

Simulação de Conversores Electrónicos de Potência para Turbinas Eólicas: Análise da Qualidade da Energia e da Estabilidade Transitória

R. Melício¹, V.M.F. Mendes² e J.P.S. Catalão¹

¹ Departamento de Engenharia Electromecânica
Universidade da Beira Interior

R. Fonte do Lameiro, 6200-001 Covilhã (Portugal)
Telefone: +351 275 329914, fax: +351 275 329972, e-mail: catalao@ubi.pt

² Departamento de Engenharia Eléctrica e Automação
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

R. Conselheiro Emídio Navarro, 1950-062 Lisboa (Portugal)
Telefone: +351 218 317 000, fax: +351 218 317 001, e-mail: vmendes@isel.pt

Resumo. Esta comunicação estuda a estabilidade transitória de turbinas eólicas de velocidade variável equipadas com gerador síncrono de ímanes permanentes, considerando uma falha no controlo do passo das pás da turbina. A par do rápido crescimento da energia eólica, surgem novos desafios técnicos: estabilidade da rede eléctrica e a qualidade da energia. Assim, estuda-se a influência na qualidade da energia eléctrica injectada na rede, devida a uma falha no controlo do passo das pás da turbina, considerando diferentes topologias de conversores electrónicos de potência: dois níveis e multinível.

Palavras-chave

Modelação, conversores de potência, simulação, energia eólica.

1. Introdução

A consciência geral de que as fontes de energia não renováveis são finitas e limitadas, as disputas internacionais sobre o ambiente, a segurança global e a qualidade de vida, proporcionaram oportunidades para o desenvolvimento de fontes de energia renováveis mais eficientes e menos poluentes, nomeadamente, as eólicas e as hidroeléctricas, equipadas com avançadas tecnologias de controlo, robustez e modularidade [1].

Em Portugal, a meta prevista para 2010 de capacidade instalada de potência eólica para a produção de energia eléctrica foi estabelecida pelo governo em 3750 MW. Hoje, a capacidade instalada de potência eólica constitui cerca de 25% da meta prevista para 2010 [2]. As mais recentes metas governamentais para o sector eólico, aumentaram para 5100 MW o valor previsto da capacidade instalada de potência eólica para a mesma data. Assim, Portugal tem uma das mais ambiciosas metas em termos de energia eólica e em 2006 foi o segundo país da Europa com o maior crescimento de capacidade instalada de potência eólica para a produção de energia eléctrica.

A estabilidade do sistema eléctrico corresponde à capacidade desse sistema para manter o sincronismo e a tensão quando sujeito a graves perturbações transitórias [3]. Com o incremento da incidência de geração eólica no sistema eléctrico, a estabilidade do sistema torna-se uma preocupação da maior importância [4]. Além de que, os operadores da rede devem assegurar aos consumidores que a qualidade da energia fornecida não seja comprometida. Assim, a distorção harmónica total (THD) deve ser mantida tão baixa quanto possível, melhorando a qualidade da energia injectada na rede [5].

O desenvolvimento da electrónica de potência e sua aplicabilidade nos sistemas eólicos permitiram a operação de turbinas de velocidade variável [6]. As turbinas de velocidade variável podem estar equipadas com gerador de indução, gerador de indução duplamente alimentado (DFIG), gerador síncrono e a alternativa estudada nesta comunicação, constituída pelo gerador síncrono de ímanes permanentes (GSIP). As turbinas eólicas equipadas com geradores tipo GSIP estão ligados à rede eléctrica através de conversores electrónicos de potência.

As emissões de harmónicas para a rede são reconhecidas como um problema que afecta a qualidade da energia injectada na rede pelas modernas turbinas eólicas de velocidade variável. Compreender o comportamento das emissões harmónicas produzidas por estas turbinas é essencial a fim de analisar os seus efeitos sobre a rede eléctrica no ponto onde estão ligadas [7].

