

MODELAGEM E CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO USANDO O MÉTODO LINEAR QUADRÁTICO PARA APLICAÇÃO EM PLANTAS EÓLICAS

Vandilberto Pereira Pinto –e-mail: vandilberto@yahoo.com.br

José Carlos Teles Campos – e-mail: teles@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica.

5.2 Aplicações eólicas

Resumo. *O presente artigo mostra algumas concepções para interligação dos geradores de indução duplamente alimentados (Doubly-Fed Induction Generator - DFIG) às turbinas eólicas e à modelagem e simulação do gerador de indução e do conversor de potência conectado ao rotor que serão interligados à rede elétrica. Na estratégia de controle, as malhas de controle tradicionalmente usadas - com PI ou PID - são substituídas por um controlador LQR (linear quadratic regulator). As simulações computacionais foram desenvolvidas no ambiente Matlab/Simulink onde se pode observar a eficiência do controlador adotado, através da escolha das matrizes de ponderação Q e R e a estabilidade dinâmica do sistema através do posicionamento dos autovalores do sistema após ser linearizado e compensado.*

Palavras-chave: *Modelagem, Gerador de indução duplamente alimentado, lqr, controle ótimo.*

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica gerada através do aproveitamento dos ventos vem sendo depois da energia hidráulica, a mais utilizada fonte renovável no mundo. A geração eólica caracteriza-se comumente por uma geração interligada ao sistema de distribuição. O aumento na potência das turbinas eólicas e a maior participação desse modelo de geração na matriz energética em vários países do mundo têm chamado à atenção das empresas responsáveis pelo planejamento, operação e controle das redes de distribuição de energia onde tais geradores se conectam.

A perspectiva de crescimento em larga escala da geração eólica e sua integração ao sistema de suprimento de eletricidade no Ceará, tem desencadeado a necessidade de investigações sobre a sua influência na qualidade da energia. As investigações visam garantir o mínimo de distúrbio à rede elétrica e assim promover um melhor convívio com o novo modelo de operação do sistema.

Este artigo mostra algumas concepções para interligação dos geradores duplamente alimentados (DFIG) às turbinas eólicas e a modelagem do gerador e do conversor de potência interligado ao rotor onde será interligado com o sistema de transmissão. As simulações computacionais enfatizam a análise da estabilidade através do posicionamento dos autovalores (Kundur, 1994) e o melhor desempenho do controlador linear quadrático (LQR) através da escolha das matrizes de ponderação Q e R , substitui-se as malhas de controle tradicionalmente usadas com PI ou PID em diversos trabalhos da área, de modo que a tensão que será entregue ao barramento de distribuição da concessionária tenha reduzido nível de ruídos.

2. A ESCOLHA DO SISTEMA ELÉTRICO

Durante os últimos anos, diversos estudos foram realizados em sistemas elétricos para turbinas eólicas de velocidade variável. O gerador e o retificador devem ser escolhidos em conjunto enquanto o inversor pode ter sua escolha quase independente (Svensson, 1994).

O retificador a diodo é uma boa alternativa por causa de sua simplicidade, custo baixo e perdas baixas, mas gera correntes não senoidais e não pode controlar a tensão ou a corrente do gerador.

Um retificador com comutação-forçada é uma boa alternativa. Pode ser feito com tipos diferentes de interruptores eletrônicos de potência, mas a melhor escolha tem sido o uso do transistor bipolar isolado da porta IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), onde se pode controlar a tensão e a corrente do gerador além de apresentar uma ampla faixa de chaveamento.

Os inversores normalmente utilizados são o inversor de linha comutada (tiristores) e o inversor com comutação-forçada IGBT. Para esse conjunto, gerador e conversores existem várias concepções para a interligação dos geradores de indução duplamente alimentados às turbinas eólicas. Uma das configurações conforme Fig 1 é conhecida como Kramer Estático (Papadopoulos, 1999). O circuito é simples, porém limitado, pois trabalha somente nas velocidades sobre-síncronas.

