

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PROBLEMA FIDVR NA OPERAÇÃO DE UM DFIG SOB CONDIÇÕES DESBALANCEADAS

RAFAEL CRUZ BORGES*, RODRIGO ANDRADE RAMOS*

**Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Avenida Trabalhador São Carlense, 400, Centro, São Carlos, SP, Brasil, Cep 13566-590
E-mails: rcborges@ufmt.br, rodrigo.ramos@ieee.org)*

Abstract— This paper presents an analysis of the influence of the problem of Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR), caused by the presence of induction motors, in the operation of a doubly fed induction generator (DFIG) connected to a distribution system operating under unbalanced conditions. The aim of this analysis is to determine the effect of the FIDVR problem in the oscillations of a DFIG with a comparison among results of balanced and unbalanced conditions. It was observed that, in the operation of the induction motor under unbalanced condition, the average torque produced by the induction motor is smaller (when compared to the balanced case) due to the negative sequence component of the electromagnetic torque. Thus, the FIDVR effect is aggravated by the unbalanced conditions, and this has a direct impact on the damping of the oscillations of the DFIG. The damping and frequency of the oscillations are determined by the Prony method. The results showed a decrease in damping of the oscillations of the generator operating under unbalanced conditions when compared to the balanced condition. Furthermore, in extreme cases can lead to the loss of stability of the generator.

Keywords— Fault Induced Delayed Voltage Recovery, Low-Frequency Eletromechanical Oscillations, Doubly Fed Induction Generator, Three-phase Unbalanced Conditions, Distributed Generation.

Resumo— Este trabalho apresenta uma análise da influência do problema *Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR)*, causado pela presença de motores de indução, na operação de um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) conectado a um sistema de distribuição que opera sob condições desbalanceadas. O objetivo desta análise é determinar o efeito do problema FIDVR nas oscilações de um DFIG com uma comparação entre os resultados das condições balanceadas e desbalanceadas. Observou-se que, no funcionamento do motor de indução sob condição desbalanceada, o torque médio produzido pelo motor de indução é menor (quando comparado com o caso balanceado) devido a componente de sequência negativa do torque eletromagnético. Assim, o efeito FIDVR é agravado pelas condições desbalanceadas, e isso tem um impacto direto sobre o amortecimento das oscilações do DFIG. O amortecimento e a frequência das oscilações são determinados pelo método de Prony. Os resultados mostraram uma redução no amortecimento das oscilações do gerador que opera sob condições desbalanceadas, quando comparado com a condição balanceada. Além disso, em casos extremos, pode levar à perda da estabilidade do gerador.

Palavras-chave— *Fault Induced Delayed Voltage Recovery*, Oscilações Eletromecânicas de baixa Frequência, Gerador de Indução Duplamente Alimentado, Condições de Desbalanceamento Trifásicos, Geração Distribuída.

1 Introdução

O crescimento da demanda do Sistema Elétrico de Potência (SEP) a cada ano, exige o aumento na produção de energia elétrica para garantir a operação segura do sistema. Como resultado, uma alternativa que vem crescendo atualmente é a utilização das fontes alternativas de energia, como por exemplo, a geração eólica conectada à rede de distribuição, sendo o foco das análises desse trabalho.

As características das cargas desempenham um papel importante no comportamento dinâmico do sistema de potência. Nos últimos anos, tem aumentado a preocupação com o modelo de carga de motores de indução, especialmente os utilizados em aparelhos de ar condicionados, já que constituem uma grande parte das cargas do sistema de potência (CHEN, 2011). Verificou-se que, na ocorrência de faltas no sistema, o comportamento *stall* dos motores (efeito de rotor bloqueado) pode proporcionar um atraso na recuperação da tensão, o que pode potencialmente causar um efeito cascata em outros motores de indução dentro do mesmo alimentador ou nas suas proximidades e, eventualmente causar um colapso de tensão no sistema (CHEN, 2011).

Esse atraso na recuperação da tensão ocasionado por motores de indução é conhecido como *Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR)*. Sendo assim, esse trabalho analisa a influência desse problema no gerador de indução duplamente alimentado (DFIG).

Muitas concessionárias de energia no sudoeste, centro-oeste e sul dos Estados Unidos relataram eventos de FIDVR em suas redes de transmissão e subtransmissão (Bravo et al., 2014).