As turbinas de velocidade variável costumam empregar o controlo do ângulo do passo das pás, i.e., quando o ângulo do passo das pás incrementa reduz-se o ângulo de ataque destas e, em consequência, reduz-se a quantidade de energia captada ao escoamento [8]. O controlo do ângulo do passo das pás tem um efeito considerável no comportamento dinâmico dos geradores dos sistemas eólicos.

O estado da arte das comunicações científicas centram-se essencialmente no estudo da estabilidade transitória de sistemas eólicos de velocidade variável sujeitos a falhas na rede eléctrica [8], [9].

Esta comunicação estuda a estabilidade transitória de sistemas eólicos de velocidade variável equipados com GSIP, considerando uma falha no controlo do passo das pás da turbina.

Assim, estuda-se a influência na qualidade da energia eléctrica injectada na rede, devida a uma falha no controlo do passo das pás da turbina, considerando diferentes topologias de conversores electrónicos de potência. Os controladores utilizados são do tipo *PI*. Utiliza-se a modulação por largura de impulso (PWM), nomeadamente, a modulação vectorial (SVM) associada com o modo de deslizamento para controlar os conversores. É estudado o desempenho do sistema no que respeita à atenuação das perturbações e robustez. São apresentados os resultados computacionais utilizando Matlab/Simulink, e finalmente são apresentadas as conclusões.

2. Modelação

A. Turbina

A potência mecânica da turbina P_{tt} é dada por:

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

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

O c_p é uma função do ângulo do passo da pá θ e do coeficiente de velocidade específica λ . O λ representa a relação entre o escoamento e o rotor da turbina.

Para simular uma falha no controlo do ângulo do passo da pá da turbina, considera-se que o sistema está em regime de funcionamento com velocidade de rotação e conversão de energia estáveis, assim, ao produzir-se uma falha momentânea no controlo do ângulo das pás, este ordena que as pás se posicionem no ângulo correspondente a rajada de vento, i.e., no ângulo máximo correspondente à mínima captação de energia.

O ângulo de passo das pás máximo $\theta_{\max} = 55^\circ$ é dado para o coeficiente de potência mínimo, dado por

$$c_{p_{\min}} = 0.0025 \quad (2)$$

e para o coeficiente de velocidade específica, dado por

$$\lambda = 3.475 \quad (3)$$

Durante a conversão da energia eólica em energia mecânica no veio da turbina, várias forças (exemplo, centrífuga, gravidade, aerodinâmicas sobre as pás; e forças giroscópicas sobre a torre) actuam sobre as pás e a

torre que produzem oscilações mecânicas [10]. Assim, as oscilações mecânicas são fundamentalmente devidas a: oscilações nas pás, efeito de sombra da torre e assimetria no alinhamento da turbina em relação ao escoamento. Neste sentido, podem-se modelar as oscilações mecânicas como um conjunto de harmónicas que se adicionam à potência extraída ao escoamento (1). A potência mecânica da turbina sujeita às perturbações devidas às oscilações mecânicas é dada por

$$P_t = P_{tt} \left[1 + \sum_{k=1}^3 A_k \left(\sum_{m=1}^2 a_{km} g_{km}(t) \right) h_k(t) \right] \quad (4)$$

$$g_{km} = \sin \left(\int_0^t m \omega_k(t') dt' + \phi_{km} \right) \quad (5)$$

sendo k o tipo de oscilação mecânica excitada durante a rotação da turbina, m a harmónica da perturbação dada, A_k a amplitude da oscilação, g_{km} a distribuição entre as harmónicas na perturbação, a_{km} a amplitude normalizada de g_{km} , h_k a modulação da oscilação, ω_k a frequência da oscilação e ϕ_{km} a fase da harmónica. A gama de frequências de oscilação do modelo da turbina está entre 0.1 Hz e 10 Hz. Os valores usados para o cálculo de P_t são apresentados na Tabela I [11].

