

Análise da Operação de um DVR para Proteção de Aerogeradores com Tecnologia DFIG Frente a Afundamentos de Tensão

Edmar Ferreira Cota

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -
Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos
6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.
edmar.elc@gmail.com

Victor Flores Mendes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -
Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos
6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.
victormendes@cpdee.ufmg.br

Resumo— A energia eólica pode ser considerada como uma das energias renováveis mais aplicadas para geração de eletricidade. Dentre as tecnologias de aerogeradores existentes, a tecnologia que utiliza geradores de indução duplamente excitados ou doubly-fed induction generator (DFIG) é a que possui maior mercado, devido à sua alta eficiência e baixo custo se comparada as outras tecnologias. Todavia os códigos de rede de vários países não permitem a desconexão imediata de um aerogerador perante faltas na rede elétrica, sendo o DFIG uma tecnologia que apresenta certa fragilidade a essas faltas, uma vez que seu estator é conectado diretamente ao ponto de conexão comum (PCC). Logo o DFIG necessita de alguma proteção para continuar em operação durante tais distúrbios na rede elétrica. Assim, neste trabalho é apresentado simulações no software Matlab/Simulink, utilizando um restaurador dinâmico de tensão ou dynamic voltage restorer (DVR), para aumentar a robustez de um aerogerador DFIG de 2MW perante afundamentos momentâneos de tensão (AMTs) na rede elétrica. Ainda é feito uma análise da corrente de inrush que pode ocorrer no transformador do DVR.

Palavras Chave— energia eólica, gerador de indução duplamente excitado, restaurador dinâmico de tensão, afundamentos momentâneos de tensão, corrente de inrush em transformadores.

I. INTRODUÇÃO

Dentre as energias renováveis, a que apresenta maior crescimento nas últimas décadas é a energia eólica. 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 [1].

Quanto as tecnologias de aerogeradores existentes, as mesmas podem ser agrupadas nos aerogeradores a velocidade fixa e a velocidade variável. Esse segundo grupo, mais usual, possui a vantagem em relação ao primeiro, pois consegue maior extração de potência para diversas velocidades do vento. Ainda nesse segundo grupo, a tecnologia DFIG é a mais aplicada, pois como os conversores são conectados ao rotor, os mesmos podem

ser de menor potência, o que diminui seus custos [2]. A Figura 1 representa o aerogerador com a tecnologia DFIG.

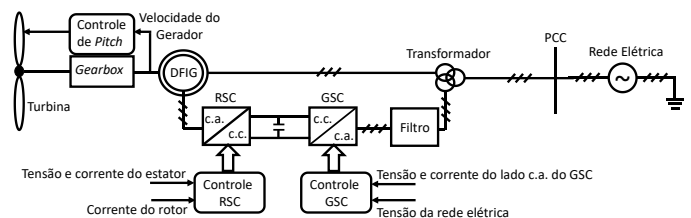


Fig. 1. Aerogerador com Tecnologia DFIG.

Contudo a tecnologia DFIG apresenta certa fragilidade quando ocorrem AMTs na rede, que por consequência diminuem a tensão no PCC. Na presença de tais distúrbios, altas tensões e correntes podem ser induzidas no rotor do gerador, elevando a tensão do barramento c.c. e podendo provocar danos permanentes aos conversores [2].

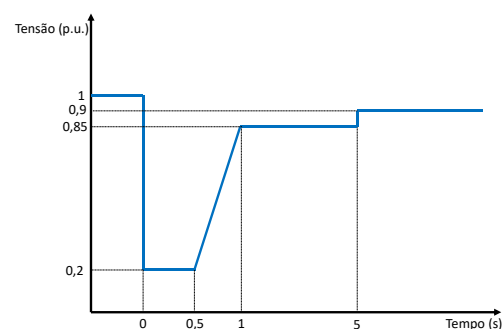


Fig. 2. Curva de suportabilidade de aerogeradores a afundamentos de tensão pelo código de rede brasileiro [3].

Nos códigos de rede atuais, se faz necessário que o aerogerador continue conectado à rede mesmo durante um AMT. A Figura 2 mostra a curva de suportabilidade de aerogeradores para o código brasileiro. Como se nota, apenas para afundamentos de tensão abaixo de 0,2p.u., é que o aerogerador pode se desconectar imediatamente.

A partir do próximo item serão apresentadas as modelagens da turbina eólica, do DFIG e DVR.

