

SISTEMA DE INFORMAÇÃO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA

R. Melício, V.M.F. Mendes

*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL),
Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação (DEEA), Lisboa, Portugal,
ruimelicio@gmail.com; vmendes@isel.pt*

J.P.S. Catalão

*Universidade da Beira Interior (UBI),
Departamento de Engenharia Electromecânica (DEM), Covilhã, Portugal,
catalao@ubi.pt*

Palavras-chave: Sistema de informação, comportamento dinâmico, energia eólica.

Resumo: Este trabalho apresenta um sistema de informação para o estudo do comportamento dinâmico de sistemas de energia eólica. Este sistema de informação tem por base a modelação e simulação computacional de um sistema de energia eólica com diferentes topologias para os conversores electrónicos: conversor matricial e conversor multinível. Para o controlo dos conversores é utilizada modulação vectorial associada com o modo de deslizamento. Os resultados computacionais obtidos permitem validar o sistema de informação proposto.

1 INTRODUÇÃO

A reestruturação do sector eléctrico teve um forte impacto nos sectores da produção e transporte de energia eléctrica. Com a evolução das tecnologias da produção distribuída abriram-se novas perspectivas para as empresas deste sector [1].

A geração distribuída oferece uma energia que é considerada limpa e livre de emissões contaminantes, tendo adquirido uma importância crescente nos últimos anos, com incidência cada vez maior nos sistemas de energia eléctrica. De entre a geração distribuída, a eólica é a mais visível na produção de energia eléctrica, inclusivamente prevê-se que no futuro próximo compita com a geração térmica tradicional.

A Comissão Europeia preocupada com as alterações climáticas, devido à emissão de gases de efeito de estufa, apresentou uma série de propostas para criar uma nova política energética para a Europa, isto é, a redução das suas emissões de CO₂ em 20% até 2020 e em 50% até 2050, baseado no aumento da proporção de fontes de energia renovável na produção de energia eléctrica.

Assim, espera-se que a energia eólica seja uma parte importante da futura política energética para a Europa. Em Portugal, a capacidade instalada de potência eólica para a produção de energia eléctrica alcançou no final de Maio de 2008 o valor de 2428 MW.

O incremento da incidência de geração eólica vai modificar consideravelmente o comportamento dinâmico do sistema eléctrico [2] e pode dar lugar a uma nova estratégia de regulação da frequência do sistema [3]. Por outro lado, os operadores da rede devem assegurar aos consumidores que a qualidade da energia fornecida não seja comprometida [4].

Isto implica a investigação matemática e simulação computacional de modelos de sistemas eólicos mais realistas de forma a ter uma adequada resposta que não ponha em risco a estabilidade do sistema e a qualidade da energia.

Os conversores electrónicos foram desenvolvidos para permitir a integração dos sistemas eólicos de velocidade variável na rede eléctrica, com o consequente aumento na extracção da energia do vento.

Na operação com turbinas de velocidade variável, o método de controlo está dimensionado para que a turbina capte a máxima energia do escoamento e proporcione condições para a interligação à rede eléctrica [5]. Os controladores utilizados são do tipo PI. Para controlar os conversores utiliza-se a modulação vectorial associada com o modo de deslizamento, que garante a escolha adequada dos vectores espaciais.

A maioria dos autores trata o comportamento dos sistemas eólicos com modelos simples. Nesta comunicação é apresentado um sistema de informação para o estudo do comportamento dinâmico de sistemas de energia eólica, introduzindo mais realidade no que diz respeito ao comportamento dinâmico. Sendo um sistema integrado, considera o comportamento da turbina eólica de velocidade variável alimentada por um escoamento de vento de velocidade variável, o veio de duas massas, a máquina eléctrica síncrona de ímanes permanentes, os conversores AC/AC ou AC/DC/AC, e o filtro que liga o sistema à rede eléctrica. A aplicação desenvolvida neste estudo apresenta tempos de computação aceitáveis.