TABELA I. - Oscilações Mecânicas Excitadas na Turbina

k	Fonte	A_k	ω_k	h_k	m	a_{km}	ϕ_{km}
1	Assimetria	0.01	ω_k	1	1	4/5	0
					2	1/5	$\pi/2$
2	Sombra da Torre	0.08	$3 \omega_k$	1	1	1/2	0
					2	1/2	$\pi/2$
3	Pás	0.15	9π	$1/2 (g_{11} + g_{21})$	1	1	0

B. Velocidade do Escoamento

A velocidade do escoamento de aproximação à turbina varia consideravelmente de uma forma estocástica. A variação da velocidade do escoamento pode ser modelada como uma soma de harmónicas cuja gama de frequências está compreendida entre 0.1 Hz e 10 Hz [10]

$$u = u_0 \left[1 + \sum_k A_k \sin(\omega_k t) \right] \quad (6)$$

sendo u_0 o valor da velocidade do escoamento, u o valor da velocidade do escoamento sujeita a perturbações. Assim, o modelo da turbina é sujeito às perturbações dadas pelo modelo de variação da velocidade do vento [11].

C. Rotor do Sistema Eólico

O rotor do sistema eólico considerado nesta comunicação é caracterizado por duas massas, i.e., a massa maior corresponde ao momento de inércia do rotor da turbina e a massa menor corresponde ao momento de inércia do rotor do gerador. O modelo dinâmico do rotor do sistema

eólico usado nesta comunicação foi previamente descrito pelos autores em [12], [13].

D. Gerador

O gerador considerado nesta comunicação é um GSIP. As equações que modelam o GSIP encontram-se na literatura [14]. A potência eléctrica P_e foi descrita em [12], [13]. Para evitar a desmagnetização dos ímãs permanentes do GSIP, impõe-se uma corrente nula no estator $i_d = 0$ [15].

E. Conversor de Dois Níveis

O conversor de dois níveis, no rectificador é constituído por uma associação de seis IGBTs unidireccionais comandados S_{ij} , e no inversor a constituição é a mesma.

O rectificador está ligado entre o GSIP e o banco de condensadores. O inversor está ligado entre este banco de condensadores 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. Os grupos de dois IGBTs ligados à mesma fase constituem o braço j do conversor [12], [13]. A configuração do sistema eólico com conversor de dois níveis é apresentada na Fig. 1.

F. Conversor Multinível

O conversor multinível, no rectificador é constituído por uma associação de doze IGBTs unidireccionais comandados S_{ij} , e no inversor a constituição é a mesma.

O rectificador está ligado entre o GSIP e os bancos de condensadores. O inversor está ligado entre estes bancos de condensadores 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. Os grupos de quatro IGBTs ligados à mesma fase constituem o braço j do conversor [12], [13]. A configuração do sistema eólico com conversor multinível é apresentada na Fig. 2.