Em (Miller and Shao, 2014), foi detectado o problema de FIDVR através da conexão de um painel fotovoltaico ao sistema de distribuição, que por sua vez, estava conectado ao sistema de transmissão. Uma falta foi aplicada na barra de transmissão para analisar o problema. A falta ocorreu em 0,5 s e foi eliminada poucos ciclos depois, causando um afundamento de tensão na barra dos motores. A tensão demorou em torno de 1,0 s para se recuperar após a eliminação da falta. A velocidade do motor teve uma recuperação lenta, sendo um sintoma característico do problema FIDVR.

Com o crescimento dos sistemas de potência e de suas interconexões e com a operação do sistema em altas condições de carregamento, diferentes formas de instabilidade surgiram, tais como a instabili-

dade de tensão ou as oscilações eletromecânicas de baixa frequência (Kundur et al., 2004).

As oscilações eletromecânicas mal amortecidas que são o foco de estudo da estabilidade a pequenas perturbações, podem causar desgastes nas máquinas do sistema, restrições na capacidade de transferência de potência, e em casos extremos, podem provocar a perda de sincronismo dos geradores e a consequente interrupção no suprimento de energia elétrica. Essas oscilações eletromecânicas, que antes eram inerentes aos sistemas de transmissão, agora também são observadas no sistema de distribuição.

A maioria das análises da conexão desse tipo de fonte de energia são feitas para o sistema trifásico operando em condições balanceadas, embora seja um fato conhecido de que no sistema de distribuição está presente os desequilíbrios de tensão, muitas vezes proveniente do desbalanço de cargas.

Nos estudos relacionados a estabilidade a pequenas perturbações que são realizados nos sistemas de transmissão, incluem algumas simplificações como a operação balanceada do SEP. Para esses sistemas é usualmente válido linearizar o sistema em torno do ponto de equilíbrio e realizar as análises através do cálculo dos autovalores e autovetores.

Entretanto, com a conexão dos geradores diretamente no sistema de distribuição, os quais apresentam como característica o desbalanço de cargas e, devido a isso a linearização do sistema muitas vezes é válida considerando um pequeno desequilíbrio, o que em certos casos não é uma suposição válida para o sistema de distribuição.

Assim, esse trabalho utiliza uma técnica de estimação modal conhecida como método de Prony para identificação dos modos eletromecânicos de baixa frequência. Esse método busca representar o sinal de interesse através de um modelo matemático composto por uma soma de senoides amortecidas, sendo tradicionalmente adotado na análise e identificação de oscilações de baixa frequência.

Dentro dessa ideia este artigo visa analisar possíveis problemas que o fenômeno de FIDVR possam acarretar para a operação do DFIG conectado a sistemas de distribuição operando com desbalanço de cargas.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o problema FIDVR e o torque eletromagnético dos motores operando com tensões desbalanceadas, a seção III apresenta o modelo do DFIG e o modelo do desbalanço de carga utilizado. Na seção 4 o método de Prony é apresentado. Os resultados e discussões são apresentados na seção 5 e por fim, as conclusões são apresentadas na seção 6.

2 Declaração do Problema

2.1 FIDVR

Eventos de FIDVR são iniciados por faltas elétricas no sistema de transmissão e distribuição (Miller and Shao, 2014). Depois que a falta é eliminada, a

tensão pode permanecer em níveis significativamente reduzidos durante vários segundos. O atraso de tempo na recuperação da tensão é geralmente causado pela alta concentração de motores de indução e outras cargas com torque constante e baixa inércia, os quais começam a desacelerar substancialmente e simultaneamente com o a redução da tensão (Miller and Shao, 2014). Alguns motores podem desacelerar suficientemente para bloquearem seus rotores.

Com a desaceleração dos motores, o consumo de potência reativa da rede aumenta. Além disso, tais motores em condição de rotor bloqueado requerem altas correntes para saírem dessa situação (Miller and Shao, 2014). A combinação simultânea de alta demanda de potência reativa e ativa, faz com que a tensão do sistema permaneça em níveis baixos durante um período de tempo, normalmente alguns segundos, depois que a falta é eliminada (Miller and Shao, 2014).

