



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT 05
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS-GPT

MODELOS DE TURBINAS EÓLICAS COM GERADORES DE INDUÇÃO TIPO GAIOLA DE ESQUILO E DUPLAMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO O CDU DO ANATEM

Walbermark Marques dos Santos * José Eduardo Pessanha Osvaldo Saavedra

Universidade Federal do Maranhão

RESUMO

Neste trabalho aborda-se a análise computacional do comportamento dinâmico de aerogeradores em redes elétricas visando o comportamento no tempo de grandezas elétricas em resposta a distúrbios. O programa computacional usado para tal fim é o ANATEM, no qual foram implementados modelos de geradores tipo gaiola de esquilo e duplamente alimentado, através do CDU (Código Definido pelo Usuário), e também um modelo matemático representando o comportamento do vento. Através de simulações computacionais, avalia-se o desempenho dos modelos em resposta a distúrbios no sistema-teste.

PALAVRAS-CHAVE

Energia Eólica, geradores eólicos, CDU do ANATEM, simulação no domínio do tempo, geradores de indução.

1.0 - INTRODUÇÃO

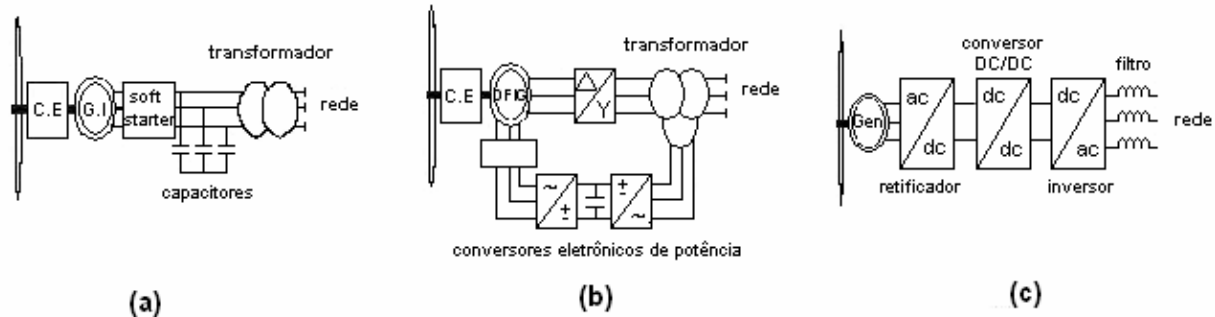
A integração de usinas eólicas em redes de energia elétrica, principalmente as de distribuição, cria desafios técnicos que afetam tanto o planejamento quanto a operação destes sistemas. Vários problemas estão associados a essa integração, como por exemplo: harmônicos, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. Os efeitos e o nível de severidade dependem de vários fatores, tais como, o nível de penetração eólica, as características das turbinas (velocidade fixa, velocidade constante, geradores síncronos, geradores de indução, projeto dos conversores de potência), as características do vento (velocidade média, intensidade de turbulência, variação da direção), a localização geográfica da turbina, e as características elétricas do ponto de conexão (1). O gerador de indução, por exemplo, é uma máquina mais robusta que o gerador de ímã permanente, apresenta custos mais baixos (incluindo a manutenção), possui alta densidade de potência (W/kg) e pode ser mais robusto com relação a faltas na rede (2,3).

Os geradores usados geralmente pelas unidades eólicas são máquinas de indução conectadas diretamente à rede. A demanda de potência reativa dos geradores de indução é compensada a partir de suportes adequados via bancos de capacitores. Deve-se planejar um suporte adequado de potência reativa para que durante os períodos de ventos fracos, quando as turbinas não estiverem em operação, esta capacitância fique disponível para a concessionária, principalmente para evitar problemas de estabilidade de tensão. A capacidade de controlar a geração e a absorção de potência reativa pode aumentar a eficiência da transmissão de energia elétrica e assegurar a estabilidade de tensão. Apesar desses problemas, o aumento da injeção de potência eólica no sistema convencional tem sido conseguido graças ao avanço da tecnologia das turbinas eólicas e de seus sistemas de controle (4,5). Também, os aerogeradores oferecem suporte de energia em sistemas isolados