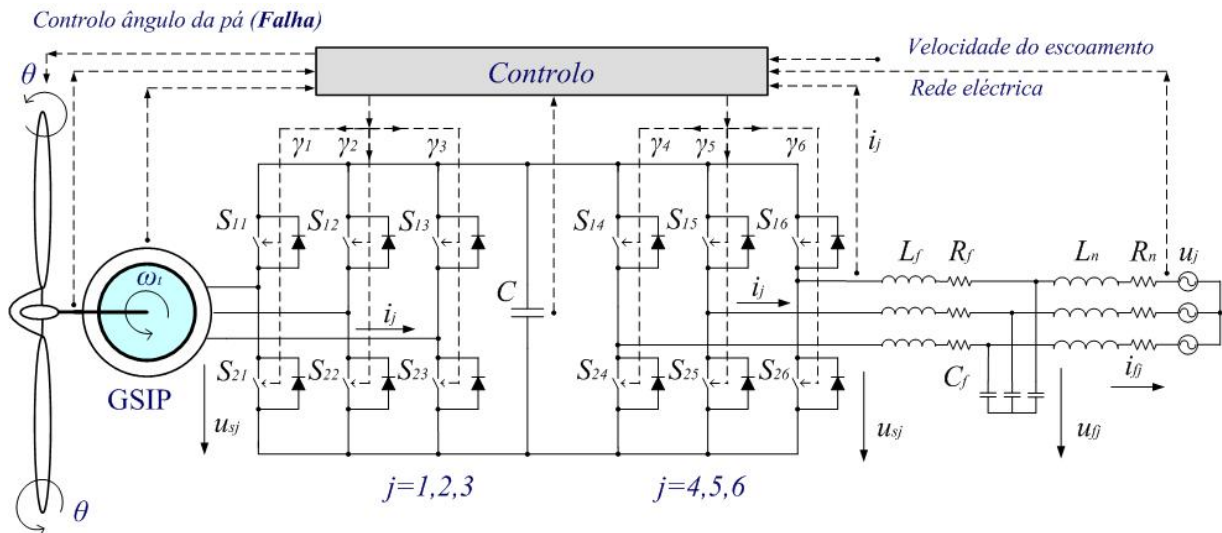


Fig. 1. Sistema eólico com conversor de dois níveis.

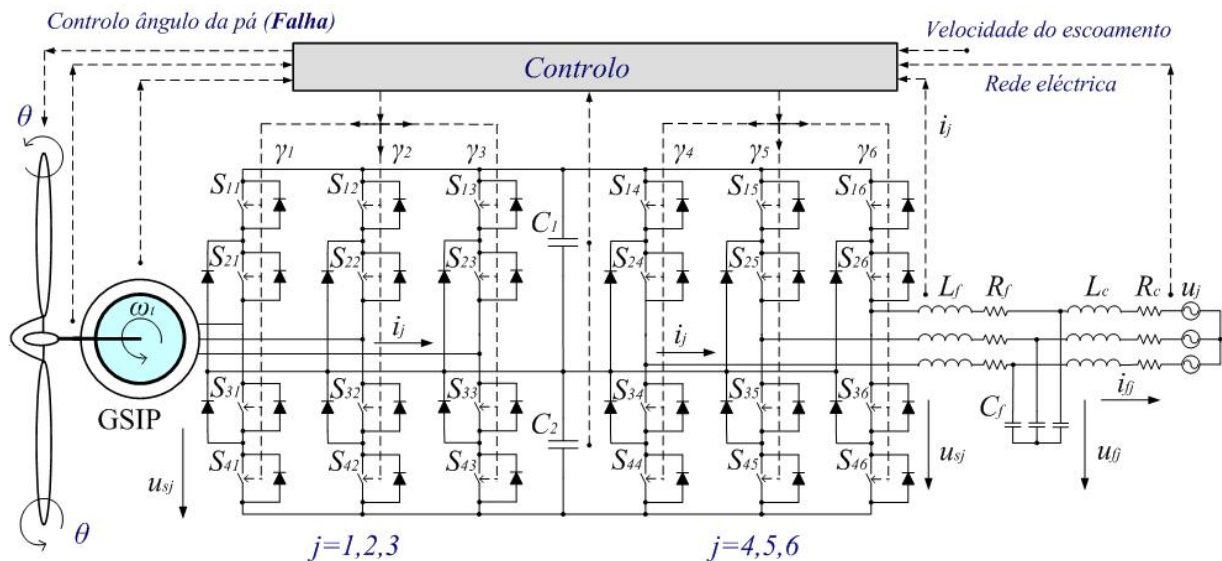


Fig. 2. Sistema eólico com conversor multinível.

3. Estratégia de Controlo

Os controladores utilizados são do tipo *PI*. Para controlar os conversores utiliza-se a modulação por largura de impulso (PWM), nomeadamente, a modulação vectorial (SVM) associada com o modo de deslizamento.

Os conversores são estruturas variáveis, por causa da comutação (condução/corte) dos IGBTs. Assim, o modo de deslizamento é importante porque garante a escolha adequada dos vectores espaciais e permitindo que o sistema deslize ao longo de uma superfície de deslizamento predefinida.

O modo de deslizamento apresenta características atractivas, tais como robustez a incertezas paramétricas da turbina, do gerador e perturbações na rede eléctrica [16].

