



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 16 7697

Tópico: Qualidade da Energia em Sistemas com Geração Distribuída

AVALIAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS PRODUZIDOS POR AEROGERADORES DE MAGNETO PERMANENTE EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

FERNANDO
M.C.S.
SANTOS*

MARCUS V.A.
NUNES

TADEU M.M.
BRANCO

JOÃO T.
PINHO

RODRIGO G.
ARAÚJO

HALLAN M. S.
SOUZA

GEDAE / UFPA NESCE / UFPA GEDAE / UFPA GEDAE / UFPA / CENPES / PETROBRAS GEDAE / UFPA

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo do comportamento dinâmico dos aerogeradores de velocidade variável que utilizam a máquina síncrona com magneto permanente, com base na análise transitória que deve ser realizada quando da avaliação dos impactos da conexão de parques eólicos que adotam esta concepção tecnológica, em um sistema de energia elétrica. Os estudos realizados são desenvolvidos através de simulações em um algoritmo de análise de estabilidade transitória, desenvolvido para avaliar os eventuais problemas de estabilidade que podem surgir da conexão de aerogeradores em uma rede elétrica. O algoritmo foi implementado através de rotinas do ambiente de simulação matemática MATLAB™.

PALAVRAS-CHAVE

Aerogeradores de velocidade variável, Estabilidade transitória, Modelos de aerogeradores síncronos e assíncronos, Modelos dos conversores estáticos, Conexão de parques eólicos no sistema elétrico.

1.0 INTRODUÇÃO

Considerando a interligação de parques eólicos à rede elétrica, existe a necessidade de diversos estudos específicos, de modo a avaliar os impactos que os mesmos podem causar no sistema elétrico, tanto na operação em regime permanente, quanto em situações de distúrbios transitórios severos na rede elétrica.

A dinâmica do sistema elétrico considerado neste trabalho é simulada a partir de um algoritmo em ambiente MATLAB™, original, com interface

amigável, quando se faz a simulação de diferentes casos de possíveis contingências na rede elétrica.

Neste artigo, é apresentado o modelo da máquina síncrona de magneto permanente (MSMP), em esquema de velocidade variável, e do conversor estático. São também apresentados e discutidos os resultados da simulação, considerando o comportamento dinâmico da referida máquina comparando-a com a máquina síncrona bobinada (MSRB), e com as máquinas assíncronas duplamente excitadas (MADE) e com rotor em gaiola (MARG). O objetivo da discussão é mostrar as principais diferenças entre estas tecnologias e os impactos que as mesmas podem causar na rede elétrica.

Os modelos dos elementos que compõem o sistema elétrico convencional considerado, e das demais concepções de aerogeradores existentes, nos esquemas de velocidade fixa e variável, são encontrados em [1] e [2].

2.0 MODELO MATEMÁTICO

A aplicação dos geradores de magneto permanente nos sistemas eólicos é idêntica à da máquina síncrona padrão, com exceção da característica do campo magnético principal no rotor, o qual é gerado por magnetos permanentes. Estes geradores trabalham em baixas velocidades, diretamente acoplados ao rotor das turbinas eólicas, sem necessidade da caixa de engrenagens, mostrados na figura 1.

Assim como para o gerador eólico síncrono bobinado, nesta configuração toda a potência

elétrica gerada pela máquina é processada pelo conversor de potência que funciona como a interface com a rede elétrica.

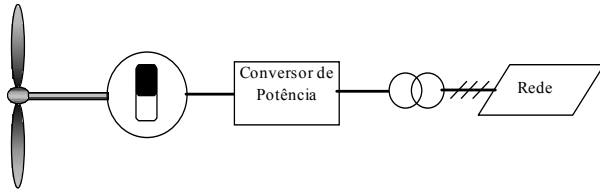


Fig. 1 - Sistema eólico com gerador de magneto permanente [2].

A referência [3] mostra a representação esquemática do aerogerador de magneto permanente ilustrado na figura 2.