Com o objetivo de analisar o efeito do problema FIDVR na geração eólica, torna-se importante entender o comportamento do torque eletromagnético do motor de indução trifásico (MIT) alimentado por tensões desbalanceadas. O desbalanço de tensão é provocado pelo desbalanço das cargas estáticas no sistema teste, conforme apresenta a seção 3.2.

2.2 Torque Eletromagnético dos Motores de Indução Operando com Tensões Desbalanceadas

Para as análises dos efeitos de tensões desbalanceadas aplicadas ao motor de indução, consideram-se os efeitos produzidos pelas tensões de sequência negativa, que somados aos da tensão de sequência positiva, resultam em um conjugado pulsante no eixo da máquina (de Oliveira, 2011).

Sob tensões desequilibradas, o torque médio é igual à soma algébrica do torque produzido pela componente de sequência positiva mais o torque produzido pela componente de sequência negativa (de Oliveira, 2011).

Uma análise do torque eletromagnético por meio do circuito elétrico equivalente do MIT pode ser realizado com base no circuito de sequência positiva e negativa (Anderson, 1995) e (de Oliveira, 2011), conforme Figs.1 e 2, respectivamente.

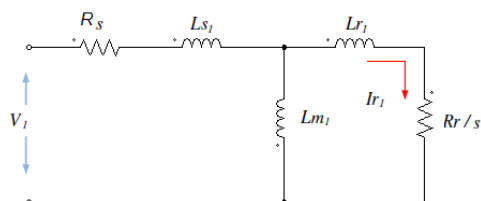


Figura 1. Circuito elétrico equivalente de sequência positiva por fase do MIT.

Nas Figs. 1 e 2 tem-se: V_1 e V_2 são as tensões do estator de sequências positiva e negativa, respectivamente; I_{r1} e I_{r2} são as correntes do rotor de sequências positiva e negativa, respectivamente; R_s e R_r são as resistências elétricas dos enrolamentos do estator e rotor, respectivamente; L_{s1} , L_{s2} , L_{r1} , L_{r2} ,

L_{m1} e L_{m2} são as indutâncias de seqüências positiva e negativa dos enrolamentos do estator, rotor e de magnetização, respectivamente.

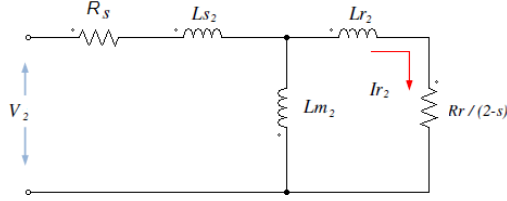


Figura 2. Circuito elétrico equivalente de seqüência negativa por fase do MIT.

Para o MIT alimentado com tensões equilibradas, a potência que atravessa o entreferro em [W] pode ser determinada por (Anderson, 1995) e (de Oliveira, 2011):

$$P_{g1} = \frac{3I_{r1}^2 R_r}{s} \quad (1)$$

onde s é o escorregamento do MIT. Assim o torque eletromagnético de seqüência positiva pode ser dado por:

$$T_1 = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{g1}(1-s)}{\omega_r} = \frac{P_{g1}}{\omega_s} = \frac{3I_{r1}^2 R_r}{s\omega_s} \quad (2)$$

onde ω_s e ω_r são as velocidades síncrona e do rotor em [rad/s].

Já para o MIT alimentado com tensões desbalanceadas, deve-se levar em conta a existência das componentes de seqüência negativa. A estas componentes associa-se um campo girante de mesma frequência, porém de rotação inversa em relação as componentes de seqüência positiva. Assim o escorregamento de seqüência negativa pode ser calculado por (Anderson, 1995) e (de Oliveira, 2011):

$$s_2 = 2 - s \quad (3)$$

De acordo com (3) o rotor estará sujeito a um escorregamento de seqüência negativa de aproximadamente igual a 2, dando origem a frequência induzida no rotor de aproximadamente 120Hz, para um campo girante de seqüência positiva de 60Hz.