Os semicondutores de potência apresentam limitações físicas, devido a que não podem comutar a frequências finitas. Para um determinado valor de frequência de comutação finita, 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 da 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, dada por

$$S(e_{\alpha\beta}, t) \frac{dS(e_{\alpha\beta}, t)}{dt} < 0 \quad (7)$$

4. Qualidade da Energia

A fim de avaliar o conteúdo harmónico da corrente injectada na rede eléctrica, usamos o THD. O conteúdo harmónico da corrente é expresso em percentagem da componente fundamental. Assim, o THD é dado por

$$\text{THD (\%)} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{50} X_H^2}}{X_F} \quad (8)$$

sendo X_H o valor eficaz do sinal com o conteúdo harmónico total e X_F o valor eficaz da componente fundamental do sinal.

5. Simulação

A potência nominal do sistema eólico simulado é de 900 kW. Os modelos matemáticos que estudam o sistema eólico com conversor de dois níveis e conversor multinível foram implementados em Matlab/Simulink.

Na simulação considera-se uma rampa de vento de aproximação ao rotor com velocidades de escoamento u_0 compreendidas entre 5 m/s e 25 m/s, durante 2.5 s, num horizonte temporal de 3.5 s.

A Fig. 3 apresenta a potência mecânica da turbina e a potência eléctrica do gerador sujeita às perturbações devidas às oscilações mecânicas. A falha momentânea no controlo do ângulo das pás da turbina é simulada entre 2 s e 2.5 s.

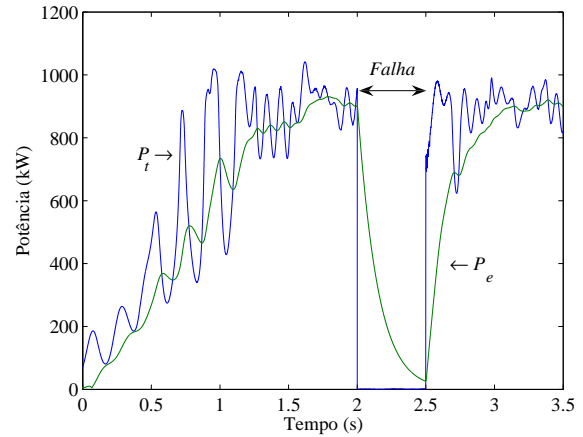


Fig. 3. Potência mecânica e potência eléctrica.

As velocidades de rotação da turbina, n_t , e do gerador n_e , são apresentadas na Fig. 4.

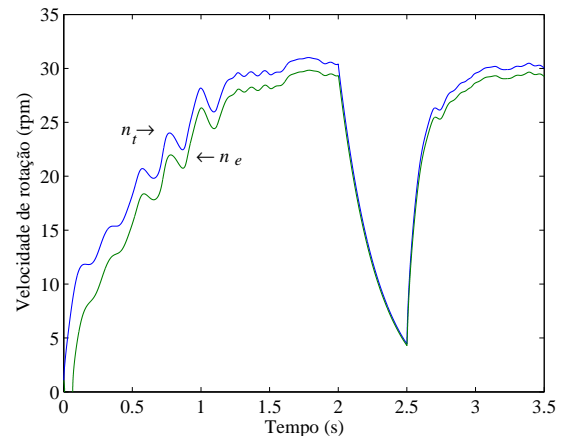


Fig. 4. Velocidades de rotação da turbina e do gerador.

A variação do coeficiente de potência é apresentada na Fig. 5.

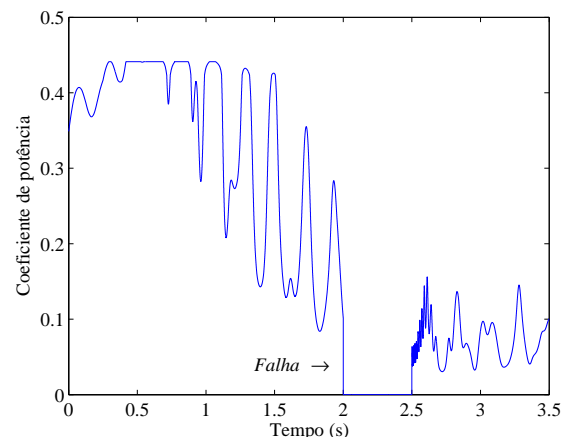


Fig. 5. Variação do coeficiente de potência.

