

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO IMPACTO DE GERAÇÃO EÓLICA NO COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICOS

JORGE ARAGUNDI RODRÍGUEZ^{1,2}, JUAN CARLOS PEQUEÑA SUNI^{1,3}, ERNESTO RUPPERT FILHO¹

¹Departamento de Sistemas de Energia, Universidade Estadual de Campinas, SP
Cidade Universitária Zeferino Vaz - Av. Albert Einstein, 400 - Distrito Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-852

²Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil-Ecuador
Km 30., Vía Perimetral 5, Guayaquil, Ecuador

³Universidade Federal do Ceará (UFC)
Bloco I - Campus Sobral - Mucambinho, Rua Estandislaú Frota S/N, Centro, Sobral - CE, 62.010-560
E-mails: ^{1,2}aragundi@fiec.espol.edu.ec, ^{1,3}jcarlosp@dsce.fee.unicamp.br, ¹ruppert@fee.unicamp.br

Abstract: This paper presents an analysis of the behavior of voltage and transient stability when a wind power integrates the power systems and then a three-phase fault is applied in several random power buses. It was used the IEEE 9 Bus Electric Power System to analysis the voltage stability and the IEEE 14 Bus Electric Power System to analysis the transient stability, along with the Power System Analysis Tool Box software (PSAT / MATLAB) to acquire the PV and frequency curves using the Power Flow Continuity (CPF). It was used Doubly-fed induction generators (DFIG) for the wind turbines, in which where installed in several buses to analyze the best location.

Keywords— Voltage Stability, Transient Stability, Wind Turbine, Three Phase Fault, PSAT

Resumo— Este artigo apresenta uma análise do comportamento de estabilidade de tensão e estabilidade transitória dos sistemas de energia elétrica quando se integra ao sistema um parque eólico (aerogeradores) e se aplica um curto-circuito trifásico em diversas barras escolhidas de forma aleatória. O sistema de referência usado para realizar a análise de estabilidade de tensão foi o IEEE de 9 barras e para fazer a análise de estabilidade transitória foi o IEEE 14 barras. Para a análise foi utilizado o software Power System Analysis Tool Box (PSAT/MATLAB), onde se pode obter as curvas PV a partir da Continuidade de Fluxo de Potência (CPF), e as curvas das frequências dos geradores. O gerador usado foi o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). Os aerogeradores são instalados em diversas barras com o objetivo de analisar a melhor localização.

Palavras chave— Estabilidade de tensão, estabilidade transitória, geração eólica, falta trifásica, PSAT

1 Introdução

No mundo todo, hoje se tem políticas energéticas que apoiam a conexão de geradores nos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica gerando energia através de tecnologias limpas e sustentáveis, principalmente aquelas baseadas em fontes renováveis (CIGRE, 1999; IEEE, 2003).

A utilização da geração eólica em um sistema de energia elétrica é de grande satisfação, visto que possibilita reduzir a utilização da energia fornecida por concessionárias. Embora o crescimento do uso das energias renováveis mostre inúmeras qualidades, ainda não são muito conhecidos os impactos que possam causar, caso ocorra uma grande penetração nos sistemas elétricos.

O estudo das consequências e o impacto da inserção das energias renováveis nos sistemas elétricos tem muita importância (CIGRE, 1999; W. Sun et al., 2012; R. Londero et al., 2009). O conhecimento trazido pela conexão possibilita o planejamento correto de operação de sistemas de distribuição.

Dentro deste contexto este trabalho analisa o impacto da conexão de geradores eólicos no comportamento de um sistema de energia elétrica através de simulações realizadas.

Para analisar a estabilidade dos sistemas com geração eólica de energia elétrica, foi utilizado o programa

PSAT/MATLAB (F. Milano., 2005), o qual possui uma ampla biblioteca de elementos de um sistema elétrico de potência, como modelos de geradores, cargas e turbinas eólicas. Todos os valores obtidos nas simulações possuem grandezas em p.u. (por unidade).

