toda a modelagem do DVR aplicado ao DFIG, discutindo dois aspectos primordiais para sua implantação ao aerogerador, que são suas perdas e as correntes de *inrush* de seu transformador. Ainda é apresentado resultados de simulação que comparam a dinâmica do DFIG com e sem o DVR.

2 Modelagem e Controle do DFIG

Para simulação do aerogerador DFIG, foi primeiramente implementado o modelo da máquina de indução com rotor bobinado, como pode ser obtido em (NOVOTNY; LIPO, 1996). Este modelo de 5ª ordem em coordenadas síncronas ($dq0$) possui duas equações para a dinâmica do estator, duas para a dinâmica do rotor e uma para o torque eletromagnético da máquina.

Quanto aos conversores do DFIG, os mesmos apresentam um controle clássico em coordenadas síncronas, como pode ser visto em (PENA; CLARE; ASHER, 1996). Assim o conversor do lado do rotor ou *rotor side converter* (RSC) é responsável por controlar a potência ativa e reativa do estator (P_s e Q_s), enquanto o conversor do lado da rede ou *grid side converter* (GSC) controla a tensão do barramento c.c. (v_{cc}^{GSC}) e sua potência reativa (Q^{GSC}). Ainda no RSC, 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. A Fig. 3 apresenta em síntese o controle aplicado ao DFIG.

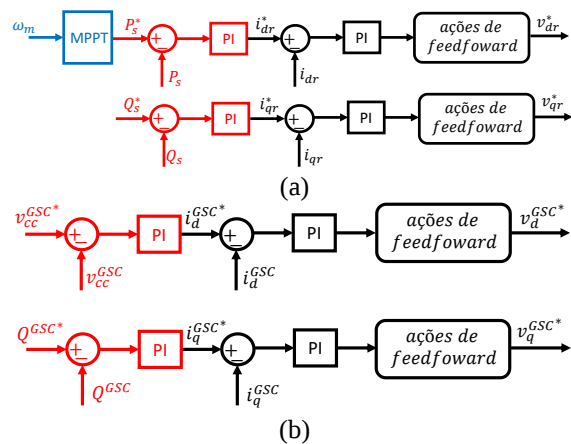


Figura 3 - Controle dos conversores (a) RSC e (b) GSC.

3 Modelagem e Controle do DVR

A forma mais clássica de se implementar o DVR ao DFIG é adicionando-o em série com o último, como mostra a Fig. 4(a). Como se nota, o DVR possui um

retificador para carregar o barramento c.c. e um inversor para controlar as tensões a serem induzidas na linha por um transformador trifásico. Na saída do inversor há ainda um filtro passa-baixas LC para filtrar os harmônicos de corrente.

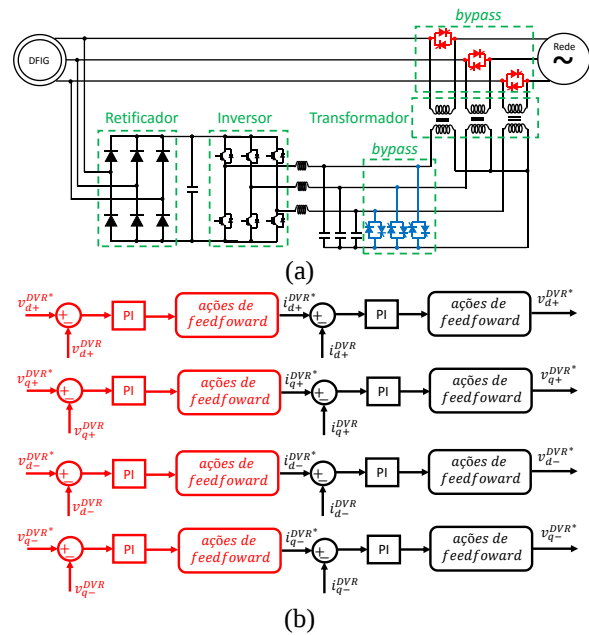


Figura 4 - (a) DVR aplicado ao DFIG, (b) Malha de controle do DVR.