2 MODELAÇÃO

2.1 Turbina e Máquina Eléctrica

A potência mecânica da turbina é dada por:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A u^3 c_p \quad (1)$$

sendo P_t a potência mecânica captada ao escoamento, ρ a massa específica do ar, A a área varrida pelo rotor, u a velocidade do escoamento de aproximação ao rotor e c_p o coeficiente de potência.

O c_p é uma função do ângulo de passo da pá θ e do coeficiente de velocidade específica λ . O λ representa a relação entre o escoamento e o rotor da turbina. O dimensionamento do c_p requer o conhecimento da teoria do elemento da pá e o conhecimento da geometria do perfil da pá. Considera-se a geometria da pá usando a aproximação numérica desenvolvida em [6].

A Figura 1 apresenta o coeficiente de potência em função do coeficiente de velocidade específica.

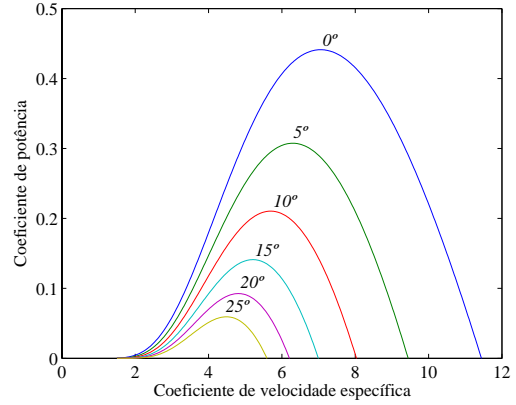


Figura 1: Coeficiente de potência em função do coeficiente de velocidade específica.

As equações que modelam o rotor do sistema eólico caracterizado por duas massas são dadas por:

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{J_t} (T_t - T_{dt} - T_{at} - T_{ts}) \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{1}{J_e} (T_{ts} - T_{de} - T_{ae} - T_e) \quad (3)$$

sendo ω_t a velocidade de rotação da turbina, J_t o momento de inércia da turbina, T_t o binário mecânico, T_{dt} o binário resistente na chumaceira da turbina, T_{at} o binário resistente no cubo e pás da turbina devido à viscosidade do ar, T_{ts} o binário devido ao acoplamento elástico, ω_e a velocidade de rotação da máquina eléctrica, J_e o momento de inércia da máquina eléctrica, T_{de} o binário resistente na chumaceira da máquina eléctrica, T_{ae} o binário resistente devido à viscosidade do ar na máquina eléctrica e T_e o binário electromagnético.

As equações que modelam a máquina síncrona de ímanes permanentes, MSIP [7], usando a convenção motor, são dadas por:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d + p\omega_e L_q i_q - R_d i_d) \quad (4)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [u_q - p\omega_e (L_d i_d + M i_f) - R_q i_q] \quad (5)$$

sendo i_f a corrente equivalente do rotor, M a indutância mútua, p o número de pares de polos; e no plano dq , i_d e i_q são as correntes do estator, L_d e L_q são as indutâncias do estator, R_d e R_q são as resistências do estator, u_d e u_q são as tensões no estator. Para evitar perdas nos enrolamentos do estator da máquina eléctrica, impõe-se um factor de potência unitário, o que implica uma potência reactiva da máquina nula, $Q_e = 0$. A potência activa na máquina eléctrica é dada por:

$$P_e = [u_d \ u_q \ u_f][i_d \ i_q \ i_f]^T \quad (6)$$

A potência instantânea activa P e reactiva Q injectadas na rede eléctrica no plano $\alpha\beta$ [8] é dada por:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

A potência aparente instantânea injectada na rede eléctrica é dada por:

$$S = (P^2 + Q^2 + H^2)^{1/2} \quad (8)$$

sendo H a potência harmónica.

2.2 Conversor Matricial

O conversor matricial é constituído por uma associação de nove IGBT's bidireccionais comandados S_{ij} . O conversor está ligado entre a máquina eléctrica e um filtro de segunda ordem. Por sua vez, o filtro de segunda ordem está ligado à rede eléctrica. A rede eléctrica é simétrica e equilibrada, sendo modelada como uma impedância em série com uma fonte de tensão constante. A configuração do sistema eólico com conversor matricial é apresentada na Figura 2.