Neste contexto, existem várias opções quando se trata de geradores e turbinas eólicas. Embora a máquina síncrona de ímã permanente esteja a emergir como uma alternativa (BTM Consult ApS, 2008), a alternativa usada pela maioria dos fabricantes de turbinas eólicas é a configuração com gerador de indução de dupla alimentação (DFIG), dado que este apresenta algumas vantagens sobre os outros, usa-se neste trabalho o DFIG (H. Li e Z. Chen., 2008; A. Cagnano et al., 2012).

Há várias publicações na IEEE e jornais usando sistemas de 9 e 14 barras (S. Kumar et al., 2015; A. G. Pillai et al., 2013; Z. Wei et al., 2014) com resultados consistentes, embora os sistemas sejam de pequeno porte. Por isso, vamos usar os sistemas 9 e 14 barras do IEEE neste artigo.

Para a análise da estabilidade de tensão, usa-se o sistema do IEEE de 9 barras e se obtiveram as curvas PV usando a Continuidade de Fluxo de Potência (CPF) do PSAT. Das curvas PV, obtém-se o valor da capacidade de carga (λ) com o qual se poderá determinar a estabilidade de tensão e, também, os perfis de tensão. Para a análise da estabilidade transitória

usa-se o sistema de 14 barras do IEEE e se obtiveram as curvas de frequência dos geradores (velocidade angular ω).

Simulações foram feitas para analisar o curto-circuito trifásico (falta trifásica), por ser a perturbação que mais afeta os sistemas de energia elétrica (SEE) (P.M. Anderson et al., 2002; Sun T. et al., 2003).

2 Objetivos e organização do artigo

Este artigo tem como objetivo analisar o impacto no comportamento de estabilidade de tensão e estabilidade transitória dos sistemas de energia elétrica quando geradores eólicos (aerogeradores) são integrados ao mesmo, aplica-se uma falta trifásica em diversas barras escolhidas de forma aleatória.

Faz-se a análise com o sistema sem perturbações e, também quando se aplica uma falta trifásica.

O artigo é organizado da seguinte forma: a seção III descreve o modelo do DFIG e alguns conceitos de turbinas eólicas e, em seguida, o sistema utilizado é apresentado; a seção IV apresentam algumas simulações e a respectiva análise para a estabilidade de tensão e estabilidade transitória; finalmente, a seção V apresentam as conclusões e referências utilizadas ao longo deste trabalho.

3 Modelo do aerogerador e sistema de teste

Do ponto de vista de um aerogerador conectado à rede elétrica, estes podem ser classificados como de velocidade fixa e de velocidade variável. Os geradores de velocidade fixa são geralmente os geradores de indução gaiola de esquilo (SCIG), conhecido como tipo A (ACKERMANN, Thomas, 2005). Os geradores de velocidade variável são classificados em 3 tipos B, C e D (ACKERMANN, Thomas, 2005). O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) faz parte do tipo C.

3.1 Tecnologia do aerogerador

O sistema de geração elétrica a partir da energia eólica baseado no DFIG é apresentado na Fig. 1. Este tipo de aerogerador é capaz de manter a frequência fixa da energia gerada mesmo com variações de velocidade da turbina (ACKERMANN, Thomas, 2005; H. li e Z. Chen., 2008).

Neste sistema, o eixo do rotor do gerador é acoplado ao da turbina eólica através de um multiplicador de velocidade (caixa de engrenagens) responsável pela amplificação da baixa velocidade da turbina à maior velocidade de operação do DFIG. O circuito do estator é ligado diretamente à rede elétrica de tensão em frequência fixa.

O enrolamento do rotor é ligado à rede elétrica através de um conversor de frequência bidirecional em potência composto por dois conversores eletrônicos acoplados via barramento CC. Os dois conversores serão denominados de conversor do lado do rotor

do gerador e conversor do lado da rede elétrica conforme representado na Figura 1.

