

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Sistema de Conversão de Energia Eólica com Máquina Elétrica e Conversor Estático

AUTORES:

Filipe Vieira Rocha¹, Cursino Brandão Jacobina².

INSTITUIÇÃO:

Bolsista PRH-42, filipe.rocha@ee.ufcg.edu.br, ¹Unidade acadêmica de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande,

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA COM MÁQUINA ELÉTRICA E CONVERSOR ESTÁTICO

Abstract

Global warming resulting from increased carbon dioxide emissions is a serious global problem. Global concerns about the reduction of fossil fuels and environmental issues such as emissions and global warming has led to increasing use of alternative energy sources. The use of wind power is promising in electrical power generation systems. The conversion of wind energy into electrical energy presents critical aspects. For example, one can cite the inconstancy of the winds and the need for control of active and reactive power, critical aspects in the case of connection to the power grid. The intermittent feature of the electricity generated can be mitigated, for example, associating the wind generation to generation with gas turbines, raw material produced in the oil industry. This article discusses the modeling of flexible wind generation system using AC electrical machines and associated converters or not the electrical grid, analyzing its characteristics as the characterization of the electrical generator, system modeling, definition and design of the controllers from the control loop speed and flow coupled to converter PWM control strategies.

Introdução

A crescente preocupação com as questões ambientais, em especial o aumento ou intensificação do efeito estufa, que ficou retratado como aquecimento global, vem estimulando a realização de pesquisas de desenvolvimento tecnológico que visam atingir uma sustentabilidade ambiental. A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. Ela é obtida pela energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento).

Um típico sistema de geração de energia eólica é composto por uma turbina eólica, máquina trifásica trabalhando como gerador acoplado ao conversor estático e a rede elétrica, conforme mostrado na figura 1. Inicialmente os geradores de indução eram conectados diretamente à rede elétrica, funcionando a velocidade constante. Não existia controle ativo da potência ativa e reativa. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, dos dispositivos de controle e medida, foi possível controlar ativamente a produção dos aproveitamentos eólicos.

Os conversores estáticos são elementos essenciais nos sistemas de conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa. Dentre os diversos tipos de conversores, aqueles com barramento CC são os mais utilizados por conta da simplicidade de controle proporcionada pelo desacoplamento introduzido pelo barramento. A melhoria do desempenho dos sistemas de acionamento, geração e compensação pode ser obtida através de topologias adequadas destes conversores. Em particular, na geração eólica, os conversores estáticos CA/CC/CA são componentes importantes aos sistemas de geração, principalmente, nos casos de conexão com a rede. A utilização de conversores estáticos permite um melhor desempenho no controle de potência ativa e reativa, variáveis importantes na regulação de tensão e frequência do sistema de potência.

Os conversores estáticos podem trabalhar de duas maneiras distintas como retificadores ou inversores. Quando se trabalha como retificador, o sinal CA proveniente da rede é convertido em CC, no caso o sinal CA é proveniente da máquina primária (turbina eólica) sendo retificada e invertida e entregue ao sistema elétrico. O sistema de controle é realizado por dois tipos de controladores, controlador PI e PI modificado que são responsáveis pelo controle das variáveis do sistema: correntes na máquina de indução, correntes no conversor, tensão no barramento, conjugado eletromagnético e velocidade da máquina.

Neste trabalho é mostrado como o sistema de conversão de energia eólica em elétrica é modelado e as técnicas de controle do mesmo.

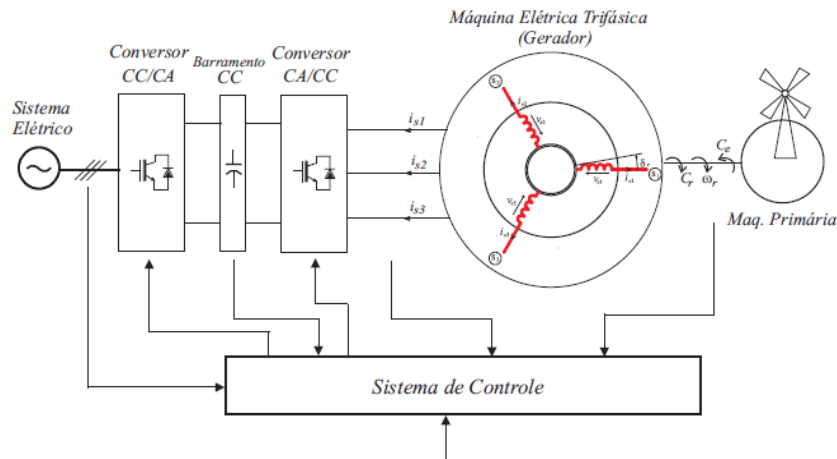


Figura 1 – Diagrama de blocos de sistema de geração de energia elétrica com máquina elétrica trifásica

Metodologia

Pesquisa e análise de trabalhos bibliográficos relacionados ao tema, identificação dos aspectos do sistema a serem melhorados, elaboração de proposta de melhoramento, elaboração de modelos dinâmicos e de regime permanente, realização de simulação do sistema proposto.