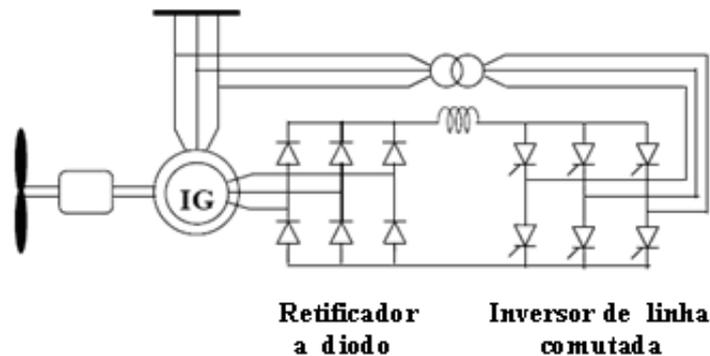


Figura 1-Configuração do DFIG com acionamento Kramer Estático.

Uma outra configuração conhecida é a Scherbius Estático (Pena, 1996), onde ocorre a substituição dos retificadores a diodo em ponte e dos inversores a tiristor, por conversores constituídos por IGBT's. O conversor com ligação "back-to-back" com PWM é apresentado na fig 2, sendo utilizado extensamente nos dias atuais. A modulação PWM reduz o componente harmônico atual na entrada e na saída do sistema. Em consequência, reduz a pulsação do torque no gerador e melhora a qualidade da potência de saída. Ela tem se tornado uma opção padrão para aplicações em altas potências (Nunes, 2004).

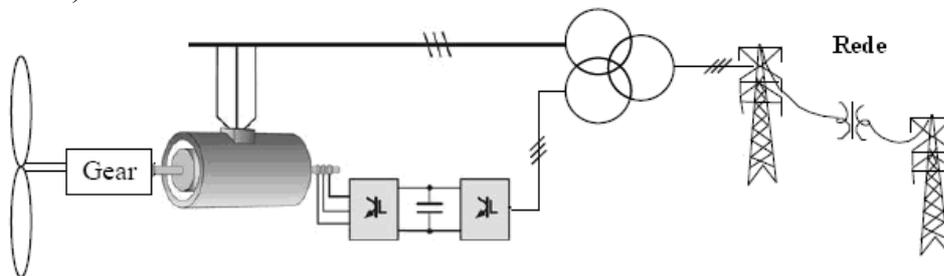


Figura 2-Configuração do DFIG com acionamento Scherbius- Estático.

O gerador de indução com dupla alimentação (DFIG) é uma máquina de indução com o rotor bobinado. Um dos conversores é conectado à rede e o outro é conectado aos enrolamentos do rotor, sendo que os dois conversores são interligados através de um circuito capacitivo e com controle PWM. O conversor interligado ao gerador controla a velocidade do rotor e a potência reativa injetada ou consumida pelo gerador através do estator. Já o conversor interligado à rede controla a tensão no barramento "cc" e a potência ativa que o rotor troca com rede (Vieira, 2006.).

3. MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO

No presente artigo, será apresentado a modelagem do gerador de indução através dos procedimentos clássicos utilizando as leis da física, no qual ocorre a conversão eletromecânica de energia levando à obtenção de modelos compactos de fácil interpretação física e de simples manuseio. Observando-se a fig 3 e fazendo-se uso das leis de Kirchof, pode-se escrever as expressões das tensões do estator e rotor para o gerador de indução (DFIG) trifásico como as que estão representadas nas equações (1-6), (Pereira, 2004).

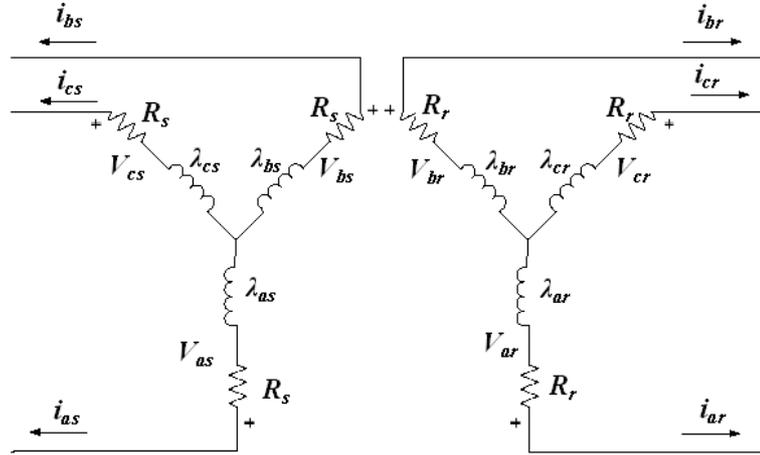


Figura 3-Circuito equivalente do gerador de indução.