II. TURBINA EÓLICA

Para a simulação do aerogerador DFIG, deve-se primeiro modelar a turbina eólica, e a caixa de transmissão (*gearbox*) que estabelece a relação de velocidades entre o gerador e a turbina. Essa modelagem foi feita segundo [4], em que a potência absorvida pela turbina (P_t) dada por

$$P_t = [\rho A V^3 C_p(\beta, V, \omega_t)]/2, \quad (1)$$

depende da densidade do ar (ρ), da velocidade do vento (V), da área varrida pelas pás (A) e de um coeficiente de potência variável (C_p), que por sua vez depende do ângulo da pá (β) e da velocidade da turbina (ω_t).

Assim para cada velocidade do vento, existe uma velocidade da turbina (e consequentemente um valor para velocidade do gerador) que permite um valor otimizado de coeficiente de potência e, portanto, uma potência máxima absorvida pela turbina.

A Figura 3 representa para o aerogerador utilizado nas simulações, as curvas da potência do aerogerador e do coeficiente de potência pela velocidade do vento. Na região 1, o aerogerador permanece desconectado para velocidades de vento abaixo a velocidade de *cut-in* (4m/s). Entre essa velocidade e a velocidade nominal do vento (12m/s), região 2, a potência absorvida pela turbina eleva-se até os 2MW, mantendo o máximo valor do coeficiente de potência.

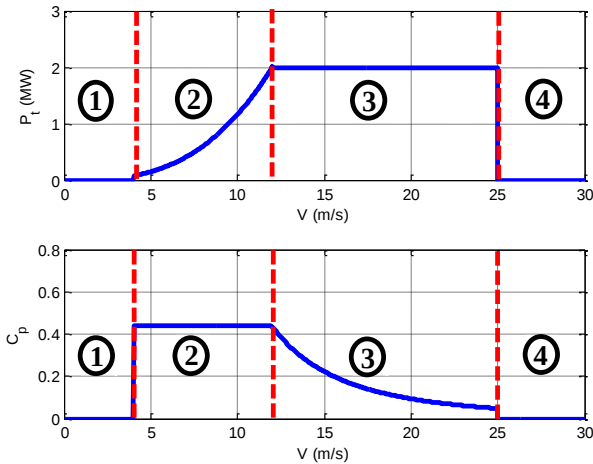


Fig. 3. Potência da turbina pela velocidade do vento.

Acima da velocidade nominal até a velocidade de *cut-off* (25m/s) a turbina pode alcançar velocidades perigosas, região 3. Logo é necessário exercer alguma ação para limitar a potência extraída pela turbina e consequentemente sua velocidade. Para o DFIG isso pode ser feito controlando os ângulos das pás (controle de *pitch*), que diminui o ângulo de ataque do vento sobre as pás. A modelagem desse controle pode ser encontrada em [5]. Acima da velocidade de *cut-off*, região 4, a turbina é desligada, evitando danos mecânicos.

III. AEROGERADOR DFIG

A tecnologia DFIG compreende de um gerador de indução com rotor bobinado, em que os conversores, na configuração *back-to-back*, são conectados ao rotor do gerador, como já demonstrado 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*).

Para implementação do aerogerador DFIG, primeiramente deve-se modelar a máquina de indução com rotor bobinado, como pode ser obtido em [6]. As equações do modelo da máquina em coordenadas síncronas ($dq0$) são dadas por:

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

Na equação acima todos subscritos $dq0$ se referem às coordenadas de eixo direto, de quadratura e de sequência zero respectivamente. Já s e r correspondem a estator e rotor. Os termos v , i e λ 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 é o torque 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 sequência 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 sequência positiva, negativa e zero. Por fim, a de se informar que o modelo da máquina considera o entreferro uniforme, despreza a saturação e perdas magnéticas, apresenta uma distribuição senoidal dos enrolamentos e enlaces de fluxo, resistências independentes da temperatura, relação de espiras unitárias entre rotor e estator [6].

Quanto aos conversores, os mesmos apresentam um controle clássico como em [7]. Assim o RSC é responsável por controlar a potência ativa e reativa que flui pelo estator da máquina. Para isso, o mesmo possui internamente as malhas de potência ativa e reativa do estator (P_s e Q_s), malhas que controlam a corrente do rotor em referencial girante no rotor (i_{dr} e i_{qr}). Deve-se ainda ressaltar, que externamente à malha de potência ativa, há um MPPT (*maximum power point tracking* ou seguidor do ponto

de máxima potência) 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).