(*) Campus Universitário do Bacanga, AV. dos Portugueses, S/N – Prédio CCET – CEP 65085-580, São Luis, MA – Brasil

conjuntamente com outras fontes, ou conectados à rede convencional onde contribuem com o suprimento da demanda em períodos favoráveis de vento. Em se tratando de conexão com a rede de energia, destacam-se três tipos de aerogeradores, ilustrados na Figura 1, sendo estes: velocidade fixa com gerador de indução (MI), velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado (DFIG), e velocidade variável com conversores de potência (6,7).

O sistema de velocidade fixa (Figura 1-a) é equipado com uma chave de partida (soft starter) e banco de capacitores. A chave “soft starter” é utilizada para controlar a corrente de “inrush” quando o gerador é conectado na rede, enquanto que os capacitores produzem a potência reativa para compensar a demanda de reativos do gerador. Em sistemas avançados, os capacitores são controlados por chaveamento eletrônico, sendo possível obter um fator de potência constante e unitário dentro de uma determinada faixa de operação(6,7).



- (a) geradores de velocidade fixa (MI)
 (b) velocidade variável com DFIG
 (c) velocidade variável com conversores

FIGURA 1 – Conceitos atuais de sistema de geração eólica

No sistema DFIG, um conversor de frequência é conectado ao circuito do rotor do gerador e a operação em velocidade variável é possível através do controle da corrente no rotor. A possibilidade de variação da velocidade do gerador é proporcional à potência do conversor. Já na configuração de velocidade variável com conversores, o controle da corrente é total e resultando num controle muito preciso da potência ativa e reativa. Durante uma queda de tensão é possível controlar a corrente, resultando em um bom desempenho durante distúrbios na rede. O gerador utilizado nessa configuração pode ser síncrono (com excitação ou ímã permanente) ou de indução (6,7).

O presente trabalho aborda a implementação de dois modelos de aerogeradores no programa computacional ANATEM (8). Para atingir tal objetivo, os modelos foram implementados através do Código Definido pelo Usuário, ou simplesmente CDU. As máquinas aqui representadas correspondem a geradores de indução tipo gaiola de esquilo e tipo duplamente alimentado e as turbinas eólicas são modeladas por sua curva de potência versus velocidade de vento. A máquina tipo gaiola de esquilo é modelada como uma fonte de tensão atrás de uma reatância assíncrona. Já o modelo de gerador duplamente alimentado tem o conversor modelado como uma fonte de corrente controlada, regulando a corrente do rotor e conseqüentemente a potência reativa da máquina. Os modelos desenvolvidos são testados em um sistema-teste.

2.0 - MODELOS IMPLEMENTADOS NO ANATEM

2.1 Comportamento eólico

O modelo do comportamento eólico, ou simplesmente do vento, usado nas simulações foi adaptado de (9), e é dado pela Equação 1. Na Figura 2, pode-se ver a resposta desse modelo onde a velocidade média do vento é de 7,5 m/s, e as variações da amplitude da ordem de $\pm 3,5$ m/s.

$$v_{wind} = v_m - 1 + 2 * abs \left(\sin \left(\frac{2400 * t}{9} \right) \right) + \sin \left(\frac{600 * t}{12} \right) - 2 * \cos \left(\frac{600 * t}{15} \right) \quad (1)$$

onde

v_{wind} = velocidade instantânea do vento (m/s)

v_m = velocidade média do vento (m/s)