A substituição da excitação proporcionada através de uma fonte CC, por um magneto permanente, implica na eliminação das perdas no cobre do enrolamento rotórico.

As equações que descrevem a dinâmica da máquina síncrona com magneto permanente, são similares àquelas que descrevem a dinâmica da máquina síncrona excitada por uma fonte CC externa.

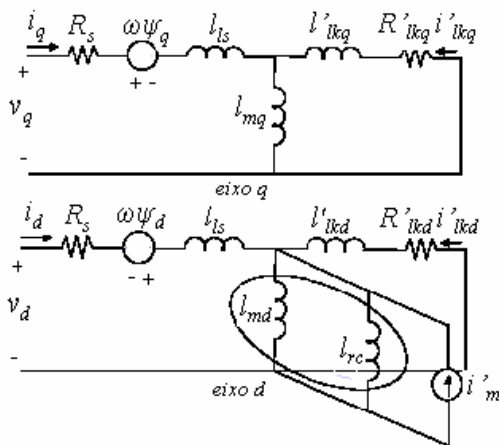


Figura 2 - Modelo equivalente dq para o gerador síncrono excitado por magneto permanente [3].

As equações que descrevem o comportamento do gerador são representadas através do modelo de uma tensão atrás da reatância transitória. A partir das equações de fluxo, que consideram os enrolamentos amortecedores, a máquina síncrona com magneto permanente pode ser representada por um modelo dq de ordem 4, conforme [3].

As equações algébricas do estator são:

$$v'_q = v_f + i_d \frac{\omega}{\omega_0} (X_d - X'_d) \quad (1)$$

$$v''_q = v_q + R_s i_q - \frac{\omega}{\omega_0} X''_d i_d \quad (2)$$

e,

$$v''_d = v_d + R_s i_d + \frac{\omega}{\omega_0} X''_q i_q \quad (3)$$

As equações diferenciais relacionadas com a dinâmica do rotor são:

$$\frac{dv''_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} \left[v'_q - v''_q + i_d \frac{\omega}{\omega_0} (X'_d - X''_d) \right] \quad (4)$$

$$\frac{dv''_d}{dt} = \frac{1}{T''_{q0}} \left[-v''_d - i_q \frac{\omega}{\omega_0} (X'_q - X''_q) \right] \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - D\Delta\omega) \quad (6)$$

e,

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 = \Delta\omega \quad (7)$$

em que:

v_f - tensão de campo da máquina referida ao estator;

$v'_{i; i=d, q}$ - tensão transitória de eixo direto, ou de quadratura;

$v''_{i; i=d, q}$ - tensão sub-transitória de eixo direto, ou de quadratura;

$i_{i; i=d, q}$ - corrente segundo o eixo direto, ou de quadratura;

$X_{i; i=d, q}$ - reatância de eixo direto, ou de quadratura;

$X'_{i; i=d, q}$ - reatância transitória de eixo direto, ou de quadratura;

$X''_{i; i=d, q}$ - reatância sub-transitória de eixo direto, ou de quadratura;

R_s - resistência da armadura;

T'_{d0} - Constante de tempo transitória do eixo direto;

T''_{d0} - Constante de tempo sub-transitória do eixo direto;

T''_{q0} - Constante de tempo sub-transitória do eixo de quadratura;

$\frac{dv''_q}{dt}$ e $\frac{dv''_d}{dt}$ - taxa de variação de v''_q e v''_d no tempo;

$\frac{dv'_q}{dt}$ - taxa de variação de v'_q no tempo;

ω - velocidade angular do rotor do gerador em radianos por segundo;

ω_0 - velocidade angular síncrona em radianos por segundo;

D - coeficiente de amortecimento de carga (*pu kW/pu Hz*);

H - constante de inércia incluindo o gerador e a turbina;

T_e - torque eletromagnético do gerador;

T_m - torque mecânico desenvolvido pela turbina eólica.