A variação do ângulo de passo da pá é apresentada na Fig. 6.

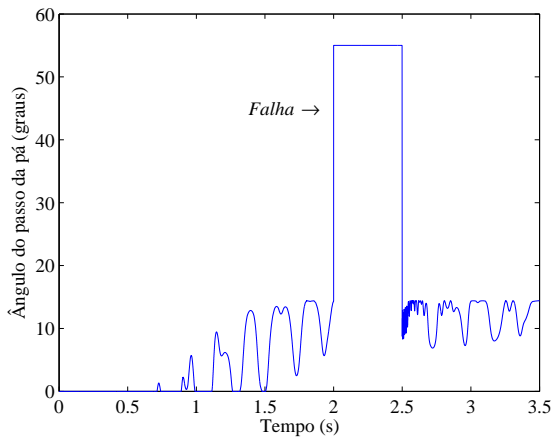


Fig. 6. Variação do ângulo do passo da pá.

A tensão no banco de condensadores do sistema eólico com conversor de dois níveis é apresentada na Fig. 7. Durante a falha no controlo do ângulo do passo da pá da turbina, a cava da tensão é de 1034 V.

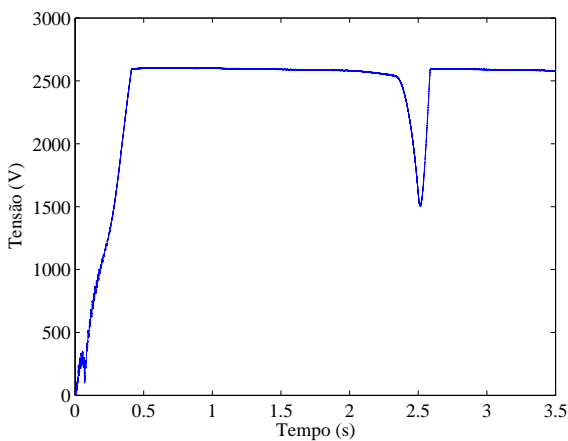


Fig. 7. Tensão no banco de condensadores.

O valor eficaz da corrente injectada na rede eléctrica pelo sistema eólico com conversor de dois níveis é apresentado na Fig. 8.

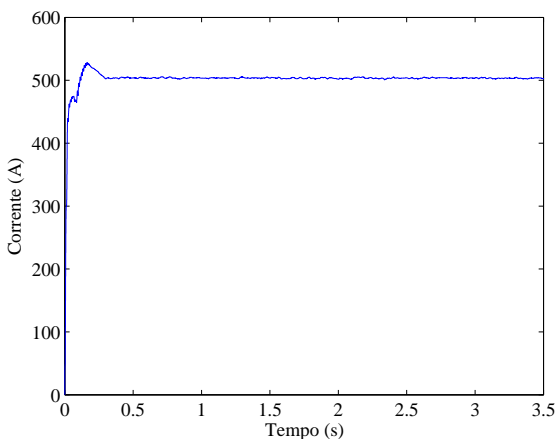


Fig. 8. Valor eficaz da corrente – conversor de dois níveis.

O THD da corrente injectada na rede eléctrica pelo sistema eólico com conversor de dois níveis é apresentado na Fig. 9.

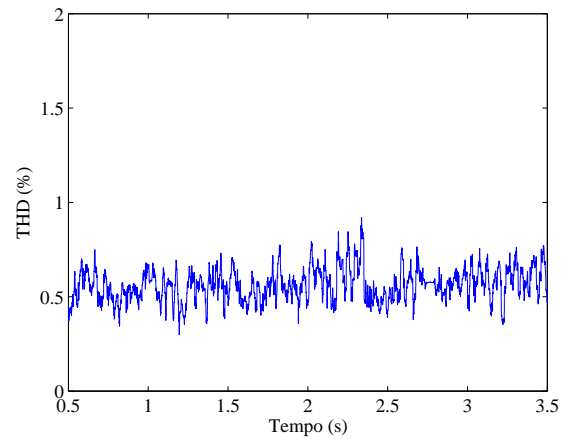


Fig. 9. THD da corrente – conversor de dois níveis.