A malha de controle do inversor foi implementada como mostrado no diagrama da Fig. 4(b), em que as variáveis se encontram no referencial síncrono. As malhas internas controlam a corrente do lado c.a. do inversor, enquanto as malhas externas controlam a tensão induzida pelo DVR na linha. Detalhes sobre o controle do DVR podem ser encontrados em (IBRAHIM, NGUYEN, et al., 2011) e (WESSELS, GEBHARDT e FUCHS, 2011).

Como o AMT na rede elétrica pode ser desequilibrado, foi necessário também implementar malhas que controlem as componentes de sequência positiva e negativa. Várias técnicas para desacoplar as componentes de sequência negativa das componentes de sequência positiva podem ser encontradas em (TEODORESCU, LISERRE e RODRÍGUEZ, 2011), referenciadas neste trabalho como *Decoupled Double Synchronous Reference Frame*.

O DVR ainda pode funcionar com três estratégias distintas para restaurar de tensão:

- 1ª estratégia: o DVR permanece conectado a linha durante todo o tempo;
- 2ª estratégia: o transformador do DVR permanece conectado a linha durante todo tempo, porém o inversor opera somente durante os AMTs;
- 3ª estratégia: o DVR opera somente durante os AMTs.

A 1ª estratégia tem como a principal vantagem a imediata atuação do DVR para qualquer AMT na rede elétrica e elimina a necessidade de semicondutores

para se fazer o *bypass* do dispositivo. Além disso, pode ser utilizado com um filtro série, para compensação de harmônicos de tensão. Sua principal desvantagem é as perdas de condução e chaveamento dos semicondutores do inversor na ausência de um AMT, além das perdas referentes a impedância do transformador que ocorrem na ausência de qualquer distúrbio.

Já a 2ª estratégia, também possui a desvantagem das perdas no transformador e precisa que o inversor sofra um *bypass* (SCRs em azul da Fig. 4(a)), curto-circuitando o primário do transformador (lado conectado ao DVR).

Por fim, a 3ª estratégia é a que mais minimiza as perdas, uma vez que todo o conjunto do DVR sofre o *bypass* (SCRs em vermelho da Fig. 4(b)).

4 Perdas de Energia no DVR

Como dito anteriormente, todas estratégias de aplicação do DVR possuem perdas. Para se mensurar as perdas é importante a modelagem do transformador e dos semicondutores do inversor.

Assim, para o cálculo das perdas, foi considerado um transformador com a potência e a tensão nominais iguais a do DFIG, com uma impedância de 0,05p.u e uma relação X/R = 10, estando em conformidade com a (IEC - 1992). O valor da indutância de magnetização e a resistência que simboliza as perdas no núcleo assumiram o valor de 200 p.u. cada. Já as resistências dos indutores do filtro LC assumiram um valor 2mΩ, um valor cem vezes menor que a reatância indutiva do filtro.

Já para os IGBTs do inversor, foi adotado o modelo FZ1800R17HP4_B29 da Infineon, que possui uma tensão entre coletor e emissor de 1700V e uma corrente nominal de 1800A. Já o modelo para os tiristores de *bypass* das estratégias 2 e 3 foi o T880N também da Infineon, que suposta uma tensão reversa máxima de 1800V e uma corrente média de 880A.

A Fig. 5(a) mostra as perdas no conversor para a 1ª estratégia, variando a corrente do DFIG de um valor nulo até seu valor nominal. O inversor adotado foi de dois níveis e a temperatura de junção dos semicondutores em 125°C.

Como se observa, as perdas são divididas em condução e chaveamento, sendo contabilizadas para os seis IGBTs e para os seis diodos de retorno. Nota-se que a maior parcela das perdas se deve ao chaveamento dos IGBTs, sendo que na potência nominal as perdas totais do inversor atingem 1,1%.

As perdas devido às resistências dos enrolamentos do transformador e das resistências dos indutores dos filtros estão na Fig. 5(b), o que eleva as perdas da 1ª estratégia, podendo atingir um valor máximo de 3,5%.