Para modelar o conversor matricial considera-se que: 1) as variáveis de comando S_{ij} para cada i têm para um j o valor um, isto é, corresponde a um interruptor em condução, para manter a continuidade da corrente em cada fase; 2) as variáveis de comando S_{ij} para cada j para um i o valor um, isto é, corresponde a um interruptor em condução, para manter a continuidade na tensão entre fases [9-11].

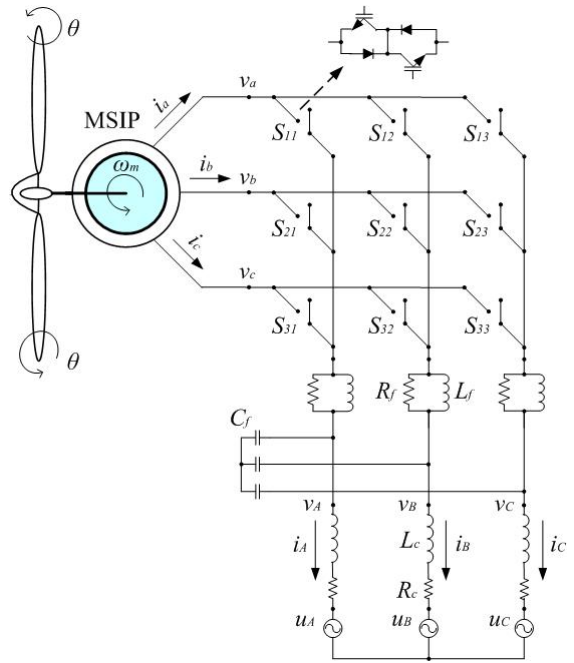


Figura 2: Sistema eólico com conversor matricial.

As variáveis de comando S_{ij} em função dos estados de condução e corte são dadas por:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{(condução)} \\ 0, & \text{(corte)} \end{cases} \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \quad (9)$$

As condições 1) e 2) expressam-se pelas restrições (10) e (11) das variáveis de comando S_{ij} :

$$\sum_{j=1}^3 S_{ij} = 1 \quad \text{com} \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^3 S_{ij} = 1 \quad \text{com} \quad j \in \{1, 2, 3\} \quad (11)$$

O vector das tensões de fase de saída está relacionado com o vector das tensões de fase de entrada ao conversor através da matriz de comando:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

O vector das correntes de entrada está relacionado com o vector das correntes de saída do conversor através da matriz de comando:

$$[i_a \ i_b \ i_c]^T = [S]^T [i_A \ i_B \ i_C]^T \quad (13)$$

2.3 Conversor Multinível

O conversor multinível é constituído por uma associação de doze IGBT's unidireccionais comandados S_{ik} . No inversor a constituição é a mesma. O rectificador está ligado entre a máquina eléctrica e os bancos de condensadores. O inversor está ligado entre estes bancos de condensadores e

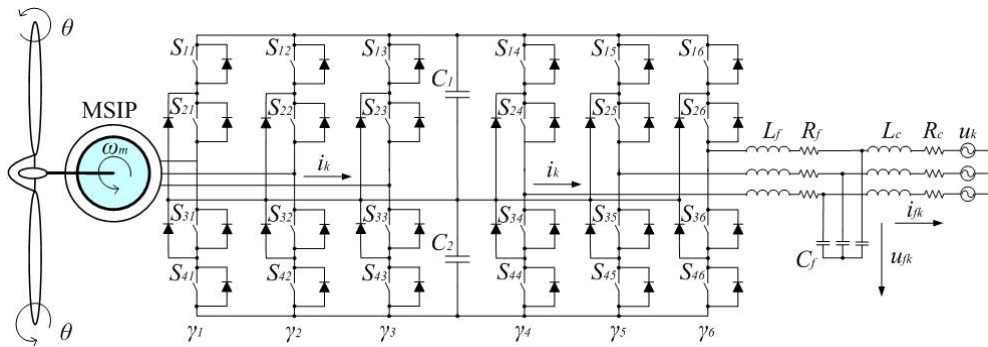


Figura 3: Sistema eólico com conversor multinível.