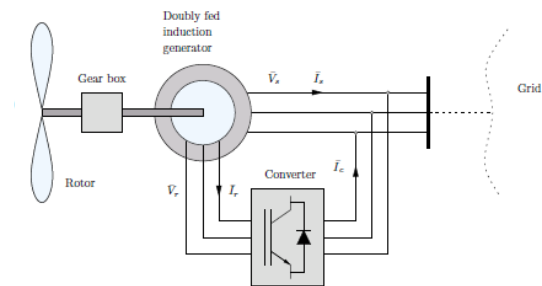


Figura 1. Sistema de gerador eólico utilizando um DFIG.

As equações matemáticas do DFIG são assumidas no estado estacionário, a dinâmica de fluxo do estator e do rotor são rápidas em comparação com a dinâmica da rede elétrica e o desacoplamento do gerador da rede elétrica pode ser feito pelo mecanismo de controle do conversor (BTM Consult ApS, 2008; S. Kumar et al., 2015; Sun T. et al., 2003).

3.2 Sistemas de testes

Para a realização das simulações de estabilidade de tensão, foi utilizado o modelo de 9 barras do IEEE apresentado na Figura 2. O modelo e os dados das linhas e dos transformadores, os dados das barras como tensões e correntes, e os parâmetros dos geradores e das máquinas síncronas estão disponíveis no livro Power System Control and Stability (P.M. Anderson et al., 2002). Trata-se de um sistema de pequeno porte composto por 9 barras, 3 unidades geradoras, 9 linhas de transmissão, 3 cargas e 3 transformadores.

O segundo sistema utilizado para o estudo de estabilidade transitória é apresentado na Figura 3, que é um sistema de 14 barras do IEEE. Este sistema é composto por 14 barras, 20 linhas de transmissão 5 geradores síncronos convencionais, 11 cargas. As capacidades de geração por máquina é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 - Potência ativa dos geradores do sistema

Gerador	Potência (MW)
1	615
2	60
3	60
4	25
5	25

Para a análise todos os valores são dados em p.u na potencia base de 100 MVA e frequência nominal do sistema em 60 Hz.

Os transformadores que ligam os geradores à rede são ajustados adequadamente, e as turbinas eólicas utilizadas são de 2 MW.

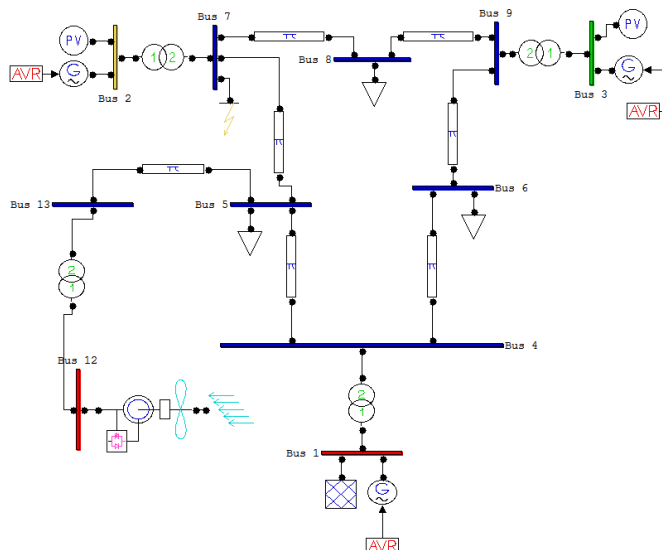


Figura 2 - Sistema de 9 barras da IEEE modificado (11 barras) com gerador eólico conectado na barra 5 com falha trifásica na barra 7

Devido à complexidade do sistema de energia elétrica, qualquer perturbação que possa aparecer pode eventualmente, torna-lo vulnerável.

Por exemplo, um curto circuito trifásico que é a perturbação que pode trazer mais problemas aos sistemas de energia elétrica, pode causar uma oscilação na velocidade de rotação do gerador e, consequentemente, no fluxo de potência do sistema elétrico.