t = tempo em segundos

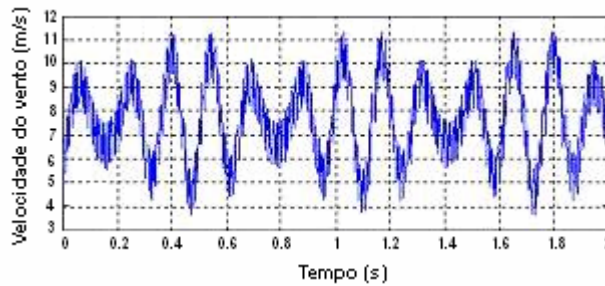


FIGURA 2 – Resposta do modelo que representa o comportamento eólico

2.2 Turbina Eólica

Devido a forte não linearidade da equações que envolvem o princípio de conversão eólica, para representar de forma detalhada o comportamento de uma turbina eólica, é necessário um conjunto completo de equações complexas dado, por exemplo, pelas Equações 2 e 3.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_r c_p(\lambda, \theta) v_w^3 \quad (2)$$

onde

P_w - potência mecânica extraível pela turbina [w]

A_r - área varrida pelo rotor da turbina [m²]

v_w - velocidade do vento [m/s]

λ - coeficiente de velocidade

θ - ângulo "pitch" das pás

$c_p(\lambda, \theta)$ - coeficiente de potência. É uma função não linear de λ e θ , e pode ser dada por (10)

$$C_p = (0.44 - 0.0167 * \beta) * \sin\left(\frac{\pi * (\lambda - 2)}{13 - 0.3 * \beta}\right) - 0.00184 * (\lambda - 2) * \beta \quad (3)$$

Como se pode observar, a Equação 3 é altamente não linear o que dificulta o desenvolvimento do modelo de uma turbina eólica. Porém, é possível desenvolver um modelo simplificado e confiável, baseado nas seguintes considerações (11):

- Assumir que C_p (coeficiente de potência da turbina) é igual ao valor máximo, desta forma a equação complexa e não-linear de C_p pode ser substituída por uma constante.
- A velocidade do rotor versus características de controle é aproximada por uma relação linear, conforme ilustrada na Figura 4.
- Quando o integrador no qual a velocidade do rotor é armazenada é limitado ao valor de 1.1 p.u., o ângulo de controle "pitch" pode ser omitido do modelo, porque não é mais necessário limitar a velocidade do rotor.

Considerando-se essas hipóteses, o modelo simplificado da turbina é representado pela Figura 3, cuja curva de potência é dada pela Figura 4.

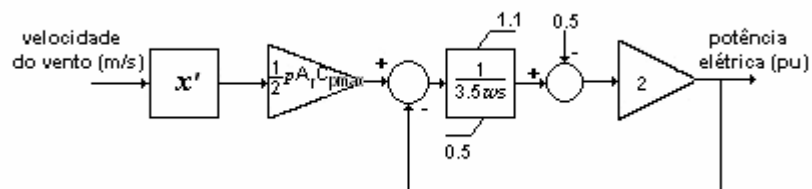


FIGURA 3 – Modelo simplificado da turbina eólica

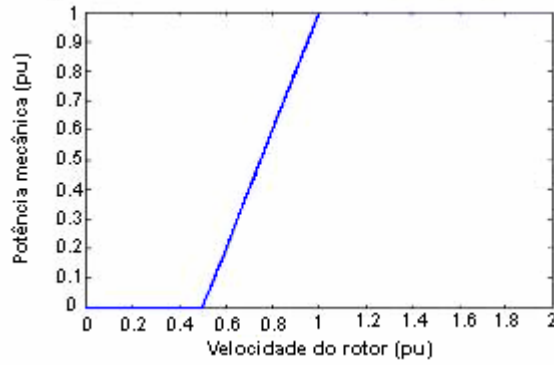


FIGURA 4 – Curva de potência da turbina eólica para o modelo simplificado

2.3 Geradores Elétricos

Os modelos convencionais que dos geradores assíncronos nos estudos no domínio do tempo geralmente são representados por um conjunto de equações diferenciais de segunda ordem, baseados em uma fonte de tensão atrás de uma reatância transitória (Figura 5). Também são desprezados os transitórios rápidos do estator, o que corresponde a ignorar a componente CC da corrente transitória do gerador, a qual possui um decaimento muito rápido quando comparado às componentes CA. Quando a máquina é duplamente alimentada, o conversor de potência pode ser representado por uma fonte de corrente do lado do estator (Figura 6). A modelagem dos geradores é representada pelo conjunto de Equações 2 para as tensões estatóricas:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -R_s i_{ds} + X' i_{qs} + v'_d \\ v_{qs} &= -R_s i_{qs} - X' i_{ds} + v'_q \end{aligned} \quad (2)$$