3.0 MODELOS DOS CONVERSORES

Os aerogeradores que adotam as máquinas síncronas de magneto permanente são interligados ao sistema elétrico através de conversores estáticos, existindo assim a necessidade de modelar tanto os conversores interligados ao gerador quanto os interligados à rede elétrica, uma vez que estes últimos processam toda a potência proveniente dos geradores.

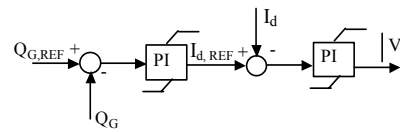
Como o conversor encontra-se interligado ao estator, a potência ativa da máquina síncrona de magneto permanente será controlada pela corrente ao longo do eixo q , I_q , do estator ou de forma equivalente, pelo ângulo entre a tensão terminal e a tensão interna de excitação. A potência reativa será controlada pela corrente do eixo d do estator, I_d , ou pelo módulo da tensão terminal [4], conforme estabelecido nas malhas de controle apresentadas na figura 3 para o conversor interligado aos geradores síncronos de magneto permanente.

O controle da potência reativa é realizado sempre pelos conversores interligados ao estator, uma vez que não há acesso a corrente de campo nas máquinas com magneto permanente.

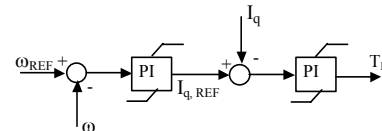
4.0 ESTUDOS DE CASOS

Para validação dos modelos desenvolvidos e do software são realizadas nesta seção simulações computacionais utilizando uma rede elétrica de distribuição proveniente de [5] e apresentada na figura 4 a seguir, sendo desenvolvidos estudos em relação à resposta transitória do referido sistema, com a inclusão de esquemas eólicos de velocidade fixa e variável, individualmente, e sob a ocorrência das contingências de curto-circuito simétrico na rede e retirada de geração convencional. Sendo que, para cada uma das referidas contingências, são levantadas as curvas de comportamento dos aerogeradores: velocidade angular do rotor das

máquinas eólicas, tensões nas barras de geração, e potência reativa.



(a) Conversor do lado do Gerador.



(b) Conversor do lado da rede elétrica

Fig. 3 - Conversor estático bi-direcional interligado ao estator da máquina síncrona de magneto permanente - controle da potência ativa (b) e da potência reativa (a) [2].

O sistema original da referência [5] foi modificado para inclusão de um parque eólico composto de 26 turbinas de potência correspondente a 1 MW cada com os geradores assíncronos, e 13 turbinas de potência correspondente a 2 MW cada com os geradores síncronos bobinados e de magneto permanente, interligados alternadamente à rede de distribuição através de transformadores em 0.69/13.8 kV. Além do gerador eólico, dois sistemas Diesel convencionais com geradores síncronos atendem a carga elétrica da rede. Um sistema Diesel de 75 MVA é ligado à barra 1, G_{s1} , e outro de 35 MVA na barra 3, G_{s2} , conforme a figura 4. As barras de carga correspondem a 5, 6 e 7 e estão indicadas com setas.

O sistema eólico é representado por uma única máquina diretamente interligada à subestação, com inércia e potência equivalentes a composição do parque eólico [1] e [2].

Os valores em p.u. para os parâmetros do sistema de transmissão, dos geradores síncronos e dos reguladores de tensão e velocidade das fontes convencionais Diesel foram obtidos a partir de [6] e [7]. Os parâmetros dos reguladores dos aerogeradores síncronos e assíncronos estão descritos em [1]. A dinâmica do sistema é simulada a partir de um programa e ambiente, originais, desenvolvidos para estudos de estabilidade transitória, utilizando como plataforma o software MATLABTM, versão 6.5 para Windows.