Já o GSC possui malhas internas que controlam as correntes do lado c.a. do conversor em referencial síncrono (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, segundo [8].

A estratégia de chaveamento utilizada foi o SVPWM (*space vector pulse width modulation*), que permite maior aproveitamento da tensão do barramento c.c. [9]. Além disso, como as malhas de controle são em coordenadas girantes (dq), foi feito uso da DSOGI-PLL (*double second order generalized integrator phase locked loop*), que é uma PLL que apresenta maior robustez às faltas na rede [10]. A Figura 4 apresenta uma visão geral do controle aplicado ao DFIG.

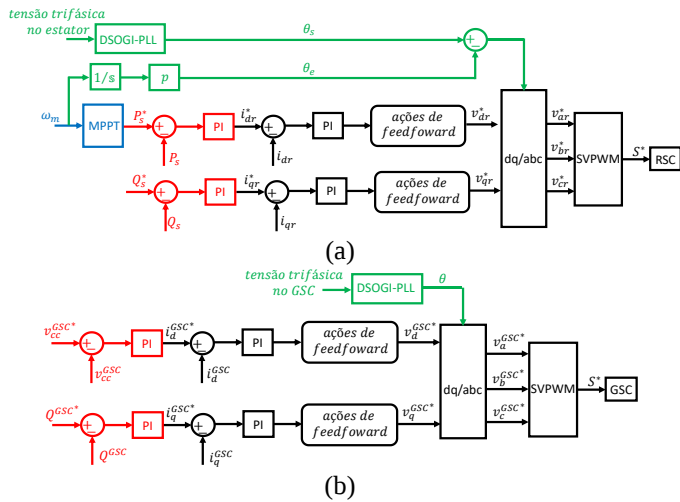


Fig. 4. Controle dos conversores (a) RSC e (b) GSC.

IV. DVR

Existem várias formas de se tentar melhorar a suportabilidade do DFIG perante AMTs. Por exemplo em [10], é utilizado controladores ressonantes para controlar as componentes de sequência negativa durante um afundamento assimétrico, melhorando o desempenho do DFIG perante tais faltas.

Ainda há diversos outros trabalhos que aplicam um dispositivo *crowbar* durante os AMTs, a fim de limitar as sobretensões e sobrecorrentes no rotor. Outro dispositivo que também é utilizado para proteção do DFIG é o STATCOM, que consegue restaurar a tensão nominal no PCC através do fluxo de potência reativa, fazendo com que o gerador sinta um menor impacto durante um afundamento.

Apesar do *crowbar* e o STATCOM serem aplicáveis para a situação proposta, o primeiro não consegue eliminar as oscilações de torque eletromagnético no gerador, que podem causar danos mecânicos, enquanto o segundo necessita de uma potência elevada para conseguir recuperar a tensão no PCC [12].

Esses dois problemas podem ser contornados com o uso de um DVR. Como o mesmo opera apenas em intervalos de tempo muito curto, sua potência pode ser bem menor do que a potência do gerador eólico [2], [12]. Ainda o DVR apresenta a versatilidade de poder ser aplicado apenas para um aerogerador, ou para um conjunto dos mesmos, dependendo da potência de cada turbina. Falta ainda na literatura uma comparação de custo entre um conjunto DFIG mais DVR com um aerogerador de conversores plenos.

A Figura 5(a) mostra o esquemático do DVR implementado, conectando-o a linha entre o DFIG e a rede elétrica. 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. Na saída do inversor há ainda um filtro passa-baixas para filtrar os harmônicos de corrente.

A malha de controle do inversor foi implementada como mostrado no diagrama da Fig. 5(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. Novamente se fez uso da DSOGI-PLL e da técnica de chaveamento SVPWM. Detalhes sobre o controle do DVR podem ser encontrados em [2], [12].

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 [13].