As tensões nos bancos de condensadores do sistema eólico com conversor multinível são apresentadas na Fig. 10. Durante a falha no controlo do ângulo do passo da pá da turbina, a cava da tensão é de apenas 395 V.

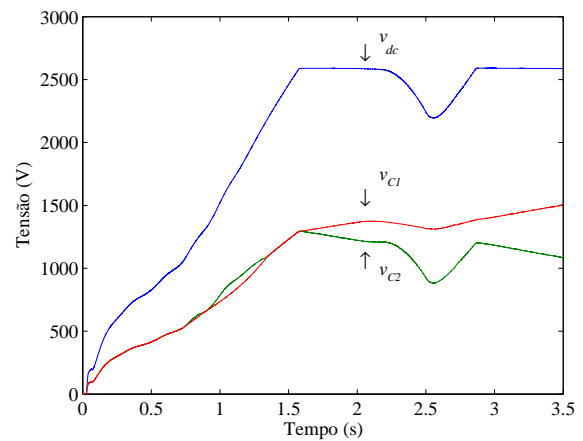


Fig. 10. Tensão nos bancos de condensadores.

O valor eficaz da corrente injectada na rede eléctrica pelo sistema eólico com conversor multinível é apresentado na Fig. 11.

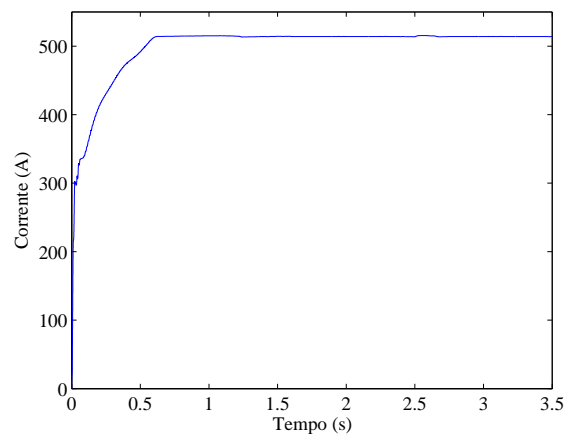


Fig. 11. Valor eficaz da corrente – conversor multinível.

O THD da corrente injectada na rede eléctrica pelo sistema eólico com conversor multinível é apresentado na Fig. 12.

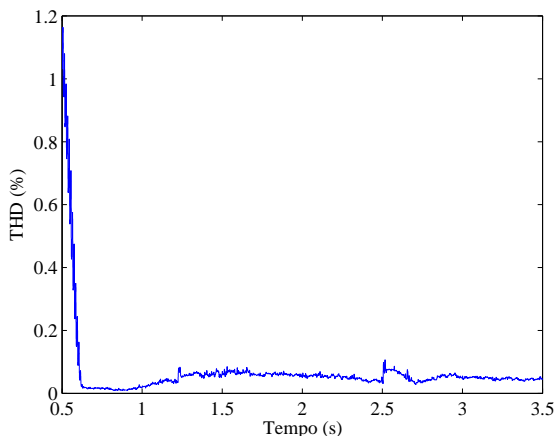


Fig. 12. THD da corrente – conversor multinível.

Os resultados mostram que o THD da corrente injectada na rede eléctrica pelo sistema eólico com conversor multinível e sistema eólico com conversor de dois níveis, respectivamente, são inferiores ao limite de 5% imposto pela norma IEEE-519 standard [17]. Embora a norma IEEE-519 possa não ser aplicável em tais situações, é utilizada como um guia para fins de comparação [18].