É interessante observar nesta figura que, à medida que a potência gerada pelo DFIG aumenta, as perdas no transformador trifásico se torna mais significativa que as perdas no conversor. Além disso, as perdas no filtro também possuem um valor significativo, uma vez que na ausência de AMTs, as correntes trifásicas do DFIG atravessam o filtro.

Deve-se ainda atentar que é possível melhorar a eficiência do conversor, diminuindo sua frequência de chaveamento. Outra observação é que não foram mensuradas as perdas no retificador à diodos para esta estratégia, devido à baixa corrente que atravessa o mesmo em regime permanente e sem a existência de AMTs.

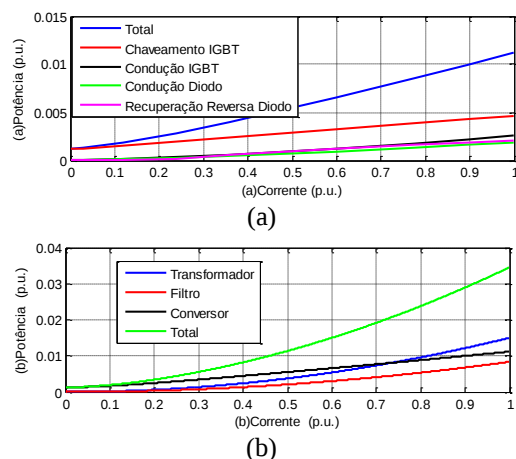


Figura 5 – Perdas de energia (a) do inversor e (b) total para 1ª estratégia do DVR aplicado ao DFIG.

Já a Fig. 6 apresenta as perdas para a 2ª estratégia. Nesse caso, as perdas são devidas somente a impedância do transformador e a condução dos SCRs que fazem o curto-circuito do primário do transformador. Com o DFIG gerando a potência nominal a perda máxima desta estratégia é de cerca de 1,8%, sendo que a maior parte desta perda se deve a impedância dos enrolamentos do transformador.

Por último, a 3ª estratégia possui perdas somente devido aos seis SCRs que fazem o *bypass* do DVR na ausência de AMT, como representa a Fig. 7. As suas perdas são bem menos significativas que as estratégias anteriores, atingindo um valor máximo de aproximadamente 0,3%.

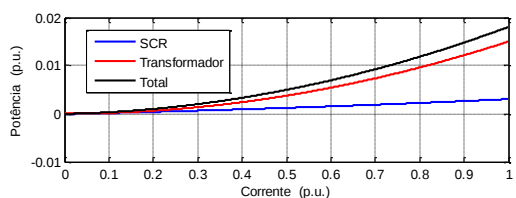


Figura 6 – Perdas de energia para 2ª estratégia do DVR aplicado ao DFIG.

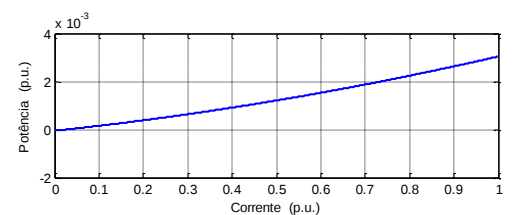


Figura 7 - Perdas energia para 3ª estratégia do DVR aplicado ao DFIG.

Apenas como forma de se comparar as perdas nas três estratégias, tem-se que quando o aerogerador gera

sua potência nominal e nenhum AMT há na rede elétrica, as perdas da 1ª estratégia e 2ª estratégia são 11,67 e 6 vezes maior que a da 3ª estratégia, logo esta última será utilizada para os próximos resultados.

5 Corrente de Inrush

Quando ocorrer um AMT na rede elétrica, o DVR tentará restaurar a tensão para os terminais do DFIG. Logo, a tensão nos terminais do transformador do DVR eleva-se, e dependendo do fluxo residual do mesmo, pode ocorrer sua saturação. Com isso, sua impedância do ramo de magnetização diminui e faz com que apareça as correntes de *inrush* durante o transitório de energização.