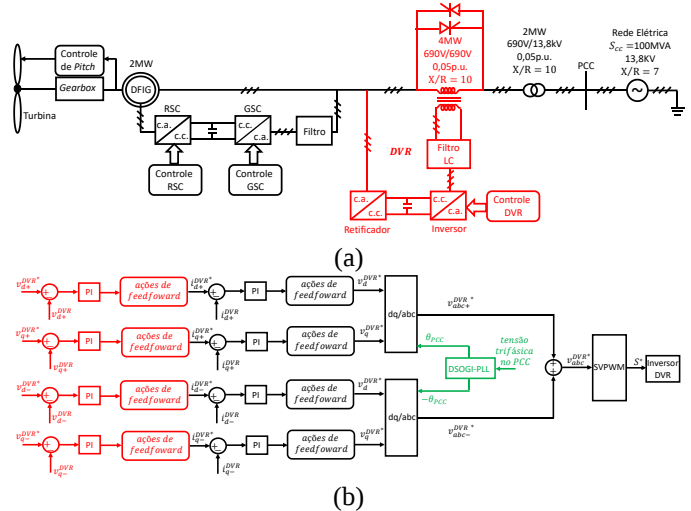


Fig. 5. (a) DVR aplicado ao DFIG, (b) Malha de controle do DVR.

V. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir mostram como o DVR atua para restaurar a tensão para o aerogerador com tecnologia DFIG quando ocorre AMT na rede elétrica. A simulação foi feita no software *Matlab/Simulink*.

Como visto na Fig. 2, segundo o código de rede brasileiro o aerogerador deve permanecer conectado para uma tensão residual no PCC de no mínimo 0,2 p.u. durante 0,5 segundos.

Logo, os afundamentos terão esse critério entre os instantes de 1 a 1,5 segundos. 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.

A. Afundamento Trifásico

Primeiramente é apresentado os resultados da atuação do DVR na proteção do aerogerador DFIG para um AMT trifásico equilibrado. Na Figura 6 é apresentado a tensão de linha no PCC (v_{PCC}), a tensão de linha nos terminais do estator do DFIG (v_{DFIG}) e a tensão de linha induzida pelo DVR (v_{DVR}).

Como se percebe, o DVR consegue restaurar a tensão nos terminais do estator do gerador, possuindo apenas um transitório no período inicial, devido ao tempo de atuação do DVR.

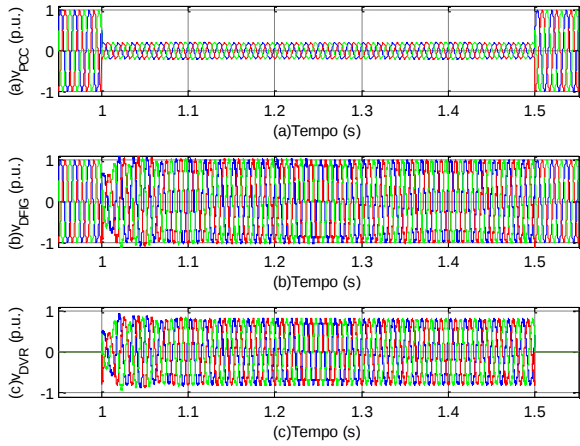


Fig. 6. v_{PCC} , v_{DFIG} e v_{DVR} para um AMT trifásico.

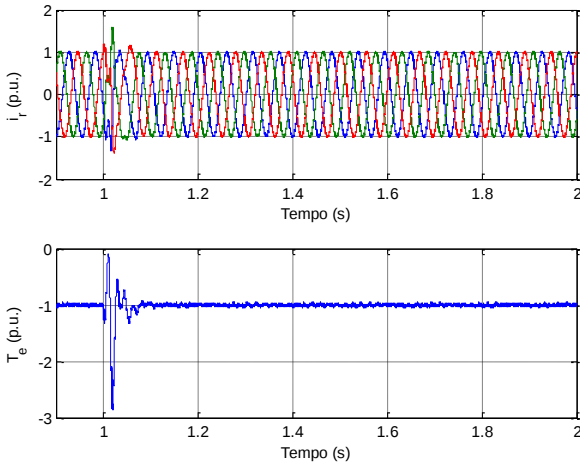


Fig. 7. i_r e T_e para um AMT trifásico com DVR.

Já na Fig. 7 é apresentada a corrente do rotor (i_r) e o torque eletromagnético (T_e) do gerador. Ambos apresentam oscilações no início do AMT, devido ao transitório da tensão no estator como visto na Fig. 6, estabilizando após isso.