Equações de tensão do estator

$$V_{as} = -R_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (1)$$

$$V_{bs} = -R_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (2)$$

$$V_{cs} = -R_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (3)$$

Equações de tensão do rotor

$$V_{ar} = -R_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (4)$$

$$V_{br} = -R_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad (5)$$

$$V_{cr} = -R_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad (6)$$

As equações do estator e do rotor do gerador submetidas á transformação de park, são expressas em componentes dq (d é o eixo direto e q é o eixo em quadratura) que podem ser representadas segundo as equações (7-10).

$$V_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (7)$$

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (8)$$

$$V_{dr} = -R_r i_{dr} - s\omega_s \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad (9)$$

$$V_{qr} = -R_r i_{qr} + s\omega_s \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \quad (10)$$

3.1 OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS

Para descrever completamente o funcionamento do gerador de indução é necessário considerar os fenômenos mecânicos que ocorrem na dinâmica da máquina. O modelo utilizado é o modelo de massa única. Dessa forma o acoplamento mecânico entre a turbina eólica e o gerador pode ser expresso pela seguinte equação.

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - D\omega_r), \quad (11)$$

sendo que H é a constante de inércia da turbina em [s], T_e é o conjugado eletromagnético desenvolvido pela máquina em (pu), T_m é o conjugado mecânico aplicado no eixo do rotor em (pu), D o coeficiente de amortecimento da carga elétrica [s] e ω_r a velocidade do rotor.

3.2. MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR

Para a modelagem do conversor interligado ao rotor do gerador, utilizou-se a técnica conhecida como controle vetorial com o eixo de referência alinhado ao fluxo magnético do estator tal que $\lambda_{qs} = 0$ e $\lambda_{ds} = v_{qs}$ (Pena, 1996). Desta forma, as equações diferenciais das correntes são descritas como:

$$\frac{di_{dr}}{dt} = -\frac{1}{L_{rr}\sigma} \left(V_{dr} + R_r i_{dr} - s\omega_s L_{rr}\sigma i_{qr} \right) . \quad (12)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = -\frac{1}{L_{rr}\sigma} \left(V_{qr} + R_r i_{qr} + s\omega_s L_{rr}\sigma i_{dr} - s\omega_s \left(\frac{L_m v_s}{L_{ss}} \right) \right), \quad (13)$$

$$\text{sendo } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_{rr} L_{ss}} .$$

As equações 12 e 13 são não lineares e devem ser linearizadas em um ponto de operação. O controle é feito através das correntes do rotor i_{dr} e i_{qr} respectivamente, de forma que o conversor do rotor seja controlado por correntes, mas modelado como fonte de tensão. O conjugado eletromagnético é dado por:

$$T_e = -\frac{L_m}{L_{ss}} v_s i_{qr} \quad (14)$$

A potência ativa e reativa e a tensão terminal na rede podem ser controladas de forma independente em função das correntes do rotor. As equações podem ser descritas por (Holdsworth, 2003):

$$P_s = -v_s \frac{L_m}{L_{ss}} i_{qr} , \quad (15)$$

$$Q_s = Q_{grid} = -\frac{v_s^2}{L_{ss}} - \frac{L_m v_s^2}{L_{ss}} i_{dr} , \quad (16)$$

onde pode-se observar que as potências ativa e reativa do estator são diretamente proporcionais as correntes i_{qr} e i_{dr} respectivamente.

4. O MODELO LINEARIZADO

A linearização do modelo foi feita através da expansão em série de Taylor em torno do ponto de operação, desprezando-se os termos de ordem superior. Desta forma podem-se considerar apenas os termos lineares. Estes termos devem ser suficientemente pequenos, isto é os valores das variáveis se desviam apenas ligeiramente da condição de operação. A equação linearizada pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (17)$$

Os pontos de operação serão denotados com o índice "0" e as variáveis de perturbações em torno dos pontos de operação serão denotadas com índice "Δ". Desta forma o sistema linearizado em torno de um ponto de operação passa a ser.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_{dr} \\ \Delta \dot{i}_{qr} \\ \Delta \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_{rr}\sigma} & s_0\omega_0 & 0 \\ -s_0\omega_0 & -\frac{R_r}{L_{rr}\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{rr}\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{rr}\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{qr} \\ \Delta v_{dr} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (18)$$