onde

v_{ds}, v_{qs} - tensões no terminal da máquina nos eixos direto e de quadratura

i_{ds}, i_{qs} - corrente de entrada da máquina de eixo direto e quadratura

R_s - resistência do estator da máquina

v'_d, v'_q - contribuição de tensão dada pelo rotor da máquina no eixo direto e quadratura

X' - reatância transitória da máquina dada por

$$X'_s = \omega_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right)$$

A variação da tensão interna do gerador de indução duplamente alimentado é calculada usando o conjunto de Equações 3:

$$\begin{aligned} \frac{dv'_d}{dt} &= -\frac{1}{T_0} \left[v'_d + (X - X') i_{qs} \right] - s \omega_s v'_q + \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \\ \frac{dv'_q}{dt} &= -\frac{1}{T_0} \left[v'_q + (X - X') i_{ds} \right] - s \omega_s v'_d + \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} \end{aligned} \quad (3)$$

onde

$T_0 = \frac{L_{rr}}{R_r}$ - constante de tempo de circuito aberto

$X_s = \omega_s L_{ss}$ - reatância de dispersão do estator

No caso do gerador de indução tipo gaiola de esquilo basta desconsiderar a parcela referente à realimentação da tensão no rotor, v_{dr} e v_{qr} no conjunto de Equações 3. O torque eletromagnético e potência reativa em p.u dos geradores são dados por:

$$\begin{aligned} T_e &= v'_d i_{ds} + v'_q i_{qs} \\ Q &= v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{aligned} \quad (4)$$

onde

T_e, Q - são o torque eletromagnético e a potência reativa respectivamente

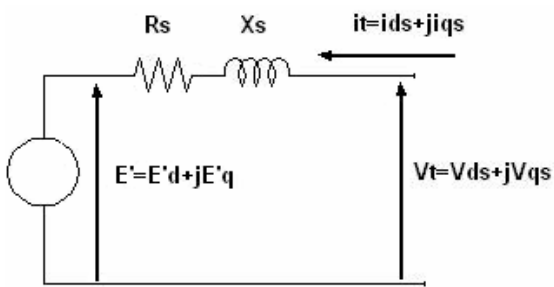


FIGURA 5 – Modelo da máquina de indução

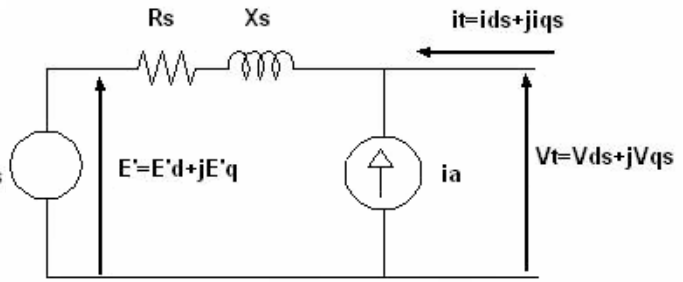


FIGURA 6 – Modelo da máquina de indução duplamente alimentada com o conversor

2.4 Modelos dos conversores

Sendo considerada a dinâmica do rotor do DFIG, o sistema de controle da excitação da máquina é estabelecido em dois níveis: controle da corrente no rotor em um nível interno e controle de potência e tensão em um nível mais externo. A implementação dos dois tipos de esquemas de controle propostos (9) para o torque eletromagnético e a potência reativa é mostrada na Figura 7.