Conversor fonte de tensão trifásico e Comando PWM

A potência instantânea total, em um sistema trifásico equilibrado é constante, ou seja, não varia no tempo. Esta propriedade é extremamente importante, para alimentação de cargas de potência importante. O esquema da figura 2 representa o conversor trifásico utilizado na modelagem do sistema.

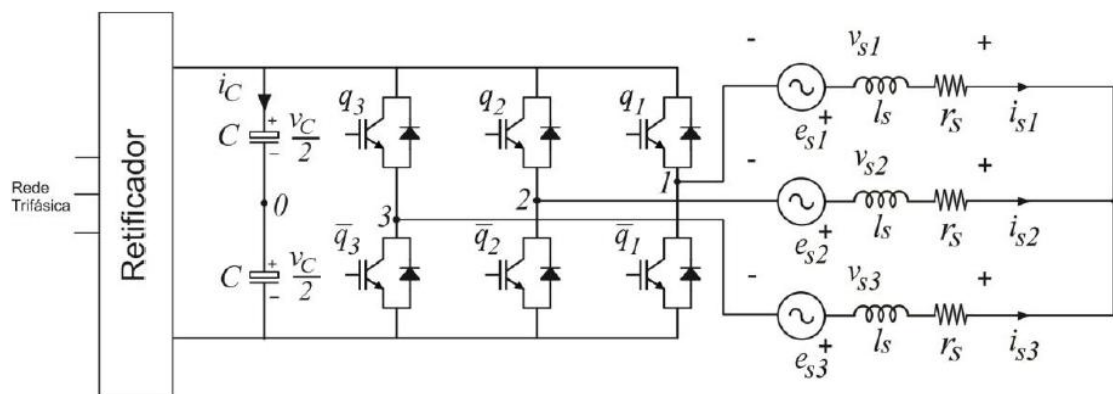


Figura 2 – Conversor fonte de tensão trifásico.

O conversor pode ser representado pelas seguintes equações:

$$v_{10} = v_{s1} + v_{n0} \quad (1)$$

$$v_{20} = v_{s2} + v_{n0} \quad (2)$$

$$v_{30} = v_{s3} + v_{n0} \quad (3)$$

As tensões v_{i0} para $i = 1, 2, 3$ representam as tensões de polo do conversor, que são determinadas pelo barramento (tensão nos capacitores) e pelos estados das chaves q_{gj} ($q_{gj} = 1$ representa chave fechada e $q_{gj} = 0$ chave aberta). A relação entre v_{n0} e q_{gj} é dada por:

$$v_{n0} = (2q_{gj} - 1) \frac{v_c}{2} \quad j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

Como o sistema é equilibrado as tensões v_{s1} , v_{s2} e v_{s3} estão defasadas 120° com a mesma amplitude então:

$$\sum_{i=1}^3 v_{si} = 0 \Rightarrow v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \quad (5)$$

Substituindo (1), (2), (3) em (5):

$$v_{n0} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 v_{j0} \quad (6)$$

Para o controle de estados das chaves, utilizou-se o comando PWM (modulação por largura de pulso) que tem intuito de impor tensões v_{gj}^* de referência na carga, com valores médios constantes no intervalo de chaveamento T. As tensões de referencia obtidas são da forma:

$$v_{gj}^* = V_g^* \cos\left(\omega t - (j-1) \frac{2\pi}{3}\right) \quad j = 1, 2, 3$$

De acordo com as equações (1), (2) e (3) podemos escrever as tensões de referência em função de um grau de liberdade v_{n0}^* :

$$v_{i0}^* = v_{gi}^* + v_{n0}^* \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Para gerar tensões médias em um intervalo T igual a v_{sj}^* deve se escolher um valor para o grau de liberdade v_{n0}^* . Como v_{j0} pode assumir dois valores $\pm \frac{v_c}{2}$, os valores máximo e mínimo de v_{n0}^* podem ser escritos da seguinte forma:

$$v_{n0max}^* = \frac{v_c}{2} - \max(v_{gj}^*) \quad (10) \quad v_{n0min}^* = -\frac{v_c}{2} - \min(v_{gj}^*) \quad (8)$$