Definindo-se:

$$\Delta x = [\Delta i_{dr} \ \Delta i_{qr} \ \Delta \omega_r]^T \text{ e}$$

$$\Delta u = [\Delta v_{qr} \ \Delta v_{dr} \ \Delta T_m]^T .$$

5. A ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Como estratégias de controle, foi implementado o controlador linear quadrático (LQR), conforme fig 4, onde o conversor de potência interligado ao rotor foi modelado como fonte de tensão controlado por corrente.

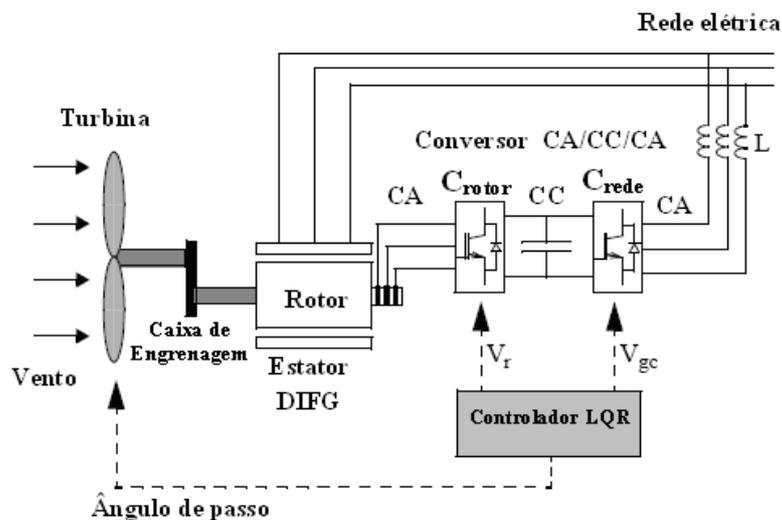


Figura 4-Esquema do gerador de indução com o controlador linear quadrático

Esse método ao invés de usar a localização dos pólos como critério de projeto, usa a minimização de um critério quadrático que está associado à energia das variáveis de estado e dos sinais de controle a serem projetados (Ekelund, 1997).

A energia de um sinal escalar é definida como:

$$\int_0^{\infty} s^2(t).dt \quad (19)$$

A energia de um sinal vetorial é dada por:

$$\int_0^{\infty} \sum_0^{\infty} x_i^2(t).dt = \int_0^{\infty} x'(t).x(t).dt \quad (20)$$

com

$$x(t) = [x_1 \dots x_{i-1} x_i]^T \quad (21)$$

A filosofia do projeto LQR é estabelecer um compromisso entre as energias do vetor de estado $x(t)$ e do vetor de controle $u(t)$, através da seguinte função de custo a ser minimizada:

$$J = \min_{u(t)} \int x'(t) Q(t)x(t) + u'(t)R(t)u(t)dt, \quad (22)$$

sendo Q e R matrizes definidas positivas, $Q > 0$ e $R > 0$. Supondo-se que o sistema seja estabilizável, ou seja, a lei de controle que estabiliza o mesmo e minimiza o critério é:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (23)$$

Sendo:

$$K = R^{-1}.B'.P \quad (24)$$

A matriz P, definida positiva, é solução da equação de Ricatti a seguir:

$$A'.P + P.A - P.B.R^{-1}.B'.P + Q = 0 \quad (25)$$

6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações desenvolvidas têm como objetivo avaliar o desempenho do controlador no estudo da estabilidade dinâmica de uma unidade eólica através da seleção das matrizes ponderação Q e R onde Q é uma matriz de ponderação associada aos estados do sistema e R é uma matriz de ponderação associada às entradas do sistema, sendo normalmente adotada a forma diagonal para as matrizes. No presente trabalho as matrizes de ponderação serão dadas por:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \quad e \quad R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

A idéia é avaliar o desempenho do sistema através do controlador linear quadrático (LQR), principalmente em termos do tempo de estabilização e um nível de sobre elevação “overshoot”. As escolhas das matrizes de ponderação foram determinadas empiricamente de modo que o desempenho da lei de controle seja ótimo.