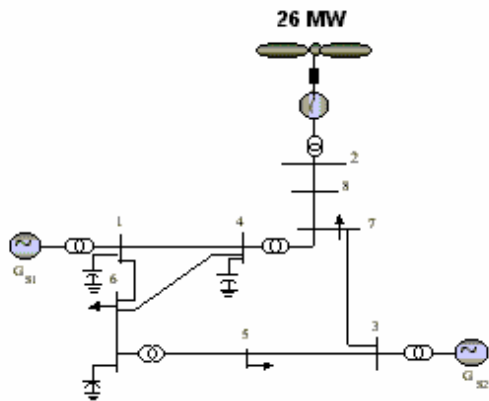


Fig.4 - Sistema elétrico com inclusão do parque eólico [2].

4.1 Curto-circuito simétrico na rede elétrica

Este caso analisa a resposta do sistema elétrico com a presença da geração eólica (26 MW), na ocorrência de um curto-circuito trifásico simétrico no ponto de conexão do parque eólico com a rede elétrica exemplo – barra 7, no instante $t=1$ segundo.

O tempo de duração do curto-circuito considerado na simulação é igual a 100 ms; após esse tempo é suposto que o curto-circuito foi eliminado da rede elétrica. Foi considerado um tempo total de simulação de 15 segundos. Os gráficos ilustrando o comportamento das quatro concepções de parques eólicos podem ser observados nas figuras 5, 6 e 7.

No caso do parque eólico com máquinas assíncronas em gaiola (MARG), o curto-circuito aplicado na barra 7 isola o mesmo e o seu banco de capacitores do resto do sistema. De acordo com a figura 6 pode-se verificar que essa tensão não cai totalmente a zero, isto devido a uma tensão residual relativa ao banco de capacitores que supre a máquina. Nas máquinas síncronas com magneto permanente (MSMP), síncronas com rotor bobinado (MSRB), e assíncronas duplamente excitadas (MADE), constatamos a atuação dos reguladores associados aos conversores estáticos, os quais fazem com que a tensão não caia e retorne ao valor antes da falta.

Através da figura 5, verifica-se que no decorrer do curto-circuito verificamos a aceleração das máquinas, o que é provocado pelo decréscimo das potências ativas e, portanto, dos torques eletromecânicos associados aos geradores da rede elétrica.

Contudo, de acordo com a figura 7, verifica-se que a potência reativa fornecida pelos parques

eólicos com máquinas síncronas (MSRB e MSMP) sofre um acréscimo de modo a suprir a falta, enquanto que nas máquinas assíncronas (MARG e MADE), as mesmas deixam de consumir reativo do sistema para que este seja fornecido para o curto-circuito.