O torque eletromagnético de seqüência negativa atua como um torque de frenagem em relação ao torque de seqüência positiva e pode ser dado por (Anderson, 1995) e (de Oliveira, 2011):

$$T_2 = - \frac{3I_{r2}^2 R_r}{(2-s)\omega_s} \quad (4)$$

Assim o torque eletromagnético resultante da operação do MIT com tensões desbalanceadas é dado por (Anderson, 1995) e (de Oliveira, 2011):

$$T = T_1 + T_2 = \frac{3R_r}{\omega_s} \left[\frac{I_{r1}^2}{s} - \frac{I_{r2}^2}{(2-s)} \right] \quad (5)$$

Portanto em condições desbalanceadas, o torque eletromagnético produzido é sempre menor que o torque desenvolvido em condições balanceadas.

3 Modelagem do Sistema

A fim de analisar o efeito do problema FIDVR no gerador DFIG conectado ao sistema de distribuição com operação de carga desbalanceada, esta seção apresenta o modelo do sistema utilizado para as simulações.

3.1 Modelo do DFIG

As equações de tensão do estator e rotor do gerador DFIG nos eixos d e q são dadas por (Lin, 2009):

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (6)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (7)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (8)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (9)$$

Nessas equações, R_s e R_r são as resistências dos enrolamentos do estator e rotor, v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} , v_{qr} , i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} , ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} e ψ_{qr} são as componentes d e q das tensões do estator e rotor, correntes e fluxos, ω_r é a velocidade do rotor, ω_b é a velocidade base e ω_s é a velocidade síncrona. O sistema mecânico é representado pelo modelo padrão de duas massas (Borges et al., 2016). O modelo de equações apresentado faz parte da biblioteca do software utilizado para as simulações, *EMTP-RV- The Reference for Power Systems Transients*.

No conversor lado do rotor (RSC) as variáveis de controle utilizadas foram a potência ativa e tensão terminal e no conversor lado da rede (GSC) foram a tensão do link DC e a potência reativa trocada com a rede (Borges et al., 2016).

A conexão de geradores de indução com a rede tipicamente não empregam a ligação Y aterrada, o que significa que a corrente de seqüência zero não se encontra presente. Como resultado, o modelo do DFIG apresentado nesta seção, mesmo na ausência do eixo zero, representam os fenômenos de tensão desbalanceadas típicos de parques eólicos, introduzidas por componentes de seqüência negativa de tensão e corrente. É importante ressaltar que a estratégia de controle é padrão, assim todas as malhas de controle (potência ativa, tensão terminal, e tensão no link CC) não contêm ações de controle para neutralizar os efeitos da operação de tensão desbalanceada da turbina eólica.

3.2 Modelo do Desbalanço de Carga

Seguindo a convenção proposta em (Salim, 2011), o modelo de desbalanço de carga foi considerado da seguinte forma:

$$S_A = (1 + \mu) \frac{L}{3} \quad (10)$$

$$S_B = (1 - \mu) \frac{L}{3} \quad (11)$$

$$S_C = \frac{L}{3} \quad (12)$$

onde $L/3$ é a potência da carga por fase no caso balanceado e S_A , S_B e S_C são as potências aparentes nas fases A, B e C, respectivamente. O parâmetro μ varia entre 0 e 1 e, com essa definição, pode ser claramente observado de (10) e (11) que a quantidade de potência aumenta na fase A e diminui na fase B, enquanto de (12) pode ser visto que a potência permanece constante. O parâmetro μ utilizado foi de 0,5.

É importante ressaltar que a definição dada por (10), (11) e (12) implica que, para qualquer nível de desequilíbrio aplicado, a potência trifásica é mantida constante, o que permite uma comparação do sistema equilibrado com o sistema desequilibrado.

4 Técnica de Estimação Modal

4.1 Método de Prony

O método de Prony, dentro da categoria de *ring-down analyzers*, é o que apresenta o maior número de aplicações e resultados reportado na literatura, tendo sido abordada pela primeira vez por (Hauer et al., 1990) para identificação de modos eletromecânicos em SEP.

O método de Prony é uma técnica que estima um modelo para os dados amostrados de um sinal, através de uma combinação linear de exponenciais complexas (Marple, 1987). Com esse método é possível extrair informações sobre a composição modal do sinal, como identificar de forma direta a frequência, o amortecimento, a fase e a amplitude associada a cada modo eletromecânico.