Apenas como forma de visualizar os danos que podem ocorrer ao DFIG durante um AMT, a Figura 8 mostra novamente i_r e T_e para o caso sem DVR. Pode-se notar que, i_r apresenta uma distorção durante e após o AMT, devido a existência de

uma componente natural (transitória) de sequência positiva no enlace de fluxo do estator [14], alcançando valores de quase 2 p.u. e que possui um maior tempo de extinção, uma vez que a constante de tempo de geradores de maior porte são mais elevadas. Já T_e também apresenta oscilações mesmo após o fim do afundamento, causadas pelas distorções nos enlaces de fluxo e correntes do gerador.

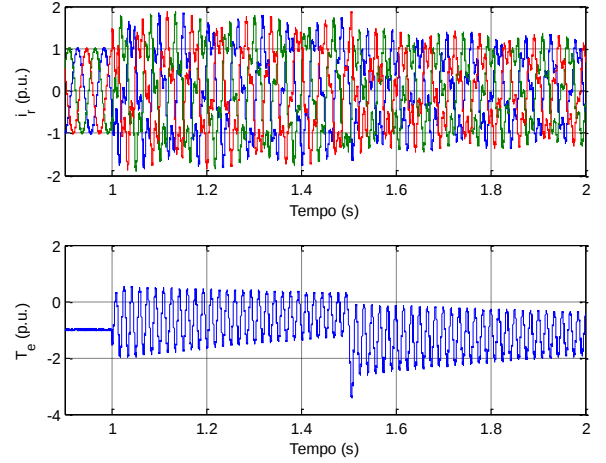


Fig. 8. i_r e T_e para um AMT trifásico sem DVR.

B. Afundamento Monofásico

Como forma de verificar a atuação do DVR para com o aerogerador DFIG durante AMT desequilibrados, foi dado um afundamento monofásico no PCC, sendo este o tipo de falta mais comum. Na Figura 9 é apresentada as tensões de linha v_{PCC} , v_{DFIG} e v_{DVR} para um AMT monofásico. Novamente é visto que a tensão nos terminais do estator do DFIG é restaurada durante a falta.

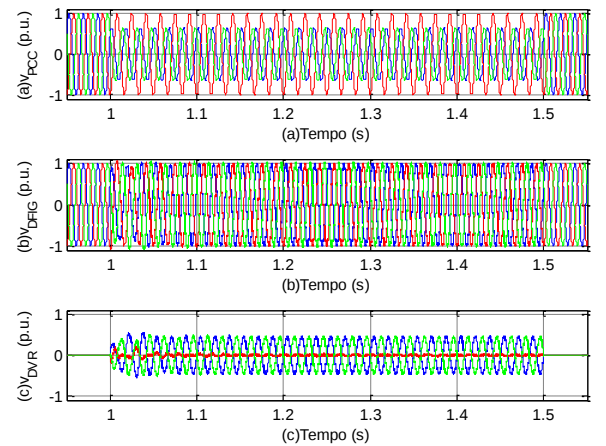


Fig. 9. v_{PCC} , v_{DFIG} e v_{DVR} para um AMT monofásico.

Uma observação é que no controle implementado no DVR, permite que o mesmo compense tensões de sequência positiva e negativa perante afundamentos desequilibrados, como já visto na Fig. 5(b), contudo não há compensação de tensão de sequência zero. Isso faz com que na tensão de fase no estator do gerador, apresente essa componente. Entretanto, como o estator

da máquina não é aterrado, a mesma não possui caminho para a circulação de uma corrente de sequência zero, não sendo necessária sua compensação.

As Figuras 10 e 11 apresentam i_r e T_e do gerador para com e sem o DVR. Novamente se nota um desempenho melhor para o caso em que o DFIG apresenta a proteção do DVR, diminuindo as distorções causadas devido o AMT. Deve-se observar ainda, que na presença de um distúrbio desequilibrado, além da componente natural que existe nos enlaces de fluxo e corrente do gerador, há ainda a existência de uma componente forçada (permanente) e natural de sequência negativa, o que agravar ainda mais a situação para o caso sem DVR, uma vez que a mesma não é controlada. Componentes de sequência zero não ocorrem, pois não há qualquer acoplamento entre o estator e o rotor da máquina.