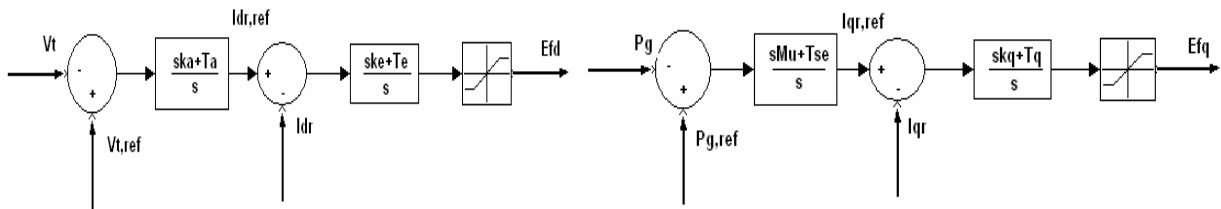


FIGURA 7 – Modelo de controle do conversor do lado do rotor

Nesse caso, o erro de tensão passa por um estágio de controle inicial PI. Em seguida, o erro entre a corrente de referência ao longo do eixo d, $I_{dr,ref}$, proveniente do controlador, e a corrente efetivamente calculada ou medida no rotor, passa por uma malha de controle PI, para gerar o sinal de tensão do rotor ao longo do eixo d, o qual é realimentado para a segunda Equação diferencial do conjunto de Equações 3. De forma similar, o erro de potência da máquina passa por um controlador que gera a corrente de referência ao longo do eixo q, $I_{qr,ref}$, a qual é comparada com a corrente do rotor do gerador, medida ou calculada, sendo o erro entre as duas realimentado para um controlador PI. Finalmente, a saída deste controlador corresponde à tensão no rotor ao longo do eixo q, a qual é realimentada para primeira Equação diferencial do conjunto de Equações 3.

3.0 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As turbinas eólicas foram testadas no sistema ilustrado na Figura 8, retirado de (12). As contingências aplicadas foram um curto-circuito de 100 ms na barra do gerador e uma redução de 5% na tensão da barra infinita. Os geradores estão funcionando com FP=1. Os testes são realizados com ambos os geradores e suas respostas são comparadas nas Figuras 9-18.

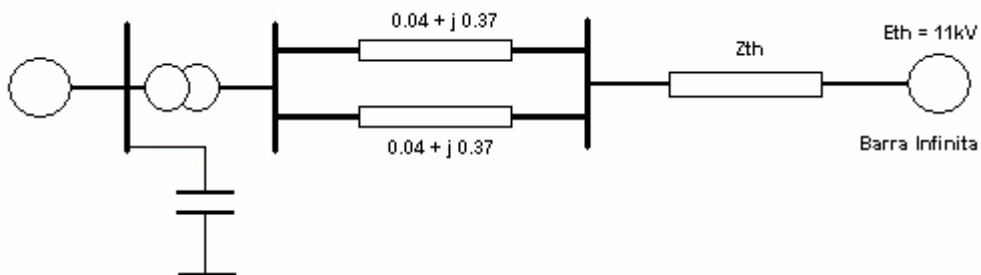


FIGURA 8 – Rede elétrica utilizada no teste (12)

a) Curto circuito de 100 ms na barra do gerador eólico, no instante $t = 5$ segundos

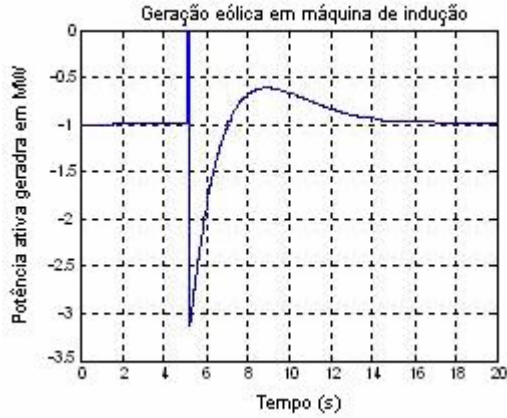


FIGURA 9 – Potência ativa (Gaiola de Esquilo)