Assim v_{n0}^* pode estar entre v_{n0max}^* e v_{n0min}^* , atribuindo um parâmetro μ ($0 < \mu < 1$), a escolha do grau de liberdade pode ser determinada por:

$$v_{n0}^* = \mu v_{n0max}^* + (1 - \mu) v_{n0min}^* \quad (9)$$

A escolha do fator μ influência nas características do conversor. Se $\mu = 1$ ou $\mu = 0$ diminui as perdas do conversor, pois um de seus braços não chaveia, na simulação realizada foi escolhido $\mu = 0.5$, reduzindo a distorção harmônica introduzida pela alta frequência de chaveamento.

Os estados das chaves q_{j0} podem ser obtidos, comparando-se um sinal triangular dado por:

$$trig = \pm \frac{v_c}{T} t$$

Com as tensões de referencias calculadas em (7), Com as equações descritas foi possível a realização da simulação do conversor trifásico, onde será apresentada no decorrer do artigo.

Motor de indução trifásico

Um motor de indução é composto por duas partes: estator e rotor com bobinas de eixos magnéticos defasados de 120°. O estator constitui a parte estática e o rotor a parte móvel. Para realização da modelagem do motor de indução se foi necessário o modelo odq, obtido por uma transformação de base decorrente da seguinte matriz:

$$P(\delta_p) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\delta_p) & -\sin(\delta_p) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\delta_p - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta_p - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\delta_p + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$x_{sodq} = P_s^{-1}(\delta_g)x_{s123} \quad x_{rodq} = P_s^{-1}(\delta_g - \delta_r)x_{r123}$$

No decorrer do artigo considere que x_{s123} representa as variáveis estatóricas (corrente, tensão ou fluxo) e x_{sodq} representa as variáveis equivalentes na nova base odq, de modo análogo para as variáveis rotóricas x_{r123} e x_{rodq} . O ângulo entre o estator e rotor é representado por δ_r e δ_g representa o ângulo de um eixo genérico. As equações que modelam a maquina de indução são mostradas nas equações abaixo:

$$v_s^g = r_s i_s^g + \frac{d\varphi_s^g}{dt} + j\omega_g \lambda_s^g \quad (10)$$

$$0 = r_r i_r^g + \frac{d\varphi_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)\varphi_r^g \quad (11)$$

$$\varphi_s^g = l_s i_s^g + l_m i_r^g \quad (12)$$

$$\varphi_r^g = l_r i_r^g + l_m i_s^g \quad (13)$$

$$P(c_e - c_m) = J \frac{d\omega_r}{dt} + F\omega_r \quad (14)$$

$$c_e = P \frac{l_m}{l_r} i_s (i_{sq}^g \varphi_{rd}^g - i_{sd}^g \varphi_{rq}^g) \quad (15)$$

Nas equações acima os parâmetros são definidos como: i) $v_s^g = v_{sd}^g + jv_{sq}^g$, $i_s^g = i_{sd}^g + ji_{sq}^g$, $i_r^g = i_{rd}^g + ji_{rq}^g$ no plano real x imaginário que representam tensão no estator, corrente no estator, corrente

no rotor respectivamente; ii) c_e , c_m , ω_g e ω_r são conjugado eletromagnético, conjugado mecânico, velocidade angular do eixo do motor e velocidade angular do rotor respectivamente; iii) l_s , l_r , l_m , r_s , r_r , J , F e P são a indutância própria do estator, indutância própria do rotor, indutância mutua, resistência do estatórica, resistência do rotórica, momento de inércia, coeficiente de atrito e pares de polos da máquina. O modelo da máquina é apresentado com mais detalhe em [1].

Determinação velocidade ótima e conjugado mecânico

O modelo aerodinâmico permite calcular o valor do conjugado mecânico aplicado ao eixo do gerador elétrico, considerando diferentes velocidades do vento e diferentes posições do ângulo de passo das hélices. Este modelo depende do tipo de turbina eólica a ser representado (eixo vertical ou horizontal, quantidade de hélices, controle de ângulo das pás, etc.). O modelo aerodinâmico independe do tipo de gerador elétrico escolhido ou do tipo de controle utilizado nos conversores. O conjugado mecânico é determinado pela seguinte equação:

$$c_m = \frac{1}{2} A \rho V^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (16)$$