É necessário mencionar que o gerador síncrono convencional utilizado no sistema pode não representar uma única máquina, mas um grupo de geradores fortemente acoplados

4 Resultados e análises

4.1 Estabilidade de tensão

Para a análise da estabilidade de tensão, usa-se o sistema de 9 barras podendo ou não ser perturbado com uma falha trifásica e/ou ter presença de geradores eólicos conforme seguem os casos:

Caso 1: Sistema elétrico sem perturbações e sem aerogeradores (caso base);

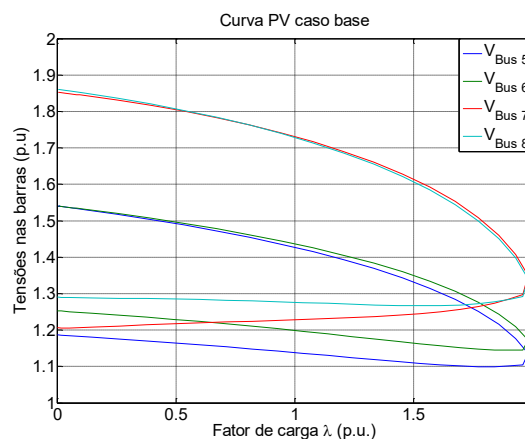


Figura 4. Curva PV Sistema sem perturbações e sem aerogeradores

A Figura 4 se mostra as curvas PV. No eixo horizontal tem-se a capacidade de carga ou fator de carga em p.u. (λ) e, no eixo vertical, a tensão nas barras 5, 6, 7 e 8 sem aerogeradores. Observa-se que o valor do fator de carga máximo na barra 5 $\lambda_{max} = 2,0$ é ligeiramente maior que as outras barras.

Caso 2: Sistema elétrico com falha trifásica na barra 7 e sem aerogeradores.

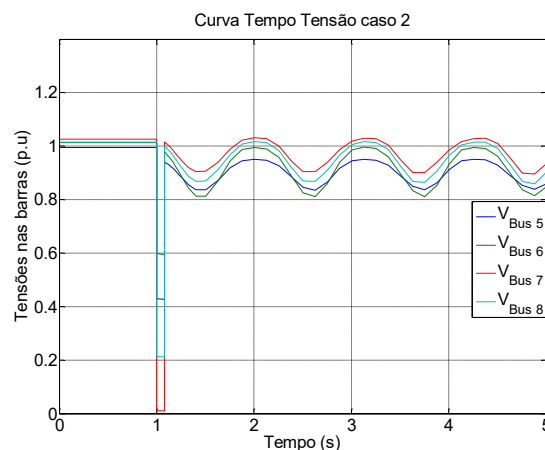


Figura 5 (a)- Curvas perfil das tensões Sistema com falha trifásica na barra 7 e sem aerogeradores.

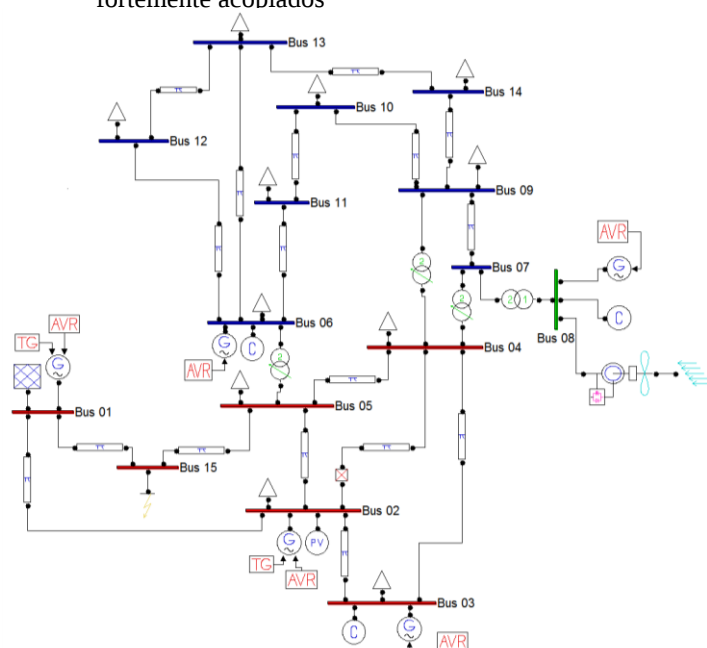


Figura 3. Sistema de 14 barras da IEEE com gerador eólico conectado à barra 8 com falha trifásica na barra 15