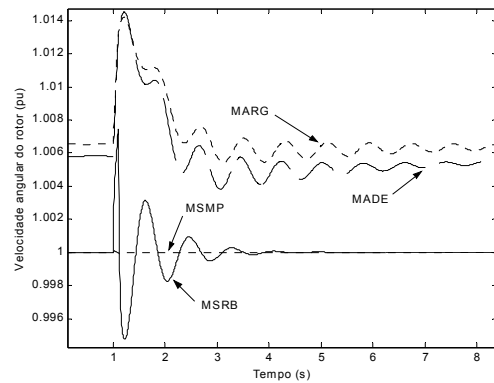


Fig.5 – Comportamento da Velocidade nos Geradores

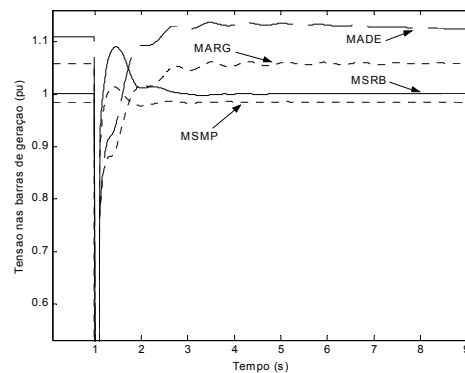


Fig.6 – Comportamento da Tensão nos Geradores

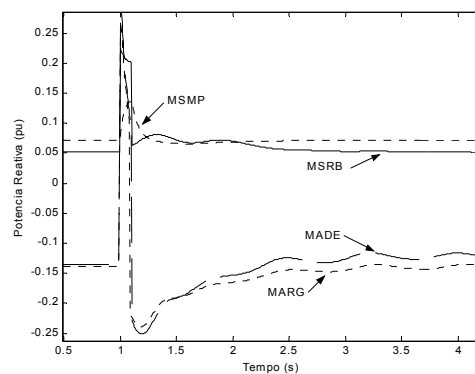


Fig.7 – Comportamento da Potência Reativa

Os conversores estáticos, associados aos esquemas eólicos de velocidade variável proporcionam controle independente de reativos e potência ativa para o parque eólico, auxiliando na manutenção da margem de

estabilidade transitória do mesmo e proporcionando com que a potência reativa demandada durante a falta retorne ao seu valor de regime original.

4.2 Perda de geração convencional

Neste caso, é investigado o impacto, no sistema em estudo, da retirada de operação de uma parte da geração convencional a diesel. É retirado o gerador de 35,3 MVA, o qual está conectado na barra 3.

As simulações foram realizadas supondo que no instante $t = 1s$ é realizada a retirada de parte do sistema convencional. O tempo total de análise considerado no algoritmo foi de 20 s. Os resultados das simulações são apresentados nos gráficos das figuras 8, 9, e 10.

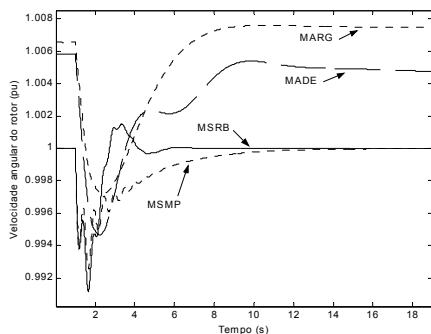


Fig.8 – Comportamento da Velocidade nos Geradores

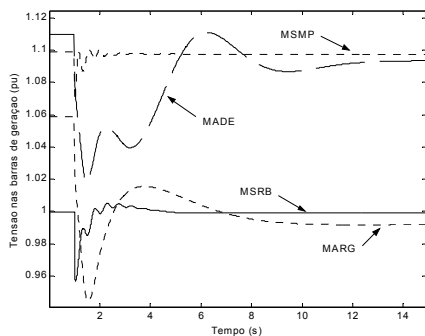


Fig.9 – Comportamento da Tensão nos Geradores

De acordo com a figura 9, após a retirada de parte da geração convencional, os níveis de tensão das barras de geração diminuíram devido ao sistema operar com a potência demandada maior que a potência gerada. Os reguladores de tensão da máquina síncrona com magneto permanente (MSMP), da máquina síncrona com rotor bobinado (MSRB), e da máquina duplamente excitada (MADE) atuam fazendo com que as tensões nas barras de geração eólica retornem para os

valores de tensão de regime permanente, anteriores à contingência. Verifica-se que a máquina assíncrona duplamente excitada, comparada com a síncrona com magneto permanente e síncrona com rotor bobinado, leva mais tempo para atingir o nível de tensão desejado. Para a máquina com rotor em gaiola (MARG), sem conversor, a retirada da geração convencional provocou uma diminuição no valor de tensão, e a mesma se estabiliza em um novo ponto de operação.

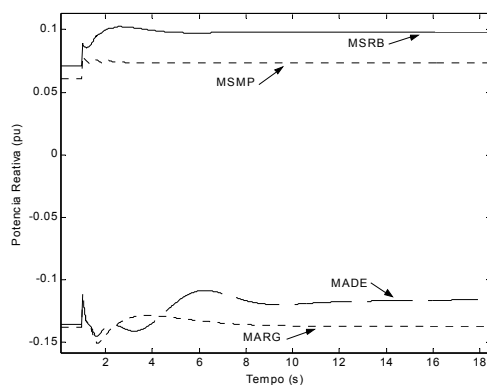


Fig.10 – Comportamento da Potência Reativa

De acordo com a figura 10, as máquinas síncronas com magneto permanente (MSMP) e com rotor bobinado (MSRB) aumentam o fornecimento de potência reativa, e a máquina assíncrona duplamente excitada (MADE) deixou de consumir reativo para que o mesmo fosse fornecido para o sistema. Em relação a máquina assíncrona com rotor em gaiola (MARG), a potência reativa oscila, porém após a contingência, a máquina se estabiliza e volta a consumir a mesma quantidade de reativo em regime permanente que anteriormente.