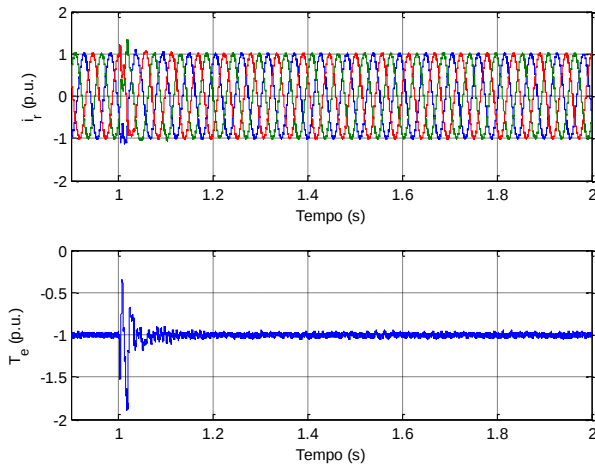


Fig. 10. i_r e T_e para um AMT monofásico com DVR.

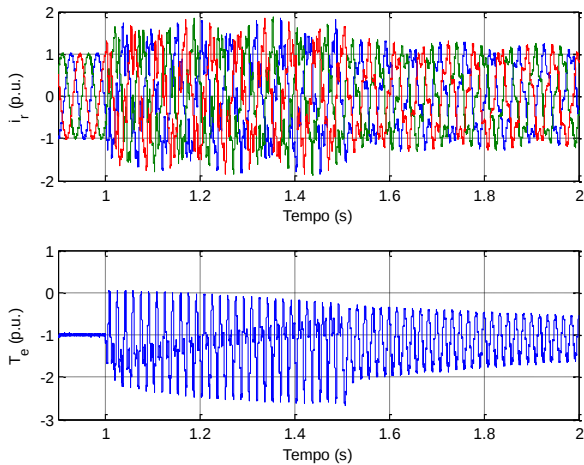


Fig. 11. i_r e T_e para um AMT monofásico sem DVR.

C. Corrente de Inrush do Transformador

O DVR entra em operação somente durante o AMT, sofrendo um bypass por tiristores colocados em paralelo com o transformador, como foi representado na Fig. 5(a). Isso evita perdas nas impedâncias do transformador e do filtro, além de eliminar as perdas de chaveamento e condução nos

semicondutores do conversor, quando não há nenhum AMT na rede elétrica.

Contudo, esse fato pode levar o transformador trifásico do DVR a saturar e ter uma elevada corrente de *inrush* cada vez que o mesmo entrar em operação. Esta corrente pode ocasionar o mal funcionamento do DVR, fazendo com que o mesmo insira tensões deformadas na linha, comprometendo seu objetivo.

Em [15] é proposto um limitador de corrente de *inrush* através de um grande reator, enquanto que em [16], os picos das tensões induzidas pelo DVR nos primeiros ciclos são deformados, para evitar o aumento do fluxo de magnetização do transformador. Porém como o DFIG é bem sensível a distorções na tensão, essas técnicas ainda assim causam aumento da corrente no rotor. Logo, a melhor estratégia é um sobredimensionamento do transformador, mesmo que isso acarrete em um maior custo do mesmo.

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	$690/\sqrt{3}V$
2	4MW	$690/\sqrt{3}V$
3	2MW	$1380/\sqrt{3}V$
4	4MW	$1380/\sqrt{3}V$

Para analisar os efeitos do sobredimensionamento do transformador em sua saturação, é considerado que todos possuem a mesma curva de magnetização em suas respectivas bases, dadas pelas potências e tensões nominais de cada um. Cada curva de magnetização em p.u. é composta por duas retas, dadas pelos pontos (0 e 0), (0,0024 e 1,2) e (1 e 1,52), sendo o primeiro ponto a corrente de magnetização (i_m) e o segundo ponto o fluxo de magnetização (λ_m).

Assim a Fig. 12(a) mostra para uma base comum (no caso a do transformador 1) as curvas de magnetização para os 4 transformadores. Como se observa, a inclinação da curva de saturação é maior para os transformadores 3 e 4, o que implica em uma maior indutância de magnetização.

Já a Fig. 12(b), mostra as curvas de magnetização, com foco nos valores de i_m e λ_m em que os transformadores começam a saturar. Tendo que reatância de magnetização é bem maior que a resistência dos enrolamentos e a reatância do fluxo de dispersão, pode-se considerar que o fluxo de magnetização é dado pela integral da tensão injetada pelo DVR. Assim, para uma mesma tensão, os transformadores 3 e 4 carecem de um maior λ_m para saturarem, representando uma melhor opção.