Os grupos de quatro IGBT's ligados à mesma fase constituem o braço k do conversor. Para modelar o conversor multinível considera-se que: 1) a tensão nos condensadores à saída do rectificador deve ser sempre $v_{dc} > 0$; 2) cada braço k do conversor deve ter sempre em funcionamento dois IGBT's.

Para a função de comutação de cada IGBT, utiliza-se a variável de comutação γ_k para identificar o estado de condução ou corte do IGBT i no braço k do conversor. O índice i com $i \in \{1,2,3,4\}$ identifica o IGBT. O índice k com $k \in \{1,2,3\}$ identifica os braços do rectificador e $k \in \{4,5,6\}$ identifica os braços do inversor. As três condições válidas para a função de comutação de cada braço k são dadas por:

$$\gamma_k = \begin{cases} 1, & (S_{1k} \text{ e } S_{2k}) = 1 \\ 0, & (S_{2k} \text{ e } S_{3k}) = 1 \\ -1, & (S_{3k} \text{ e } S_{4k}) = 1 \end{cases} \quad k \in \{1, \dots, 6\} \quad (14)$$

Os dois IGBT's superiores de cada braço k (S_{1k} e S_{2k}) do conversor estão associados a uma variável de comutação Γ_{1k} e os dois IGBT's inferiores (S_{3k} e S_{4k}) estão associados a uma variável de comutação Γ_{2k} , respectivamente dadas:

$$\Gamma_{1k} = \frac{\gamma_k(1+\gamma_k)}{2}; \quad \Gamma_{2k} = \frac{\gamma_k(1-\gamma_k)}{2} \quad (15)$$

um filtro de segunda ordem. Por sua vez, o filtro de segunda ordem está ligado à rede eléctrica. A rede eléctrica é simétrica e equilibrada, sendo modelada como uma impedância em série com uma fonte de tensão constante. A configuração do sistema eólico com conversor multinível, conhecida com o nome de "neutral point clamped" [10-11], é apresentada na Figura 3.

As correntes injectadas na rede são modeladas pela equação de estado dada por:

$$\frac{di_{fk}}{dt} = \frac{1}{L_c}(u_{fk} - R_c i_{fk} - u_k) \quad k \in \{4,5,6\} \quad (16)$$

A tensão v_{dc} à saída do rectificador é a soma das tensões nos bancos de condensadores C_1 e C_2 , sendo modelada pela equação de estado:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_1} \left(\sum_{k=1}^3 \Gamma_{1k} i_k - \sum_{k=4}^6 \Gamma_{1k} i_k \right) + \frac{1}{C_2} \left(\sum_{k=1}^3 \Gamma_{2k} i_k - \sum_{k=4}^6 \Gamma_{2k} i_k \right) \quad (17)$$

3 MÉTODO DE CONTROLO

Os controladores utilizados são do tipo PI. Para controlar os conversores utiliza-se a modulação vectorial associada com o modo de deslizamento.

Os conversores são estruturas variáveis, por causa da comutação (condução/corte) dos IGBT's. O modo de deslizamento é importante, porque garante a escolha adequada dos vectores espaciais.

Os semicondutores de potência apresentam limitações físicas, devido a que não podem comutar a frequências infinitas. Para um determinado valor

de frequência de comutação, vai existir um erro $e_{\alpha\beta}$ entre o valor da grandeza de referência e o valor da grandeza que se pretende controlar. Assim, garante-se que o sistema desliza ao longo de uma superfície de deslizamento $S(e_{\alpha\beta}, t)$ próxima da trajectória de estado descrita por uma superfície que verifica a condição de estabilidade do modo de deslizamento [9-11] dada por:

$$S(e_{\alpha\beta}, t) \frac{dS(e_{\alpha\beta}, t)}{dt} < 0 \quad (18)$$

Como os semicondutores de potência só podem comutar a frequências finitas, na prática considera-se uma modificação na estratégia de comutação, isto é, admite-se um erro pequeno $\varepsilon > 0$ para a $S(e_{\alpha\beta}, t)$ dada por:

$$-\varepsilon < S(e_{\alpha\beta}, t) < +\varepsilon \quad (19)$$

A implementação prática da estratégia de comutação considerada em (19) consegue-se utilizando comparadores de histerese.