Considere um sinal $x(n)$ representado por N amostras $x(1), \dots, x(N)$. O método de Prony irá estimar $x(n)$ a partir de um modelo formado por uma soma de p exponenciais complexas a partir da seguinte equação (Hauer et al., 1990):

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^p A_k e^{[(\sigma_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\theta_k]} \quad (13)$$

para $1 \leq n \leq N$, onde k se refere a k -ésima exponencial complexa, e p corresponde ao número total de exponenciais complexas que compõe o modelo. Para cada exponencial complexa estimada, A_k é a amplitude inicial, σ_k é a taxa de decaimento, n corresponde a n -ésima amostra, f_k é a frequência em hertz e θ_k corresponde à fase inicial em radiano.

5 Resultados e Discussões

O diagrama unifilar do modelo do sistema teste é mostrado na Fig.3. Este sistema de distribuição está localizado no interior do Estado de São Paulo, e seus dados podem ser obtidos em (Salim, 2011). Com exceção dos nós 603, 293 e 291 que tem o nível de tensão de 2,4 kV, 11,5 kV e 138 kV, respectivamente, todas os demais nós operam com um nível de tensão de 13,8 kV.

Duas gerações distribuídas são conectadas ao sistema da Fig.3. Uma é o gerador eólico do tipo DFIG (G1) com potência nominal de 9 MVA (representando um parque eólico com 6 geradores de 1,5 MVA cada) conectado ao nó 801. A outra é um gerador solar fotovoltaico (G2) de 4,5 MW que foi representado por uma injeção de potência ativa constante no nó 905. Os dados do DFIG podem ser encontrados em (Borges et al., 2016).

As cargas estáticas totais do sistema corresponde a 10,48 MW e 2,51 MVAR. Além disso, foram conectados ao sistema 25 motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo, sendo divididos em 5 grupos com 5 motores. Cada grupo de motores possui potências de 0,746 MW e 0,361 MVAR. Foram conectados 2 grupos de motores ao nó 292, 1 grupo ao nó 701, 1 grupo ao nó 801 e um grupo ao nó 808. Os dados dos motores foram retirados do *preset* nº 7 do *Simulink*.

Será apresentado os resultados do comportamento apenas do primeiro motor do grupo conectado ao nó 808 do sistema teste, uma vez que os demais comportam-se de maneira muito semelhante. Todas as figuras apresentadas são para as condições balanceadas e desbalanceadas.

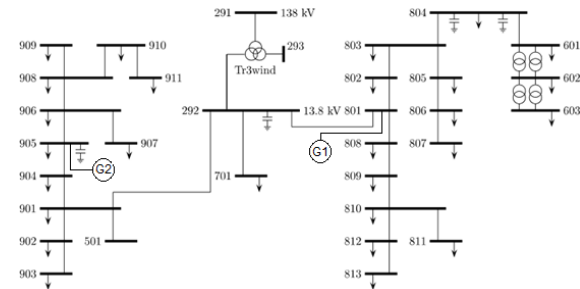


Figura 3. Sistema teste estudado.

Para avaliar o efeito do problema FIDVR no gerador DFIG, um curto-circuito fase-fase-terra foi aplicado nas fases A e B do nó 801 do sistema teste com resistência de falta $R_f = 1\text{m}\Omega$. A falta foi aplicada no instante $t = 11\text{s}$ e removida 0,5s depois.

A Fig.4 mostra o comportamento do torque eletromagnético do motor. É possível observar que no período transitório do torque na condição desbalanceada possui um valor menor se comparado com a condição balanceada, como mostrado matematicamente na equação (5). Consequentemente, nesta situação, a velocidade do motor também apresenta um valor menor se comparado com o caso balanceado, fazendo com que o motor demore mais tempo

para atingir o regime permanente, sendo um sintoma característico do problema FIDVR, conforme Fig.5.

Após a falta ser removida, os motores aceleraram e o consumo de potências ativa e reativa aumentaram em mais de 4 vezes em relação a condição pré-falta, conforme Figs. 6 e 7, respectivamente. É possível observar também que para a condição desbalanceada esse consumo ocorreu por um período de tempo maior se comparado com o caso balanceado, devido ao torque na condição desbalanceada ser menor.