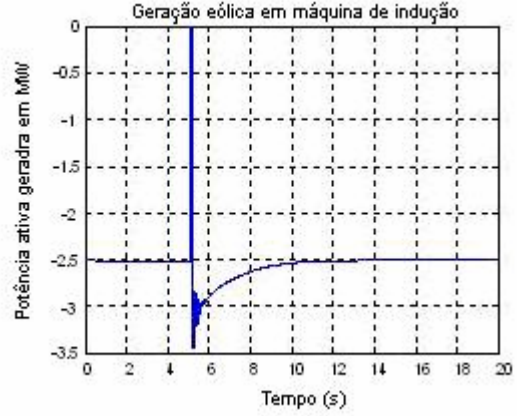


FIGURA 10 – Potência ativa (DFIG)



FIGURA 11 – Potência reativa (Gaiola de Esquilo)

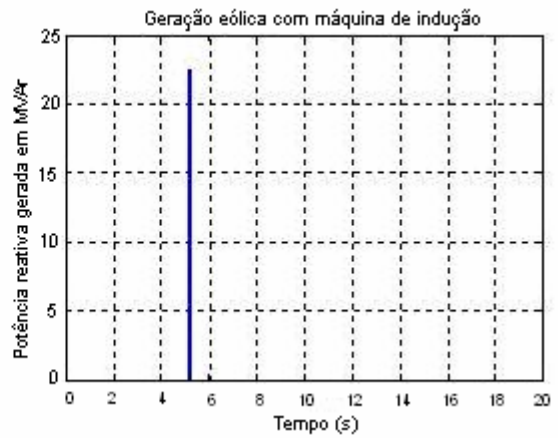


FIGURA 12 – Potência reativa (DFIG)

b) Redução de 5% na tensão da barra infinita, a partir do instante $t = 5$ segundos

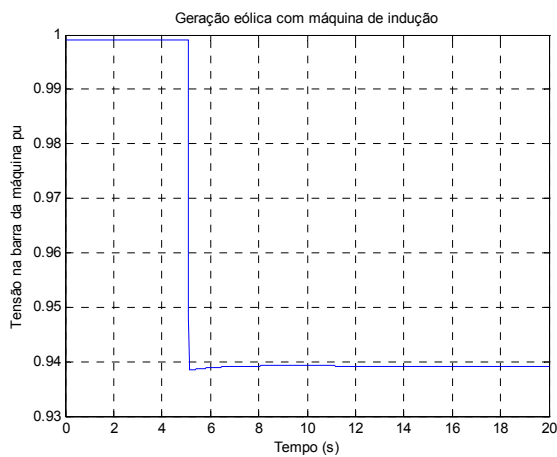


FIGURA 13 – Tensão na barra 3 (Gaiola de Esquilo)

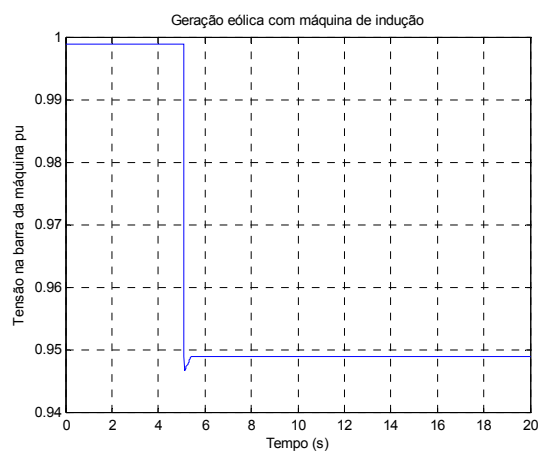


FIGURA 14 – Tensão na barra 3 (DFIG)

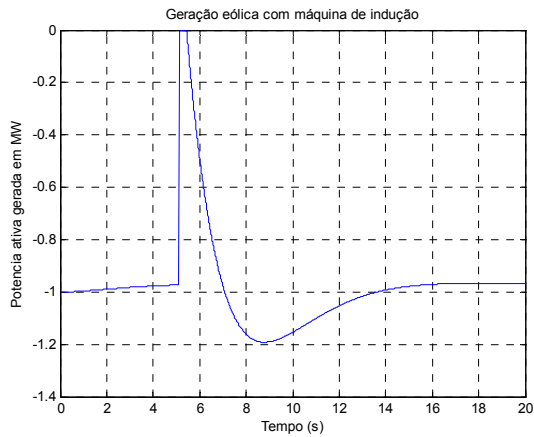


FIGURA 15 – Potência ativa (Gaiola de Esquilo)