Com a estratégia traçada, os sistemas serão excitados por entradas do tipo degrau unitário. As fig 5, 6 e 7 apresentam o comportamento dinâmico do sistema.

A tab 1 mostra os autovalores da matriz do sistema não-compensado e compensado com as matrizes de ponderação Q e R. Note que os autovalores do sistema compensado estão muito próximos do semi plano direito do plano complexo, podendo levá-lo para a instabilidade. Percebe-se na Fig 5 um baixo desempenho do sistema onde a lei de controle consegue controlar com um tempo de acomodação por volta de 60 segundos para as correntes do rotor, tensão terminal e um nível de sobre elevação bastante considerável, cerca de 28 % e um tempo de acomodação de cerca de 22 segundo para a velocidade do rotor, apresentado um comportamento de um sistema de primeira ordem. Para as simulações foram considerados os parâmetros do gerador de indução de acordo com o trabalho de (Nunes, 2004), apresentado na tab 2.

Tabela 1. Autovalores do sistema e ponderação das matrizes.

Autovalores		Ponderação das matrizes	
DFIG - Não-compensado	DFIG – compensado	Q	R
$0.0723 + 0.0278i$	$-0.0824 + 0.1667i$	$q_1 = 0,001$	$r_1 = 10$
$0.0723 - 0.0278i$	$-0.0824 - 0.1667i$	$q_2 = 0,001$	$r_2 = 10$
-0.2195	-0.2196	$q_3 = 0,001$	$r_3 = 10$

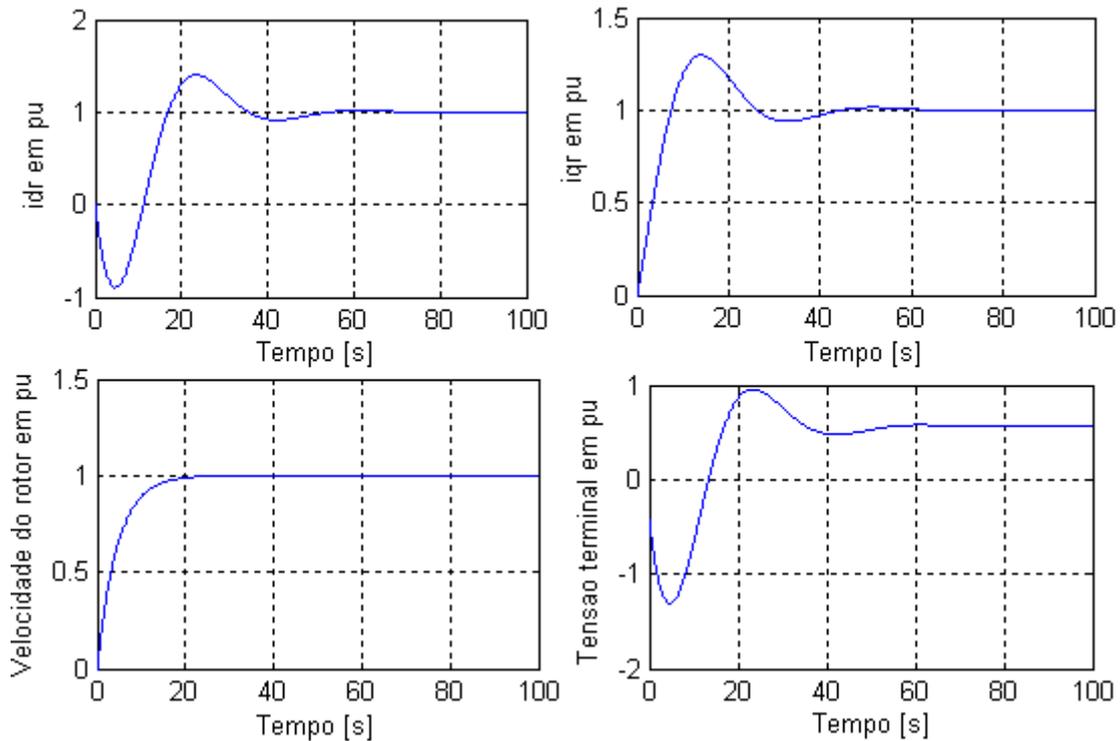


Figura 5-Respostas a uma excitação degrau

Tabela 2. Parâmetros do gerador de indução de 660kW.