Como o DVR é projetado para operar em intervalos de tempo pequenos, somente para compensar o AMT, estas correntes de *inrush* podem prejudicar seu desempenho. Observando a Fig. 8, tem-se que a distorção da corrente de magnetização i_m^{trafo} , acarreta na deformidade das correntes do primário e secundário i_1^{trafo} e i_2^{trafo} . Estas correntes são utilizadas para o controle do DVR, podendo fazer com que este injete tensões distorcidas e que impactará no desempenho do DFIG.

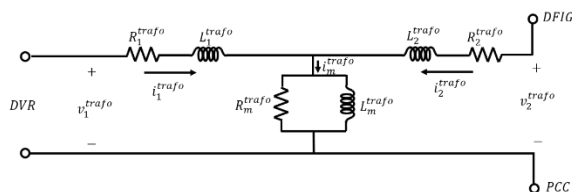


Figura 8 – Circuito equivalente monofásico de um transformador.

Logo, a melhor estratégia para se evitar a saturação do transformador é seu sobredimensionamento, mesmo que isso acarrete em um maior custo. A Tabela I apresenta 4 transformadores. O primeiro apresenta uma potência igual ao do gerador DFIG e uma tensão nominal igual a tensão de fase da rede. O segundo possui o dobro da potência, o terceiro o dobro da tensão e o quarto é sobredimensionado nas duas variáveis.

TABELA I. TRANSFORMADORES PARA O DVR

Transformador	Potência	Tensão (rms)
1	2MW	690V
2	4MW	690V
3	2MW	1380V
4	4MW	1380V

Para cada transformador a curva de magnetização em p.u é modelada pelos pontos (0 e 0), (0,001 e 1,35), (0,005 e 1,5) e (0,25 e 1,6), sendo a primeira coordenada a corrente de magnetização (i_m^{trafo}), enquanto a segunda coordenada representa o fluxo de magnetização (ψ_m^{trafo}). Estes pontos são interligados por retas e assim as curvas de magnetização foram construídas.

Assim, a Fig. 9(a) mostra para uma base comum (no caso a do transformador 1) as curvas de

magnetização para os 4 transformadores. Como é possível observar, para os transformadores 3 e 4, o valor de ψ_m é cerca de duas vezes maior que nos transformadores 1 e 2 para que ocorra a saturação, o que se apresenta como uma vantagem.

Já na Fig. 9(b), é representado novamente as curvas de magnetização dos transformadores, porém com maior detalhe para a saturação dos mesmos. Nota-se que a curva de saturação dos transformadores 3 e 4 são mais inclinadas, logo para uma mesma variação do enlace de fluxo de magnetização, a variação da corrente de magnetização destes transformadores é menor, o que impacta em menores correntes de *inrush* se comparados aos transformadores 1 e 2.

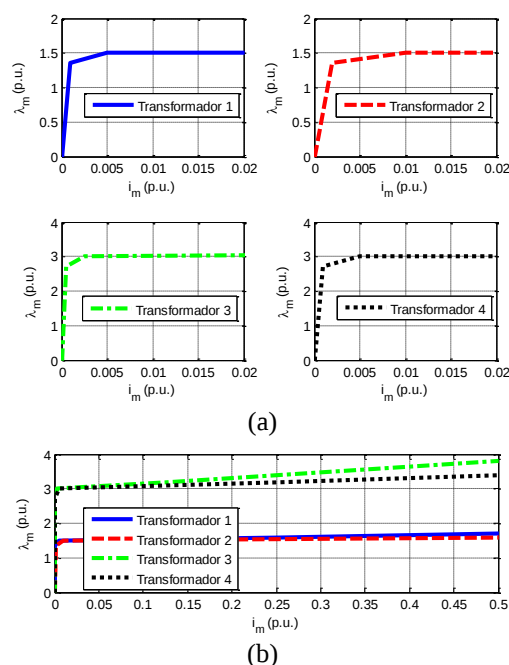


Figura 9 - Curvas de magnetização dos transformadores do DVR com foco em (a) nos valores em que ocorre a saturação e (b) na saturação.