No caso do conversor matricial as tensões de saída do conversor não são variáveis de estado. Assim, sendo a frequência de comutação dos IGBT's muito superior à frequência fundamental da rede eléctrica, considera-se que durante um período de comutação T_s , o valor médio das tensões de saída do conversor são aproximadamente iguais ao valor médio das tensões de referência, dadas por:

$$\frac{1}{T_s} \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} v_{\alpha\beta} dt = v_{\alpha\beta}^* \quad (20)$$

4 SIMULAÇÃO

O sistema eólico simulado tem uma potência nominal de 900 kW. Os modelos matemáticos do sistema de informação que estuda o sistema eólico com conversor matricial e conversor multinível foram implementados em Matlab/Simulink.

Na simulação considera-se uma rampa de vento de aproximação ao rotor com velocidades de escoamento compreendidas entre 4.5 m/s e 25 m/s num horizonte temporal de 3.5 s.

Na Figura 4 é apresentada a potência mecânica da turbina, a potência electromagnética e a potência aceleradora.

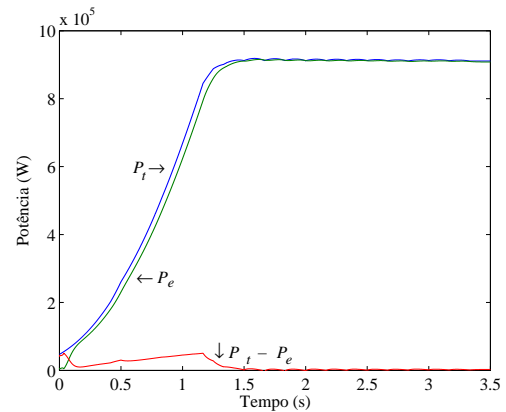


Figura 4: Potência mecânica da turbina, potência electromagnética e potência aceleradora.

Na Figura 5 é apresentada a potência injectada na rede pelo conversor matricial.

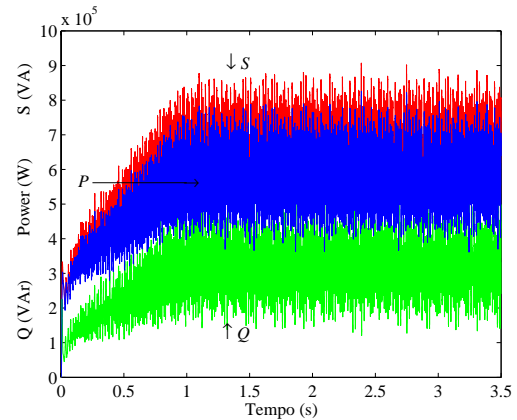


Figura 5: Potência injectada na rede pelo conversor matricial.

Na Figura 6 é apresentada a corrente injectada na rede pelo conversor matricial.

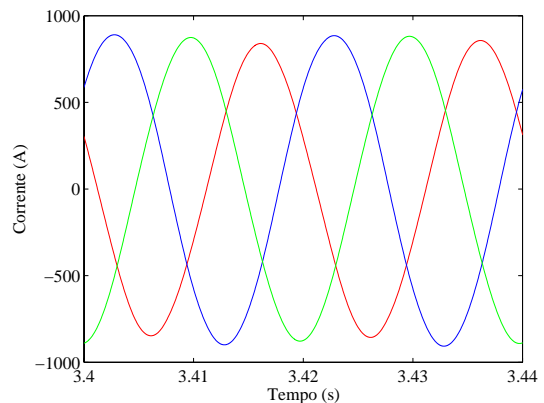


Figura 6: Corrente injectada na rede pelo conversor matricial.

Na Figura 7 é apresentada a potência injectada na rede pelo conversor multinível.