Os parâmetros para determinação do conjugado mecânico são: A área varrida pela hélice da turbina, ρ densidade do ar, V velocidade média do vento, C_p coeficiente de potência, λ relação linear da velocidade $\left(\frac{\omega_m R}{V}\right)$, R raio da hélice da turbina, ω_m velocidade angular da hélice e β ângulo de passo das hélices da turbina. O coeficiente de potência C_p indica a eficiência com que a turbina eólica transforma a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica girante. A determinação do coeficiente de potência pode ser representada pelas seguintes equações:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7/\lambda_i} \quad \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1}}$$

As constantes c_1 - c_9 são determinadas segundo Sloodweg[2,3], os valores são representados na tabela 1.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Sloodweg	0,73	151	0,58	0,002	2,14	13,2	18,4	-0,02	-0,003

Tabela - 1

Na determinação do conjugado mecânico e velocidade ótima foi considerado $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$, $V = 8 \text{ m/s}$, $\beta = 0$, $R = 70 \text{ m}$, com esses dados verificou-se $\lambda = 7,24$ e $C_p = 0,4412$ e a partir da relação de λ e ω_m é determinada a velocidade ótima do aerogerador.

Resultados e Discussão

Os resultados foram obtidos por meio de simulação do sistema de geração de energia elétrica proposto neste artigo utilizando o software MatLab. A figura 3 ilustra o resultado obtido da simulação do conversor trifásico, mostrando as tensões médias geradas pelo conversor e suas correntes como também suas tensões chaveadas. A figura 4 mostra o controle de corrente e tensão de barramento do conversor utilizando os controladores PI modificado e PI respectivamente. A figura 5 ilustra as

variáveis da máquina de indução acoplada ao conversor trifásico. A figura 6 mostra a curva de potência do aerogerador com os parâmetros pré-estabelecido no artigo.

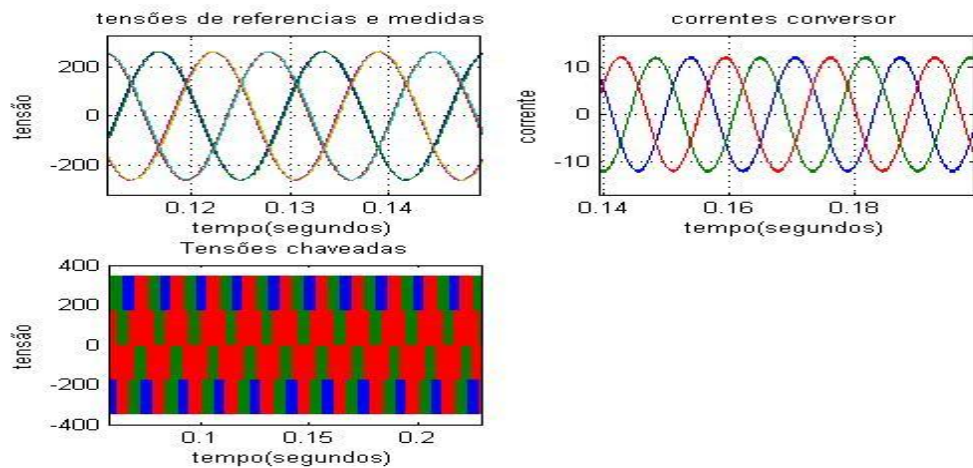


Figura 3 – Resultados simulação conversor trifásico.

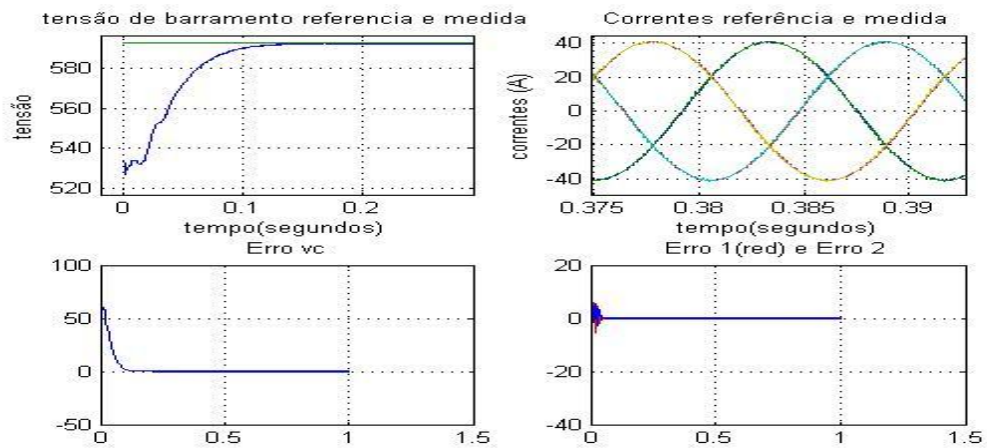


Figura 4 – Controle de tensão do barramento e Corrente do conversor.