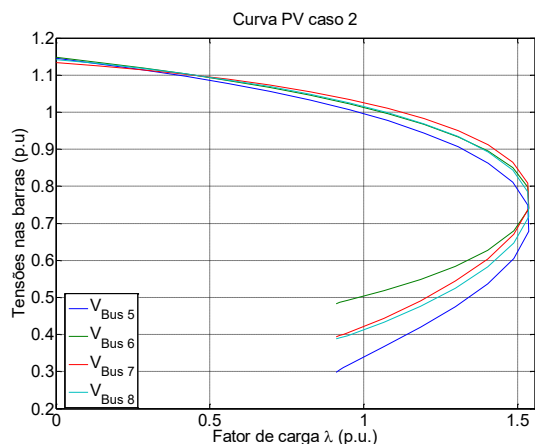


Figura 5 (b) - Curvas PV Sistema com falta trifásica na barra 7 e sem aerogeradores.

As Figuras 5 (a) e (b) mostram as tensões e as curvas PV para as barras 5, 6, 7 e 8 quando ocorre uma falta trifásica entre $t = 1$ s e $t = 1,083$ s. Observa-se que o valor do fator de carga máximo (λ_{max}) na barra 5 $\lambda_{max} = 1,53$ é ligeiramente maior que as outras barras. O λ_{max} diminui em relação ao caso anterior, indicando que o sistema pode se instabilizar.

Caso 3: Sistema elétrico sem perturbações e com aerogeradores;

Para o terceiro caso, geradores eólicos são inseridos nas barras 5, 6 e 8, gradativamente, o comportamento para as tensões e curvas PV são analisados, as tensões não tem variações. A Figura 6 apresenta o caso quando a potência eólica está ligada na barra 5.

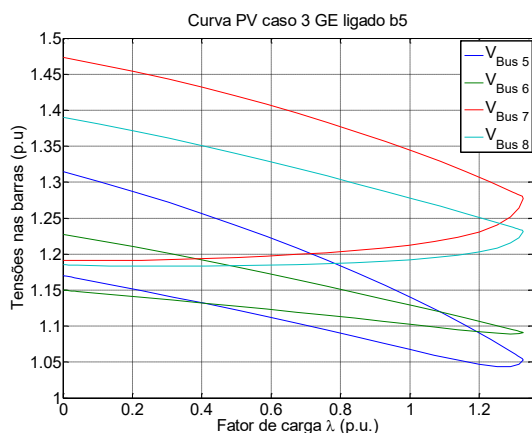


Figura 6. Curvas PV Sistema sem perturbações e com aerogeradores

Na Figura 6, λ_{max} é aproximadamente 1,3, sendo ligeiramente maior na barra 5. O λ_{max} diminui em relação ao caso anterior, indicando que o sistema pode se instabilizar.

Caso 4: Sistema elétrico com falta trifásica na barra 7 e com aerogeradores;

Para este caso, procede-se como no caso 3. Ou seja, ligam-se geradores eólicos nas barras 5, 6 e 8, grada-

tivamente, e simula-se uma falta trifásica na barra 7 como no caso 2. Analisa-se o comportamento para as tensões e as curvas PV.