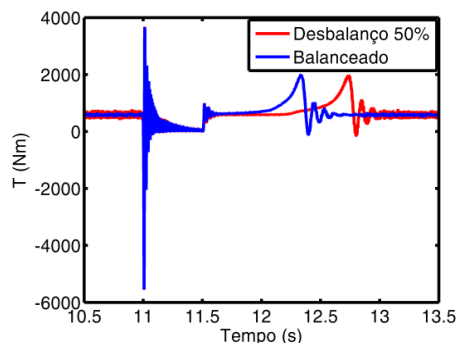


Figura 4. Torque eletromagnético do motor.

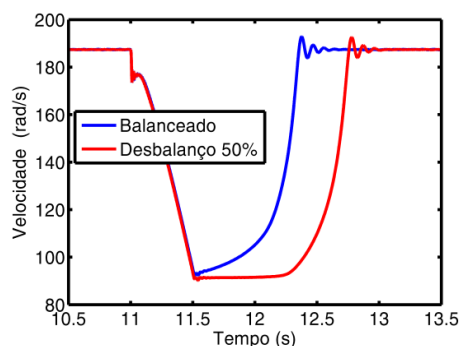


Figura 5. Velocidade mecânica do motor.

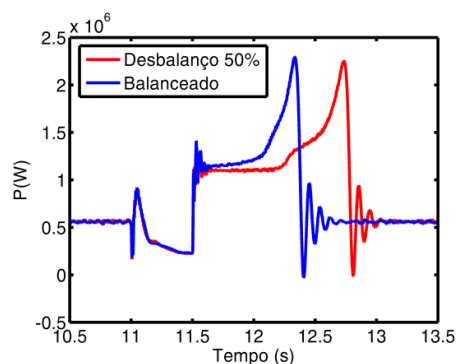


Figura 6. Consumo de potência ativa do motor.

Pode-se observar na Fig. 8 que com o aumento no consumo de potência reativa por parte dos motores, a tensão rms medida por fase no ponto de acoplamento comum (PAC) do DFIG, para a condição desbalanceada, sofre um atraso em sua recuperação em aproximadamente 1,3 s desde o momento da remoção da falta até atingir o valor de regime permanente, caracterizando o problema FIDVR. É possível observar também que o tempo de recuperação da

tensão para condição balanceada foi ligeiramente menor do que o caso desbalanceado.

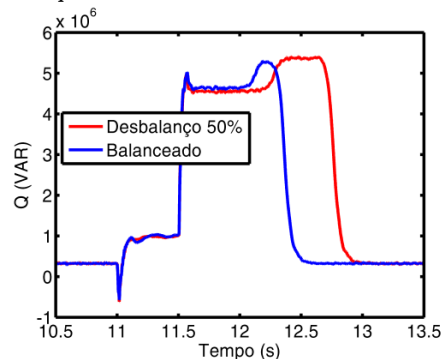


Figura 7. Consumo de potência reativa do motor.

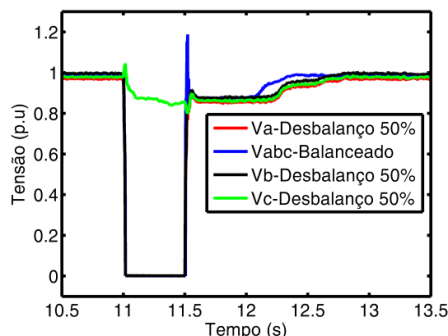


Figura 8. Tensão rms por fase medida no PAC.

A Fig.9 apresenta a velocidade do gerador DFIG para a condição balanceada e desbalanceada. A velocidade do DFIG para condição desbalanceada teve um comportamento mais oscilatório em virtude da existência da componente de sequência negativa do torque do motor, o qual leva mais tempo para alcançar o regime permanente, conforme mostra a Fig.4. Assim, esse efeito é refletido diretamente na velocidade do gerador eólico.

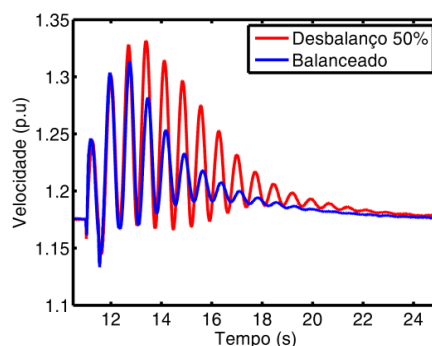


Figura 9. Velocidade do DFIG.