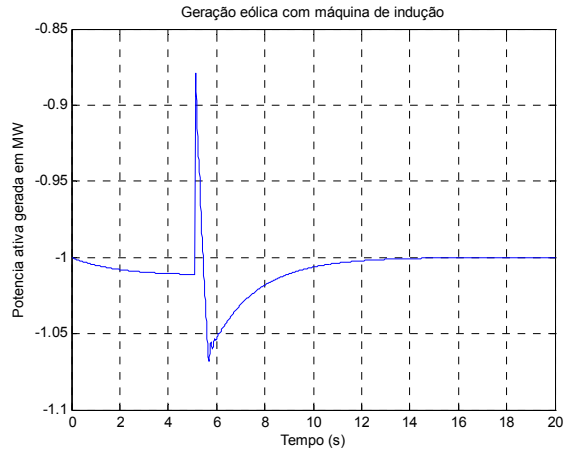


FIGURA 16 – Potência ativa (DFIG)

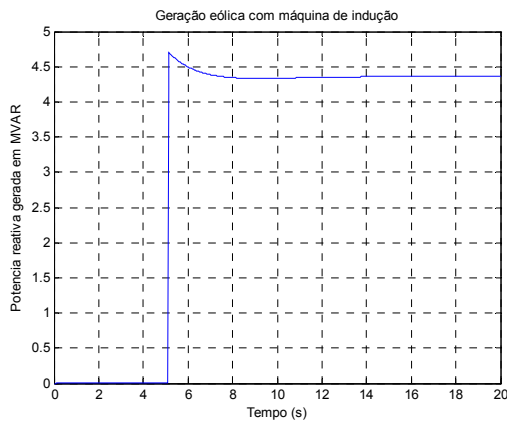


FIGURA 17 – Potência reativa da turbina (MI)

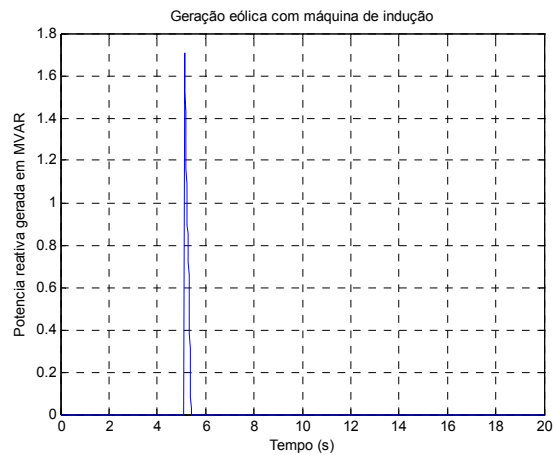


FIGURA 18 – Potência reativa da turbina (DFIG)

4.0 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas simulações realizadas com o modelo implementado observa-se que a turbina de velocidade variável com DFIG, quando submetida à falta de 100 ms, possui uma rápida restauração de potência com menor variação de amplitude quando comparada à turbina equipada com gerador de indução em gaiola de esquilo. Esta maior estabilidade do DFIG é conseguida graças ao conversor de potência que contribui com uma parcela de potência de amortecimento. Quando a tensão é reduzida, o conversor do DFIG também contribui com demanda de potência reativa mantendo o nível de tensão na barra do gerador eólico com amplitude maior que quando usado o gerador gaiola de esquilo, e levando para próximo de zero a demanda de reativo da máquina duplamente alimentada.

Como pode ser visto nas simulações, as turbinas eólicas de velocidade variável equipadas com geradores de indução duplamente alimentados, além de injetarem potência ativa na rede, contribuem substancialmente com a estabilidade do sistema. Essa grande vantagem faz com que as turbinas eólicas equipadas com DFIG, apesar de serem um pouco mais caras que as simplesmente equipadas com MI, são preferenciais quando da injeção de potência eólica na rede de energia elétrica convencional.