Apenas para representar a resposta do DVR quando seu transformador satura, é adotado para o mesmo o transformador 1, que possui potência e tensão nominais igual ao do gerador. Na presença de um AMT trifásico entre 1 e 1,5s, com tensão residual no PCC de 0,2 p.u., o enlace de fluxo e a corrente de magnetização do transformador da fase A, assumem o aspecto indicado na Fig. 10. Assim sendo, toda vez que o enlace de fluxo ultrapassa o limiar de 1,5 p.u., a corrente de magnetização eleva-se consideravelmente, ocasionando as correntes de *inrush*.

Devido as distorções na corrente do transformador, o controle do DVR não funciona corretamente e injeta tensões distorcidas como apresentado na Fig. 11, prejudicando o desempenho do DFIG.

Portanto, ao final desta análise, o transformador 3 seria o de melhor característica para se evitar a saturação, contudo o mesmo possui uma corrente nominal que é apenas a metade da corrente nominal do aerogerador. Logo, o transformador 4 é mais apto a ser aplicado ao DVR para a 3ª estratégia e será o adotado na seção a seguir.

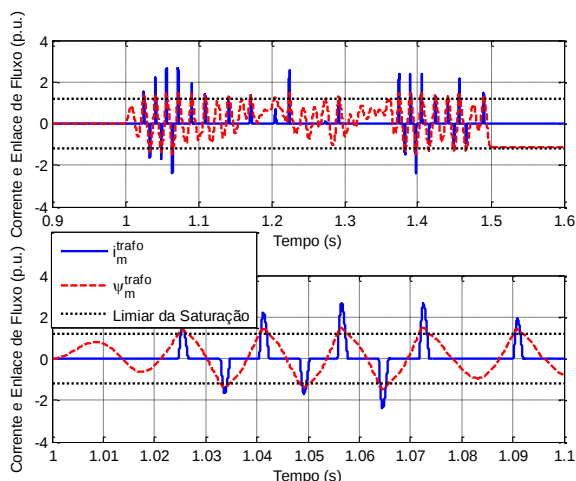


Figura 10 – Enlace de fluxo e corrente de magnetização com o transformador do DVR saturado.

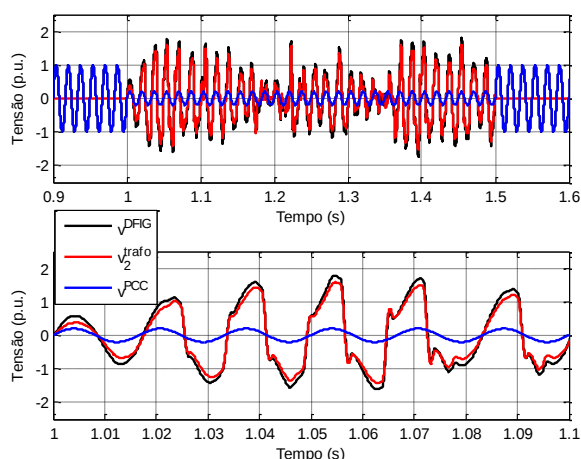


Figura 11 – Tensão no DFIG, imposta pelo DVR e no PCC com o transformador do DVR saturado.

6 DVR aplicado ao DFIG

Para apresentar como o DVR melhora a suportabilidade do DFIG perante AMTs na rede elétrica, os resultados a seguir apresentam o comportamento do aerogerador para um AMT bifásico com tensão residual no PCC de 0,2 p.u. durante 0,5 segundos. Esta amplitude de afundamento de tensão é a maior no qual o aerogerador ainda deve permanecer conectado, como já visto na Fig. 2 (ONS, 2009).