Para analisar os amortecimentos e as frequências oscilatórias do modo eletromecânico do DFIG, a técnica de Prony foi aplicada e o resultado apresentado na tabela 1. É possível notar que o problema FIDVR para o sistema operando com desbalanceamento de carga diminui o amortecimento do modo eletromecânico.

Tabela 1. Amortecimento e frequência do modo eletromecânico do DFIG

Condição	Freq Hz)	Amortecimento (%)
Balanceada	1,364	7,52
Desbalanceada	1,372	6,22

Para simular um caso extremo, um curto-circuito trifásico foi aplicado no nó 801. A Fig. 10 mostra o comportamento da velocidade do gerador eólico. É possível observar que o gerador perdeu a estabilidade. Nessa situação, ocorre o efeito *stall* nos motores e, conseqüentemente, ocorre um aumento significativo no consumo de potências ativa e reativa e o gerador não consegue suprir essas potências.

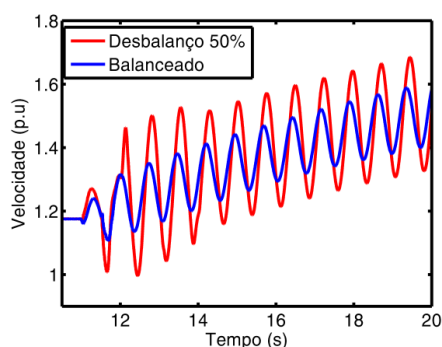


Figura 10. Velocidade do DFIG após aplicação do curto-circuito trifásico.

6 Conclusão

Neste artigo, analisou-se o problema FIDVR no comportamento de um DFIG. Verificou-se que o efeito do desbalance de carga no sistema de distribuição sobre o torque eletromagnético produzido pelo motor (devido à presença da componente de sequência negativa) tem um impacto direto sobre o amortecimento dos modos eletromecânicos do DFIG. Uma vez que torque médio produzido pelo motor sempre será menor quando comparado com o caso balanceado, esta diminuição do torque útil faz com que os motores levem mais tempo para atingir as condições de regime permanente, consumindo mais potência ativa e reativa e, conseqüentemente, agravando o problema FIDVR.

Além disso, uma maior quantidade de motores presentes no sistema, pode diminuir ainda mais o amortecimento das oscilações eletromecânicas do DFIG e, em casos extremos, pode causar a perda de estabilidade do gerador.

O melhoramento das malhas de controle do DFIG, a fim de minimizar os problemas acima mencionados é uma direção futura da pesquisa, com o objetivo de mitigar o efeito FIDVR nas oscilações do gerador.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP proc. nº 2013/24570-0 e 2015/02569-6 pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Anderson, P. M. (1995). Analysis of faulted power systems. IEEE PRESS Power Systems Engineering Series, New York.
- Borges, R. C.; Ramos, R. A. e Reginatto, R (2016). Análise do cumprimento dos requisitos LVRT sobre condições de operação desbalanceadas. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2016, pp 1-6.
- Bravo, R. J.; Yinger, R. and Arons, P (2014). Fault induced delayed voltage recovery (FIDVR) indicators. T&D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES, pp.1-5.
- Chen, H (2011). Cascade stalling of induction motors in fault-induced delayed voltage recovery (FIDVR). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), University of Wisconsin-Madison, Madison USA.
- de Oliveira, J. E. A (2011). Modelagem de um motor de indução trifásico operando com tensões desequilibradas por meio de redes neurais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UNESP, Bauru, SP.
- Hauer, J., Demeure, C. and Scharf, L (1990). Initial results in prony analysis of power system response signals. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 1, pp. 80 –89.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V. et al. (2004). Definition and classification of power system stability. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, n. 3, pp. 1387-1401.
- Lin, L., Song, L., Li, W. and Jing, S (2009). Modal analysis concerning the control mode of doubly-fed induction generator. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 1-6.
- Marple, S. L (1987). Digital spectral analysis with applications. San Diego, California: Prentice Hall.
- Miller, N. W. and Shao, M (2014). Active control of distribution connected photovoltaic systems for reduction of fault-induced delayed voltage recovery. CIRED Workshop, 2014, pp.1-4.
- Salim, R. H (2011). Uma Nova Abordagem para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos. Tese de doutorado, Dept. Elect. Eng., Univ. São Paulo, São Carlos, SP.