Os resultados apresentados para o DVR operando junto ao DFIG, mostrados anteriormente, foram feitos com o transformador 4, que apresenta uma maior corrente nominal e durante um AMT não apresentam sobrecorrentes.

Apenas para representar o mau desempenho do DVR, quando ocorre a saturação de seu transformador trifásico, é

representado na Fig. 13 a tensão imposta pelo mesmo ao DFIG durante um AMT trifásico para uma tensão residual de 0,2 p.u. no PCC. Neste caso utilizou-se o transformador 1.

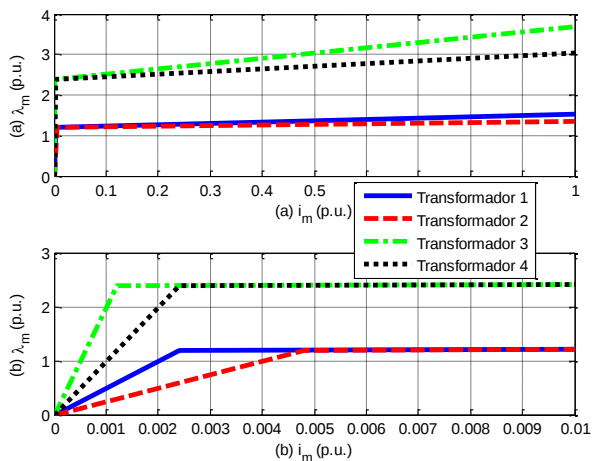


Fig. 12. Curva de magnetização dos transformadores do DVR.

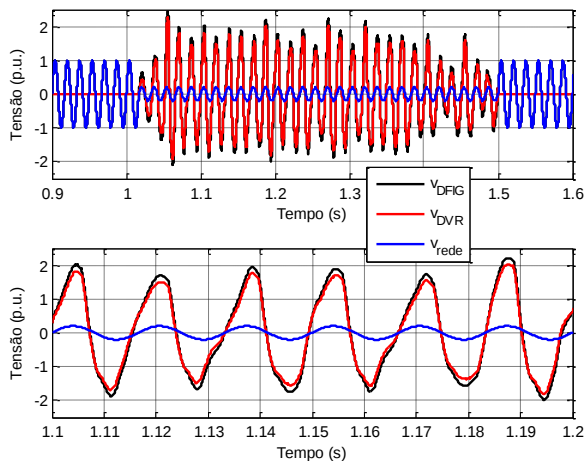


Fig. 13. Curva de magnetização dos transformadores do DVR.

VI. CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, foi demonstrado a modelagem de uma turbina eólica com tecnologia DFIG, bem como do DVR. Foi visto ainda como esse último pode melhorar o desempenho de aerogeradores DFIG durante afundamentos simétricos e assimétricos, reduzindo as oscilações de torque eletromagnético que causam danos mecânicos, bem como os picos das correntes no rotor do gerador, que danificam os conversores.

Ainda foi feita uma análise sobre a corrente de *inrush* no transformador do DVR, que podem danificar os conversores do DFIG e prejudicar o desempenho do DVR. Como visto, a melhor solução para o caso de uma carga muito sensível como o DFIG, é o aumento da tensão nominal do transformador, evitando sua saturação.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil e CEMIG/ANEEL através do projeto P&D470. Os autores também agradecem a Fapemig e ao CNPQ.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. Global Wind Statistics 2014, 2015.
2. 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.
3. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. Submódulo 3.6 - Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão à Rede Básica, 2009.
4. 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.
5. HANSEN, M. H. et al. Control Design for a Pitch-Regulated, Variable Speed Wind Turbine. IEA Wind Task 23, Roskilde, 2005.
6. NOVOTNY, D. W.; LIPO, T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. 1ª. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1996.
7. 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.
8. LISERRE, M.; BLAABJERG, L.; HANSEN, S. Design and control of an LCL-filter Based Three-Phase Active Rectifier, v. 41, n. 5, p. 1281-1291, 2001.
9. 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. 14, n. 1, p. 49 - 61, Janeiro 1999.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2011.
14. 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.
15. ARBOLEYA, P. et al. An Inrush Current Limiter as a Solution of Injection Transformer Oversizing in Dynamic Voltage Restores. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2009. ICEMS 2009, Tokyo, Novembro 2009. 1 - 6.
16. GAO, S. et al. Mitigation of Inrush Current in Dynamic Voltage Restorer Injection Transformers. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, Setembro 2012. 4093 - 4098.