O gerador também estará operando com potência máxima na velocidade de vento nominal, onde os efeitos de distúrbio na rede são mais severos para o aerogerador. Outra observação é que foi utilizada a 3ª estratégia para a aplicação do DVR ao DFIG. Portanto, o mesmo entra em operação somente quando a tensão de sequência positiva do PCC fica abaixo de 0,9p.u. e é desconectado 0,1s após a tensão ficar acima do mesmo limiar, utilizando para a detecção do AMT uma PLL (*phase-locked loop*).

Esse tempo em que o DVR permanece conectado após o término do AMT, é necessário pelo fato de que de quando a tensão no PCC restaura, o DVR ainda estará injetando uma tensão pelo transformador série, o que ocasiona momentaneamente uma sobretensão no DFIG. Com um pequeno intervalo de tempo, o controle

do DVR faz com que o mesmo injete uma tensão aproximadamente nula e permita sua desconexão. Caso o DVR seja desconectado imediatamente quando a PLL detectar que a tensão no PCC foi restaurada, pode-se ter uma variação brusca na tensão do DFIG, o que impactará prejudicialmente em sua dinâmica.

Deste modo, na Fig. 12 são apresentadas as tensões de linha no PCC, DVR e nos terminais do estator do DFIG para o AMT bifásico. Como se percebe, o DVR restaura a tensão nos terminais do DFIG.

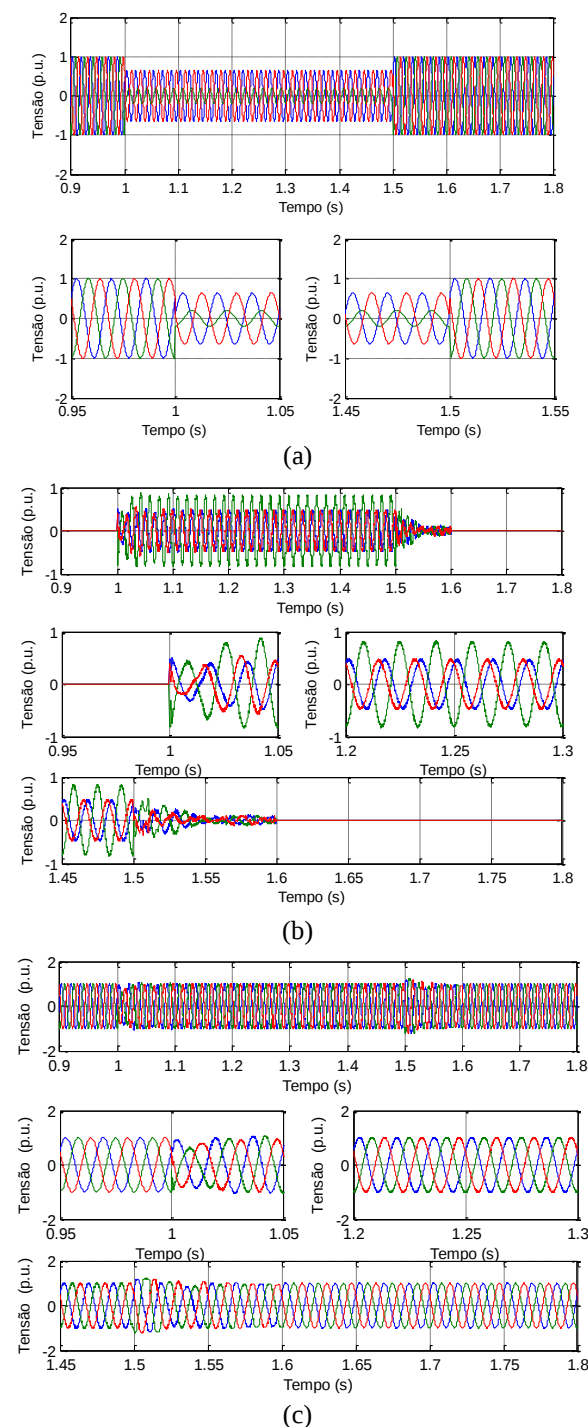


Figura 12 – Tensão de linha (a) da rede elétrica, (b) do DVR e (c) do DFIG para um AMT bifásico.