5.0 - CONCLUSÃO

. De forma geral, do ponto de vista de resposta, os resultados das simulações confirmam a expectativa de que as turbinas eólicas equipadas com geradores de indução gaiola de esquilo consomem uma considerável demanda de potência reativa quando submetida a uma falta próxima,. Por outro lado, é verificado que a adoção dos esquemas de velocidade variável, baseados em geradores de indução duplamente alimentados excitados com conversores de potência diminui a necessidade de reativos da máquina em uma falta, contribuindo para melhoria da estabilidade do sistema. Os modelos desenvolvidos no CDU da ANATEM, apesar de simplificados, apresentaram desempenho satisfatório nas simulações e os resultados foram

coerentes quando comparados com outros modelos na literatura. Isto demonstra que os modelos desenvolvidos podem ser utilizados para simulação de sistemas eólicos com a garantia de uma resposta, apesar de aproximada, confiável frente às perturbações na rede de energia elétrica.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Ladakakos,P.D., Loannides,M.G.,Koulouvari,M.I.- Assessment of Wind Turbines Impact on the Power Quality of Autonomous Weak Grids .IEEE Transactions,1998.
- (2) Leidhold,R., Garcia,G.-Variable Speed Field-Oriented Controlled Induction Generator .IEEE Transactions,1998.
- (3) Marra,E.G., Pomilio,J.A.-Sistemas de Geração baseados em Gerador de Indução Operando com tensão Regulada e Frequência Constante. SBA Controle & Automação Vol.11 no.01/Jan.,Fev.,Mar,Abril de 2000.
- (4) Iov,F., Blaabjerg,F., Chen,Z., Hansen,A. D.,Sorensen,P. - A New Simulation Platform to Model,Optimize and Design Wind Turbines.IEEE Transactions,2002.
- (5) Iov,F., Blaabjerg,F., Chen,Z., Hansen,A. D.- Comparative Study of Different Implementations for Induction Machine Model in Matlab/Simulink for Wind Turbine Simulations. IEEE Transactions,2002.
- (6) Carlson,O.,Perdana,A.,Ullah,N.R.,Martins,M.,Agneholm,E. - Power System Voltage Stability Related to Wind Power Generation.
- (7) Poller,M.,Achilles,S.- Aggregated Wind Park Models for Analyzing Power System Dynamics.
- (8) Manual de Treinamento do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos ANATEM/CEPEL.Versão V)&08-99.Manual do Usuário,Maio 2000.
- (9) Mota,W.S., Barros,L.S., Pamplona,F.M.P., Epamimondas,A.N., Filho, E.R.B., Formiga, A.M., Santos,A.A.F. - Wind Generation Dynamic Simulation Connected to the Electric Power System. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America, 2004.
- (10) Kim,S.k.,Kim,E.S.,Yoon,J.Y.,Kim,H.Y- PSCAD/EMTDC Based Dynamic Modeling and Analysis of Variable Speed Wind Turbine – Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE Volume , Issue , 6-10 June 2004 Page(s): 1735 - 1741 Vol.2
- (11) Slootweg,J.G.,Haan,S.W.H de., Polinder,H., Kling,W.L.- Aggregated Modelling of Wind parks With Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations .14th PSCC,Sevilla,24,28 Junho 2002
- (12) Sun,T.,Chen,Z.,Blaabjerg,F.- Voltage recovery of grid-Connected Wind Turbines After a Short-Circuit Fault. Industrial Electronics Society, 2003. IECON 2003. The 29th Annual Conference of the IEEE Volume 3, Issue , 2-6 Nov. 2003 Page(s): 2723 - 2728 Vol.3

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Walbermark Marque dos Santos

Nascido em São Luis, MA em 10 de outubro de 1973.

Aluno de Mestrado (atual) e Graduação (2003) em Engenharia Elétrica: UFMA, Maranhão.