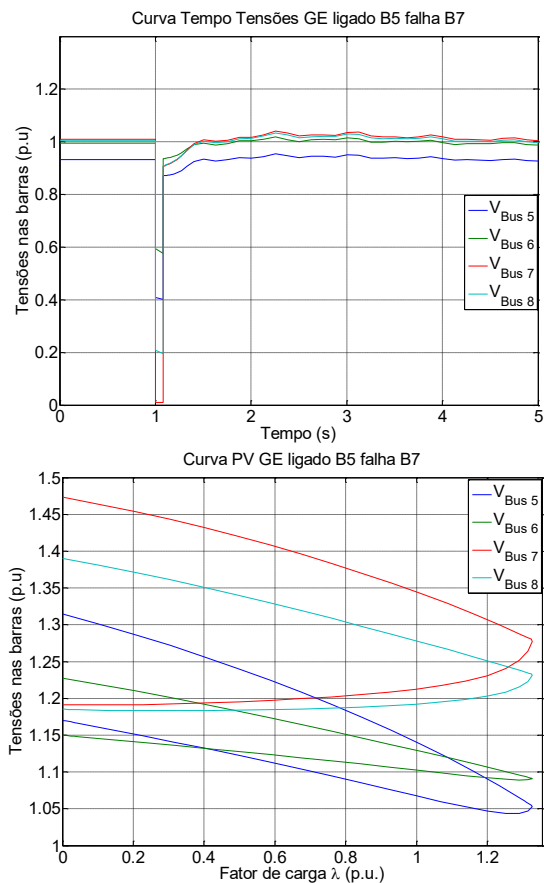


Figura 7. Curvas perfil das tensões e curva PV Sistema com falta trifásica na barra 7 e com aerogeradores

Na figura 7, têm-se variações de tensões devido á perturbação, vê-se que o fator de carga máximo (λ_{max}) maior encontra-se na barra 5, favorecendo a ligação do gerador eólico nessa barra. Nota-se que a barra 7 tem a tensão crítica maior.

Observando os valores do fator de carga máximo (λ_{max}), vemos que este diminui quando gerador de energia eólica esta ligado e ocorre a falta, podendo instabilizar o sistema.

4.2 Estabilidade transitória

Para comprovar a estabilidade transitória do sistema elétrico usa-se o sistema de 14 barras podendo ou não ser perturbado com uma falta trifásica e/ou ter presença de geradores eólicos. Foram realizadas simulações para os seguintes casos:

Caso 1: Sistema elétrico com falta trifásica e sem aerogeradores;

Nesse caso, simulou-se uma falta trifásica na linha de transmissão que liga a barra 1 com a barra 5. Para isso, dividiu-se em duas linhas equivalentes e, entre as duas foi inserida uma nova barra (barra 15) na qual houve a falta. Esse sistema é mostrado na Figura 3.

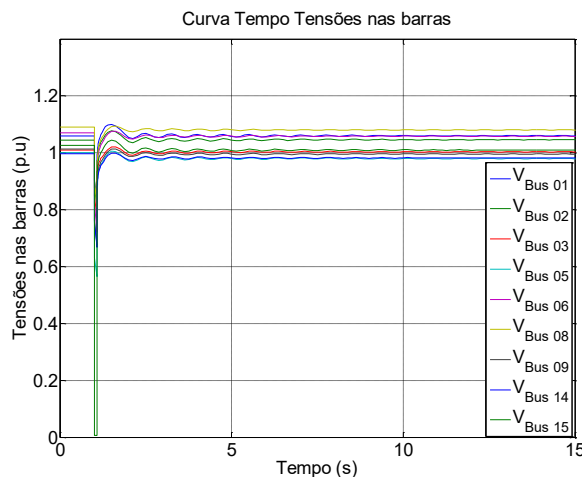


Figura 8 (a). Curvas perfil das tensões Sistema com falta trifásica e sem aerogeradores.

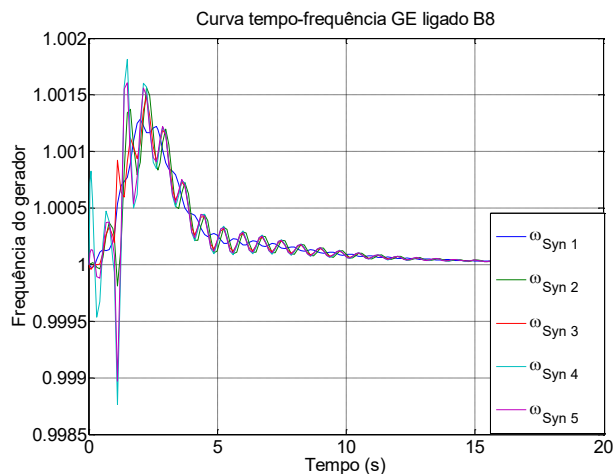


Figura 9. Curvas das frequências dos geradores Sistema com aerogeradores.