6. Conclusões

A par do rápido crescimento da energia eólica, surgem novos desafios técnicos: estabilidade da rede eléctrica e a qualidade da energia. Neste trabalho foi estudada a estabilidade transitória de sistemas eólicos de velocidade variável com topologias de conversores electrónicos de potência de dois níveis e multinível, considerando não só perturbações na velocidade do escoamento de aproximação à turbina, mas também uma falha momentânea no controlo do passo das pás da turbina. Os resultados mostram que o THD da corrente injectada na rede eléctrica é inferior ao limite de 5% imposto pela norma IEEE-519.

Referências

[1] T. Ahmed, K. Nishida, and M. Nakaoka, “Advanced control of PWM converter with variable-speed induction generator”, *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 42, pp. 934-945, Julho-Agosto 2006.

[2] A. Estanqueiro, R. Castro, P. Flores, J. Ricardo, M. Pinto, R. Rodrigues, and J. Peças Lopes, “How to prepare a power system for 15% wind energy penetration: the Portuguese case study”, *Wind Energy*, Vol. 11, pp. 75-84, Janeiro-Fevereiro 2008.

[3] Y. Coughlan, P. Smith, A. Mullane, and M. O’Malley, “Wind turbine modelling for power system stability analysis - A system operator perspective”, *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 22, pp. 929-936, Agosto 2006.

[4] N. R. Ullah, and T. Thiringer, “Variable speed wind turbines for power system stability enhancement”, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 52-60, Março 2007.

[5] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, A. M. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey”, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 53, pp. 1002-1016, Agosto 2006.

[6] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators”, *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 2369-2385, Novembro 2007.

[7] S. T. Tenzakis, and S. A. Papathanassiou, “An investigation of the harmonic emissions of wind turbines”, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 150-158, Março 2007.

[8] J. F. Conroy, and R. Watson, “Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator”, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 1, pp. 182-189, Setembro 2007.

[9] T. Sun, Z. Chen, and F. Blaabjerg, “Transient Stability of DFIG wind turbines at an external short-circuit fault”, *Wind Energy*, Vol. 8, pp. 345-360, Julho-Setembro 2005.

[10] Z. X. Xing, Q. L. Zheng, X. J. Yao, and Y. J. Jing, “Integration of large doubly-fed wind power generator system into grid”, in: *Proc. 8th Int. Conf. Electrical Machines and Systems*, Vol. 8, pp. 1000-1004, Setembro 2005.

[11] V. Akhmatov, H. Knudsen, and A. H. Nielsen, “Advanced simulation of windmills in the electric power supply”, *Int. Journal of Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 22, pp. 421-434, Agosto 2000.

[12] R. Melicio, V.M.F. Mendes, and J.P.S. Catalão, “Two-level and multilevel converters for wind energy systems: a comparative study”, in: *Proc. 13th Int. Power Electronics and Motion Control Conf.*, Vol. 8, pp. 1682-1687, Setembro 2008.

[13] R. Melicio, V.M.F. Mendes, and J.P.S. Catalão, “Evaluating power quality in wind power generation systems with two-level and multi-level converters”, in: *Proc. 6th Mediterranean Conf. and Exhibition on Power Generation, Transmission and Distribution*, Novembro 2008.

[14] C.-M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using Matlab/Simulink*, NJ: Prentice-Hall, City (1998), pp. 259-350.

[15] T. Senjyu, S. Tamaki, N. Urasaki, and K. Uezato, “Wind velocity and position sensorless operation for PMSG wind generator”, in: *Proc. 5th Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*, Novembro 2008.

[16] T. Beltran, T. Ahmed-Ali, and M. E. H. Benbouzid, “Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 23, pp. 551-558, Junho 2008.

[17] IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters, IEEE Standard 519-1992.

[18] T. M. H. Nick, K. Tan, and S. Islam, “Mitigation of harmonics in wind turbine driven variable speed permanent magnet synchronous generators”, in: *Proc. 7th Int. Power Engineering Conf.*, Novembro-Dezembro 2005.