Enfim, na Fig. 13 é apresentado o comportamento da corrente do rotor e do torque eletromagnético do

gerador para os casos com e sem DVR. Como se observa, para com o DVR, a corrente do rotor e o torque eletromagnético apresentam transitórios no início e fim do AMT, que se devem ao tempo que a malha de controle demora para conseguir estabilizar a tensão. Contudo sem o DVR, os mesmos se distorcem e apresentam grandes oscilações, mesmo após o fim do AMT. Estes distúrbios são responsáveis pelos danos elétricos nos conversores e mecânicos no aerogerador, mostrando a importância de se melhorar a robustez do DFIG perante faltas na rede elétrica.

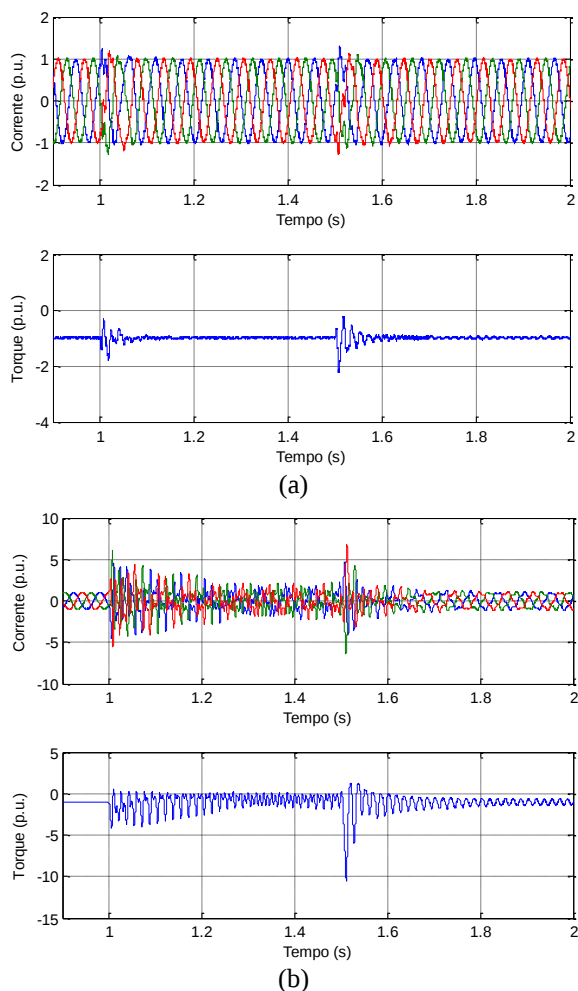


Figura 13 - Corrente no rotor e torque eletromagnético para um AMT bifásico (a) com o DVR e (b) sem DVR.

7 Conclusão

Ao final deste trabalho foi apresentado como o DVR é capaz de restaurar a tensão nos terminais do estator do DFIG durante AMTs, melhorando a suportabilidade do aerogerador durante tais faltas.

Ainda foram expostas três estratégias distintas para se aplicar o DVR ao DFIG, mostrando que as perdas se tornam bem menores para a situação em que o restaurador de tensão sofre o *bypass* na ausência de AMTs.

Por fim, foi evidenciado que a elevação da potência e tensão nominais do transformador do DVR, evitam o surgimento de altas correntes de *inrush*, que

prejudicam a tensão a ser imposta pelo DVR e pode causar danos ao seu conversor.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- 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. 26, n. 3, p. 871 - 882, Março 2011.
- IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electrical Equipment – Data for Short-Circuit Current Calculations in Accordance with IEC 909 (1988)*. [S.l.], p. 12 - 19. 1992.
- LÓPEZ, J. et al. Dynamic Behavior of the Doubly Fed Induction Generator During Three-Phase Voltage Dips. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, v. 22, n. 3, p. 709 - 717, Setembro 2007.
- 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.
- 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.
- PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, v. 143, n. 3, p. 231 - 241, Maio 1996.
- RODRIGUEZ, 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*. 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. 26, n. 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.