Tensão base	690 [V]	Reatância do estator (Ls)	0.03 [pu]
Potência base	660 [kW]	Reatância do rotor (Lr)	0.0566 [pu]
Frequência base	60 [Hz]	Reatância de magnetização (Lm)	2.31 [pu]
Resistência do estator (Rs)	0.0067 [pu]	Constante de tempo de inércia do gerador (H)	4.390 [s]
Resistência do rotor (Rr)	0.0058 [pu]	Coefficiente de amortecimento D	0.1 [s]

Uma nova simulação foi realizada, onde se pode observar na tab 3 os autovalores da matriz do sistema não-compensado e compensado com as novas matrizes de ponderação Q e R. A fig 6, evidencia uma melhora significativa do desempenho do sistema onde o nível de sobre elevação é de aproximadamente 14 % para a corrente do eixo direto do rotor e tensão terminal e um tempo de acomodação de cerca de 14 segundos. Já a velocidade do rotor e a corrente do eixo em quadratura, apresentam um comportamento de um sistema de primeira ordem e um tempo de acomodação aproximadamente de 22 e 10 segundos respectivamente.

Tabela 3. Autovalores do sistema e ponderação das matrizes.

Autovalores		Ponderação das matrizes	
DFIG - Não-compensado	DFIG – compensado	Q	R
$0.0723 + 0.0278i$	$-0.4008 + 0.1667i$	$q_1 = 0,01$	$r_1 = 1$
$0.0723 - 0.0278i$	$-0.4008 - 0.1667i$	$q_2 = 0,01$	$r_2 = 1$
-0.2195	-0.2302	$q_3 = 0,01$	$r_3 = 1$

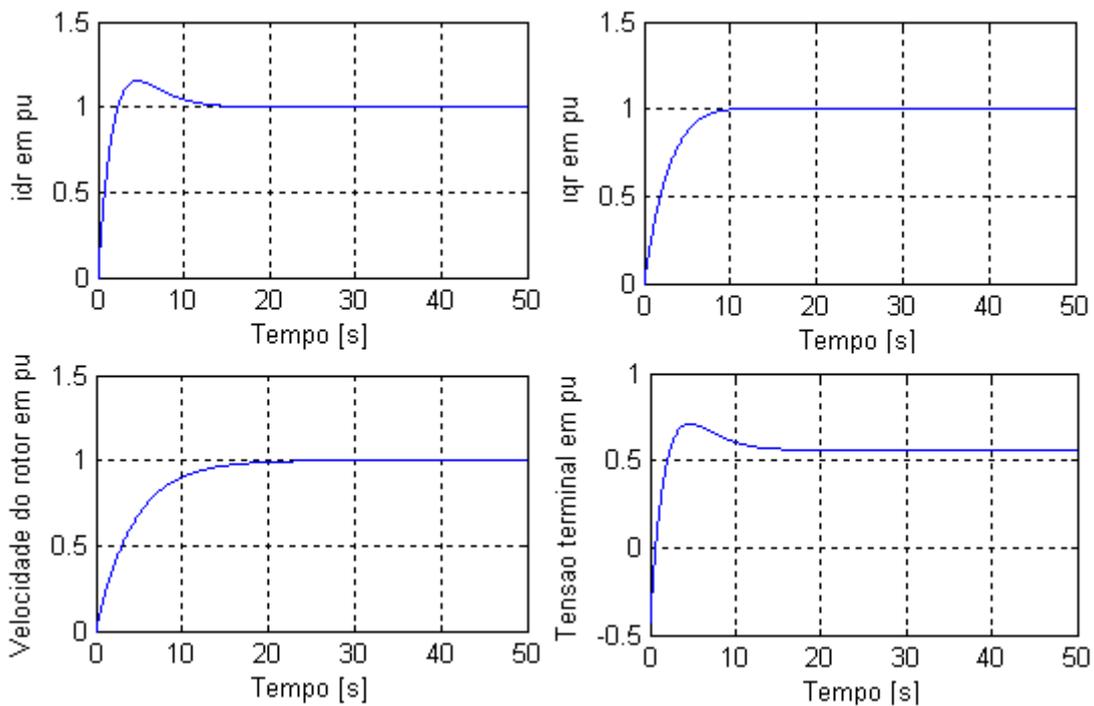


Figura 6-Respostas a uma excitação degrau

A tab 4 mostra os autovalores da matriz do sistema compensado com as novas matrizes de ponderação Q e R determinadas empiricamente de modo que o desempenho da lei de controle seja ótimo.