Analisando as velocidades angulares dos rotores das máquinas em questão, apresentadas na figura 8, verifica-se que as mesmas diminuem. Através do regulador de velocidade as máquinas síncronas com magneto permanente (MSMP) e com rotor bobinado (MSRB) retornam para a velocidade angular de operação em regime permanente, enquanto que para a máquina assíncrona duplamente excitada (MADE) o regulador atua e não consegue retornar para o valor de regime anterior a contingência. Esse fato é decorrente dos parâmetros dos reguladores de tensão utilizados serem experimentais. No caso da máquina assíncrona com rotor em gaiola (MARG), a sua velocidade retorna para o mesmo ponto de operação anterior a contingência, com um pequeno erro quanto ao valor, devido à mesma não possuir um regulador de velocidade

(conversor de frequência) para zerar o referido erro de velocidade angular.

5.0 CONCLUSÕES

Neste artigo foi avaliado o comportamento de aerogeradores quanto aos aspectos de estabilidade transitória a grandes perturbações quando os mesmos operam em conjunto com unidades de geração convencionais.

Os resultados obtidos nas simulações demonstram claramente o melhor desempenho dinâmico dos esquemas eólicos de velocidade variável em termos de controlabilidade do sistema de energia elétrica na frequência de ocorrência de contingências. Em comparação com a máquina assíncrona duplamente excitada, e a máquina síncrona com rotor bobinado, a síncrona de magneto permanente se estabiliza mais rapidamente. Tal desempenho foi proporcionado pela atuação quase instantânea dos reguladores associados aos conversores estáticos interligados à máquina.

As pequenas diferenças existentes nas respostas das máquinas síncronas com magneto permanente e com rotor bobinado são compensadas pelos conversores estáticos e os resultados são bastante similares em relação à interação com o sistema de energia elétrica. A máquina síncrona de magneto permanente tem uma resposta ligeiramente melhor quanto às variações de tensão, devido ao conversor do lado do gerador que regula a tensão controlando a potência reativa.

As simulações realizadas também evidenciaram o desempenho do programa computacional apresentado, além da suficiente

precisão dos modelos matemáticos utilizados para representar as máquinas girantes e os demais componentes da rede elétrica.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Nunes, M.V.A. . *Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2003.
- [2] Nunes, M.V.A.; Zürn, H.H. and Bezerra, U. H.; J. P. A. Vieira, M. F. de Medeiros, R. N. M. Machado, S. R. e Silva, R. F. Pinheiro, J. T. de Oliveira, F. M. C. S. Santos. *New Representation of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Studies*. IV INDUSCON, Joinville, Outubro, 2004.
- [3] Kariniotakis, G. N. *et alii* . *Digital models for micro sources*. In: Large Scale Integration of Micro Generation to Low Voltage Grids, Contract N° ENK-CT-2002-00610, 94 p, 2004.
- [4] Nunes, M.V.A.; Zürn, H.H. and Bezerra, U. H.; Peças Lopes, J. A. and Almeida, R.G. *Influence of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids*. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 692 – 701, December, 2004.
- [5] Sørensen *et alii*. *Simulation of Interaction between Wind Farm and Power System*. Risø National Laboratory, Roskilde, Risø-R-1281(EN), Denmark, December, 2001.
- [6] Anderson, P. M.; Fouad, A. A. *Analysis of Faulted Power Systems*. Iowa State University Press, 1973.
- [7] Kundur, P. *Power System Stability and Control*. USA: McGraw-Hill, 1994.