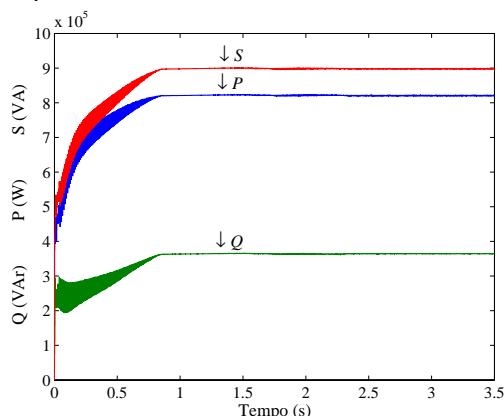


Figura 7: Potência injectada na rede pelo conversor multinível.

Na Figura 8 é apresentada a corrente injectada na rede pelo conversor multinível.

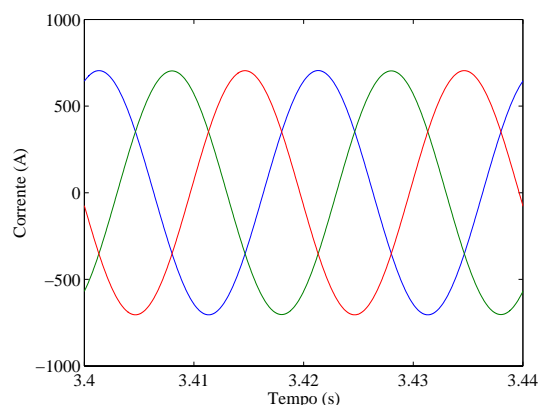


Figura 8: Corrente injectada na rede pelo conversor multinível.

Pode-se concluir que o conversor multinível apresenta ondas eléctricas para a potência e a corrente com melhor comportamento relativamente ao conversor matricial.

5 CONCLUSÕES

O incremento progressivo da energia eólica dá lugar a novos desafios, o que implica a investigação de modelos matemáticos de sistemas de informação dos sistemas eólicos, mais realistas.

Nesta comunicação apresenta-se a modelação e simulação integrada de sistemas eólicos com duas topologias de conversores de potência ligados à rede eléctrica: conversor matricial e conversor multinível.

Os resultados mostram que o conversor multinível tem um melhor comportamento comparativamente ao conversor matricial. Ainda que a estratégia de modelação integrada seja mais complexa, esta justifica-se para obter resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

- [1] Peças Lopes, J.A., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., e Jenkins, N., 2007. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities, *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 9, p. 1189-1203.
- [2] Erlich, I., Kretschmann, J., Fortmann, J., Mueller-Engelhardt, S., e Wrede, H., 2007. Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 3, p. 909-919.
- [3] de Almeida, R.G., e Peças Lopes, J.A., 2007. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, p. 944-950.
- [4] Carrasco, J.M., Franquelo, L.G., Bialasiewicz, J.T., Galvan, E., Guisado, R.C.P., Prats, A.M., Leon, J.I., e Moreno-Alfonso, N., 2006. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 4, p. 1002-1016.
- [5] Baroudi, J.A., Dinavahi, V., e Knight, A.M., 2007. A review of power converter topologies for wind generators, *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 14, p. 2369-2385.
- [6] Slootweg, J.G., Polinder, H., e Kling, W.L., 2003. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18, No. 4, p. 516-524.
- [7] Ong, C. -M., 1998. *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, New Jersey: Prentice Hall.
- [8] Watanabe, E.H., Stephan, R.M., e Aredes, M., 1993. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, p. 697-703.
- [9] Pinto, S., e Silva, J., 2007. Sliding mode direct control of matrix converters, *IET Electric Power Applications*, Vol. 1, No. 3, p. 439-448.
- [10] Barros, J.D., e Silva, J.F., 2007. Optimal predictive control of three-phase NPC multilevel inverter: comparison to robust sliding mode controller, in *Proc. IEEE PESC'2007*, p. 2061-2067.
- [11] Melício, R., Mendes, V.M.F., e Catalão, J. P.S., 2008. Modeling and simulation of a wind energy system: matrix versus multilevel converters, in *Proc. IEEE MELECON'08*, p. 604-609.