A figura 7 apresenta um desempenho ótimo do sistema submetido a uma excitação degrau tendo um comportamento de um sistema de primeira ordem e um tempo de acomodação menor que 0,4 segundos para todas as respostas. O controle é feito através das correntes do rotor e da velocidade. Desta forma pode-se obter diretamente devido à técnica conhecida como controle vetorial, a potência ativa e reativa do estator, o conjugado eletromagnético e a tensão terminal. A fig 7 apresenta também o comportamento dinâmico do torque eletromagnético e a tensão terminal no “grid” submetido à mudança de “set point” entre 0.3 e 0.6 segundos apresentando um comportamento satisfatório.

Tabela 4. Autovalores do sistema e ponderação das matrizes.

Autovalores		Ponderação das matrizes	
DFIG - Não-compensado	DFIG – compensado	Q	R
$0.0723 + 0.0278i$	-39.4212	$q_1 = 10$	$r_1 = 1$
$0.0723 - 0.0278i$	-12.4683	$q_2 = 1$	$r_2 = 1$
-0.2195	-21.9511	$q_3 = 100$	$r_3 = 1$

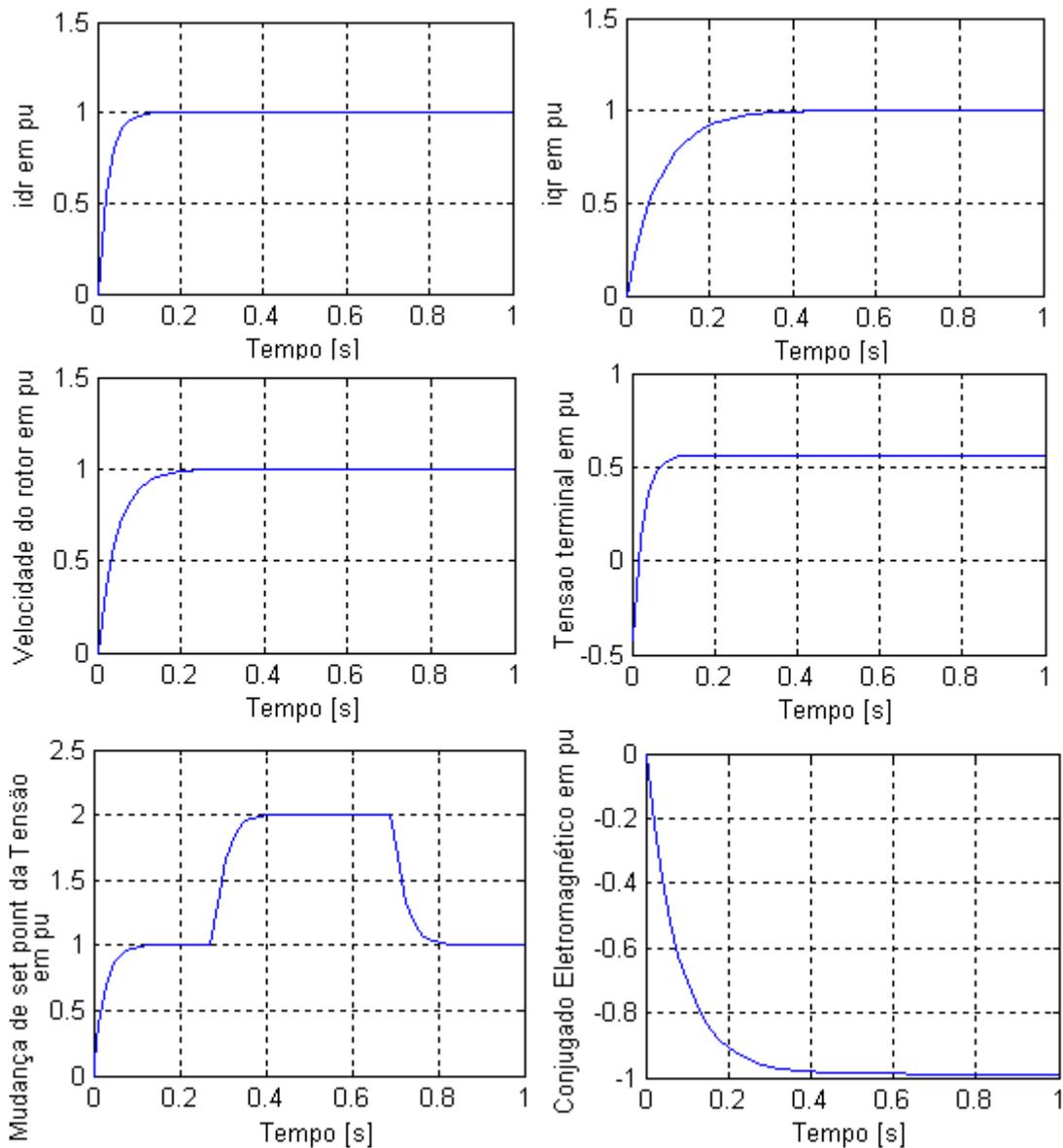


Figura 9- Respostas ótimas do sistema a uma excitação degrau

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho são apresentados os resultados entre a escolha das matrizes de ponderação Q e R para o projeto do controle do conversor interligado ao rotor do gerador de indução utilizando o controlador LQR onde foi analisada a estabilidade dinâmica do sistema através do posicionamento dos autovalores do sistema compensado e linearizado.

O controlador LQR aplicado ao conversor, corresponde a uma nova solução, que resulta na melhoria do desempenho da estabilidade dinâmica do sistema eólico integrado à rede elétrica através da escolha apropriada das matrizes de ponderação. O método mostrou ser efetivo para o propósito

do controle do conversor de potência, onde o desempenho da lei de controle é considerado ótimo, com o nível de sobre elevação e o tempo de estabilização sendo considerado o mínimo de modo que a tensão que será entregue ao barramento de distribuição da concessionária tenha reduzido nível de ruídos.

Agradecimentos

Agradecimentos a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ekelund, T. 1997. Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines, PhD Thesis, Chalmers University, Goteborg, Sweden.