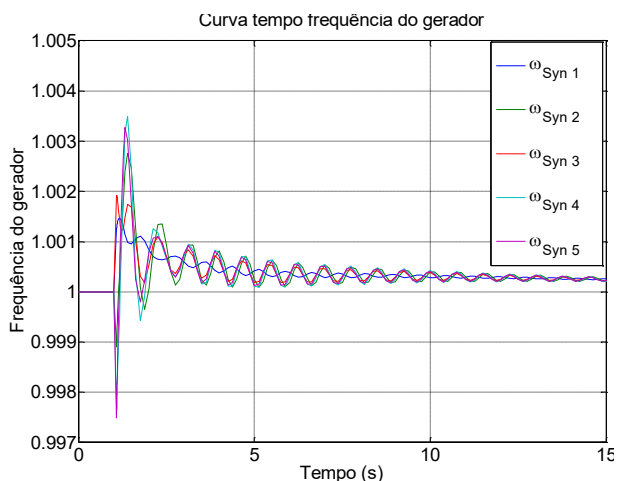


Figura 8 (b). Curvas das frequências dos geradores Sistema com falta trifásica e sem aerogeradores.

As figuras 8 (a) e 8 (b) apresentam as tensões e frequência dos geradores durante uma falta trifásica. Houveram variações devido a curto-circuito, porém amortecidos pelo regulador da velocidade dos geradores. Nesse caso houve variação da frequência entre 0,9975 e 1,0034.

Caso 2: Sistema elétrico com aerogeradores

Para as simulações, ligaram-se os geradores eólicos nas barras de carga 5, 6 e 8. A figura 9 apresenta a curva das frequências quando se liga o gerador eólico na barra 8.

Na Figura 9, observa-se que a frequência sofre uma variação entre 0,99855 e 1,0015, que são menores que o caso 1. Para reverter esta situação o regulador da velocidade do gerador atua e o sistema tende a se estabilizar novamente.

Caso 3: Sistema elétrico com falta trifásica com aerogeradores.

Para este caso, simulou-se um curto-circuito na linha que liga a barra 1 com a barra 5. Para isso, dividiu-se em duas linhas equivalentes e entre as duas, foi inserida uma nova barra (barra 15). O gerador eólico (GE) foi ligado na barra 8.

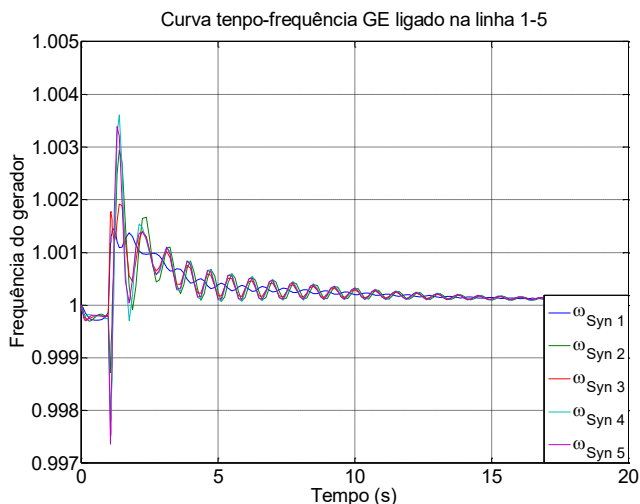


Figura 10 - Curvas das frequências dos geradores Sistema com falta trifásica com aerogeradores.

Neste caso, o comportamento das tensões é similar ao caso 1 Figura 8(a) as tensões apresentam variações durante a falta e voltam atingir valores normais. Na Figura 10, observa-se que a frequência sofre uma variação entre 0,9975 e 1,0036, que são maiores do que nos casos anteriores (o que indica que é o pior caso para estabilidade transitória.). Para reverter esta situação o regulador da velocidade do gerador atua e o sistema tende a estabilizar-se novamente.

5 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma análise do comportamento dos sistemas de energia elétrica quando se agrega sistemas de geração eólica.

Para a análise ligaram-se os geradores eólicos nas barras de carga 5, 6 e 8 e apresentam-se as respectivas figuras obtidas das simulações quando se liga o gerador eólico na barra 8.