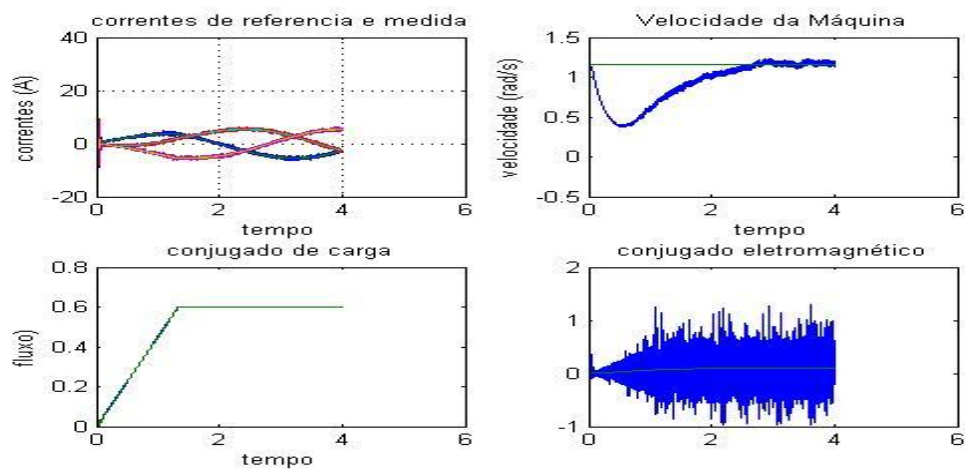


Figura 5 – Controle máquina de indução.

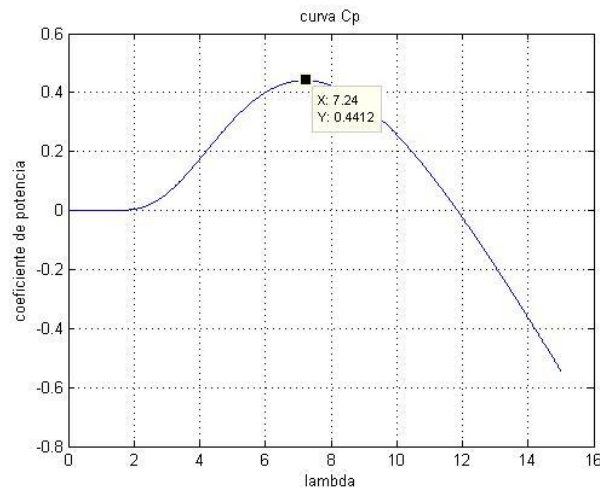


Figura 6 – Curva de coeficiente de potencia do aerogerador

Conclusões

Podemos verificar nos resultados obtidos que validam o modelo do conversor trifásico pelo fato das tensões geradas pelo conversor serem praticamente idênticas as tensões medidas do mesmo. No controle das variáveis tensão de barramento e correntes do conversor observa-se que tais variáveis seguem a referencia pré-estabelecida, validando o sistema de controle. Na máquina de indução as variáveis: velocidade da máquina e conjugado eletromagnético da máquina não seguem exatamente suas referências, isso se deve ao fato da baixa velocidade de referencia. Tal velocidade calculada com as características do aerogerador estudada neste artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido pela ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e pela PETROBRÁS, o apoio do Programa de Recursos Humanos (PRH-42) e ao Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos de Máquinas (LEIAM-UFCG).

Referências Bibliográficas

- [1] JACOBINA C. B., “Sistema de Acionamento Estático de Máquina Elétrica”, Curso de Acionamento, UFCG, Campina Grande, Junho 2005
- [2] Slootweg, J. G. Wind Power: Modelling and Impact on Power System Dynamics. Tese(doutorado)- Technical University of Delft, Holanda,, 2003.
- [3] Slootweg, J. G.; Polinder, H.; Kling, W. L. Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 4, pp. 516-524, 2003.
- [4] SALLES, M. B. C. Modelagem e Análise de Geradores Eólicos de Velocidade Variável Conectados em Sistemas de Energia Elétrica. Tese (Doutorado) São Paulo, SP 2009.
- [5] WENZEL, G. M. Projeto aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal. Trabalho de Conclusão de Curso, Porto Alegre, RS 2007.