- Holdsworth, L. Wu, X. G, Ekanayake, J. K and Jenkins, N. 2003. Comparison of a fixed and doubly-fed induction generator wind turbines during power system disturbances, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, Vol.150, n.3, pp. 343-352.
- Kundur, P. 1994. Power system stability and control. Book, McCraw-HillInc, New York.
- Nunes, M. V. A. Peças Lopes, J. 2004. Influence of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, pp. 692-701.
- Papadopoulos, M. P. Papathanassiou, S. A. 1999. Dynamic Behavior of Speed Wind Turbines under Stochastic Wind, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14,n. 4 (Dec.), pp.1617-1623.
- Pereira, M.M. 2004. Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante. Dissertação de mestrado, UFJF, Minas Gerais.
- Pena, R. Clare, J. C. Asher, G. M. 1996. Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and its Applications to Variable-Speed Wind-Energy Generation, IEE Proc. Electr. Power Appl, Vol. 143, n.3 (May), pp. 231-241.
- Svensson, J. Larsson, A. 1994. A Comparison of Electrical Systems for Variable Speed Operation of Wind Turbines, European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Thessaloniki, pp.500-505.
- Vieira, J.P. Nunes, M.V.A. Bezerra, U.H. et al .2006. Novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor estático do rotor de geradores de indução duplamente excitados em sistemas eólicos interligados à rede elétrica, VI Induscon, Recife-Pe, Brasil.

MODELLING AND CONTROLLED DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR USING A LINEAR QUADRATIC METHOD IN A WIND ENERGY APPLICATION

Abstract. *The present article shows some conceptions for connection of a doubly-fed induction generator (DFIG) in wind energy and the modeling and simulation of induction generator and the rotor power converter in a grid connection and the rotor power converter in a grid connection. In the control strategy is substituted the traditionally control used with PI o PID for a quadratic linear controller (LQR). The computational simulations had been developed in the Matlab/Simulink which if it is observed the adopted controller efficiency of the through the choice the matrices Q and R and the system dynamic stability through the eigenvalues positioning of the system linearized and compensated.*

Keywords: *Modeling, Doubly fed induction generator, dynamic stability, optimal control.*