Para a análise da estabilidade da tensão, pode-se ver que as tensões quando se tem uma perturbação, caem e chegam a ter um valor nulo na barra da falta, mas o sistema consegue se estabilizar depois de um pico de tensão e oscilações.

Observando os valores do fator de carga máximo ($\lambda_{\max}$), vemos que este diminui quando gerador de energia eólica esta ligado e ocorre a falta, podendo instabilizar o sistema.

Na análise das figuras da estabilidade de tensão, vê-se que o fator de carga máximo ($\lambda_{\max}$) maior encontra-se na barra 5, sendo esta barra a melhor para ligação do gerador eólico.

Observa-se nas figuras da frequência dos geradores, que elas sofrem uma variação por causa do curto-circuito. Para reverter esta situação, o regulador de velocidade dos geradores atua para o sistema se estabilizar novamente.

Dos valores da frequência dos geradores para os três casos. Vê-se que para o terceiro caso, que é quando o sistema tem perturbação e o aerogerador esta ligado, apresenta o maior aumento na frequência, o que indica que é o pior caso para estabilidade transitória.

As perturbações de falhas nas barras e curto-circuito nas linhas podem desestabilizar o sistema e causar problemas de estabilidade de tensão e de estabilidade transitória.

O comportamento transitório dos sistemas varia com a localização dos aerogeradores nas diferentes barras.

De acordo com simulações mostradas, pode-se concluir que: não existe uma regra geral, quando se trata de energia eólica e seu impacto sobre o sistema elétrico, não se poderia dizer conclusivamente se as margens melhoraram a estabilidade transitória ou se o impacto é negativo. A resposta dependerá da localização dos recursos eólicos, das características do sistema elétrico e o problema tem que ser analisado individualmente para cada caso.

Das análises realizadas, na medida em que aumentam os níveis da potência eólica nos sistemas estudados, eles se tornam mais instáveis.

Referências

- A. Cagnano, M. Dicorato, G. Forte, M. Trovato e E. De Tuglie (2012). Power System Stability Analysis in the Presence of Variable Speed Wind Generator, IEEE Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, China, p. 1-4.
- ACKERMANN, Thomas (2005). Wind Power in Power Systems. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- A. G. Pillai, Thoma. P C, Sreerenjini K, S. Baby, T. Joseph and S. Sreedharan (2013). "Transient Stability Analysis of Wind Integrated Power Systems with Storage", Using Central Area Controller International Conference on Microelectronics, Communication and Renewable Energy (ICMiCR).
- BTM Consult ApS (mar. 2008). International Wind Energy Development World Market Update 2007:Forecast 2008-2012. Denmark.
- CIGRÉ Working Group 37.23 (1999). Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system, Relatório Técnico.
- F. Milano (2005). "Power System Analysis Toolbox," Version 1.3.4, Software and Documentation.
- H. li e Z. Chen (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons, IET Renewable Power Generation, v. 2, p. 123-138.
- IEEE 1547TM (2003): IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.
- P.M. Anderson and A. A. Fouad (2002). Power System Control and Stability, Wiley-IEEE Press.
- R. Londero, C. Affonso, and M. Nunes (2009). Impact of distributed generation in steadystate, voltage and transient stability — Real case. IEEE Bucharest Power Tech, pp. 1-6.
- S. Kumar, A. Kumar and N. K. Sharma (2015). "Analysis of Power Flow, Continuous Power Flow and Transient Stability of IEEE-14 Bus Integrated Wind Farm Using PSAT, International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE).
- Sun T., Chen Z., Blaabjerg F (2003). Voltage recovery of grid-connected wind turbines after a short-circuit fault, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Virginia, USA.
- W. Sun, X. Kong, Z. Zhao and Ch. Sun (Sep. 2012). Impact of High Permeability DGs on Future Power System and Their Reliability Assessment. China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012) Shanghai, 5-6.
- Z. Wei and S. Shaojian (2014). The Small Signal Stability Analysis of A Power System Integrated with PMSG-based Wind Farm, IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA).