

RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA DE TURBINAS EÓLICAS BASEADAS EM MÁQUINA DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA ATRAVÉS DO CONTROLE POR ESCORREGAMENTO COM FLUXO ESTATÓRICO

ALVARO RANIERE COSTA ALVES*, LUCIANO SALES BARROS†

**Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Lagoa Nova
Natal, RN, Brasil*

†*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Lagoa Nova
Natal, RN, Brasil*

Emails: aranierrealves@gmail.com, lsalesbarros@dee.ufrn.br

Abstract— In order to increase the efficiency of wind energy conversion systems (WECS), the application of full-power converter wind turbines, which operate in wider ranges of wind speed, has been increasingly studied. This configuration allows improved Maximum Power Point Tracking (MPPT). When WECS use back-to-back converters, the machine side converter performs the MPPT, while the grid side converter controls the active and reactive power delivered to the grid. This paper presents the implementation of a Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)-based full-variable speed WECS, and using the flux and torque control by vectorial strategy to perform the MPPT. Simulations using the Matlab/Simulink software show the efficiency of the proposed strategy for performing MPPT.

Keywords— MPPT, Squirrel Cage Induction Generator, Flux and Torque Control, Wind Energy.

Resumo— Com o objetivo de melhorar a eficiência dos sistemas de conversão de energia eólica (SCEE), a aplicação de turbinas com conversores de potência plena, capazes de operar em uma faixa mais extensa de velocidades de vento, vem sendo cada vez mais estudada. Esta configuração possibilita um melhor rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*). Nos SCEES que utilizam conversores do tipo *back-to-back*, o conversor do lado da máquina realiza o MPPT, enquanto que o conversor do lado da rede controla as potências ativa e reativa entregues à rede. Este artigo apresenta a implementação um SCEE de velocidade completamente variável baseado em gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo (SCIG, do inglês *Squirrel Cage Induction Generator*), e utilizando a estratégia de controle vetorial de fluxo e conjugado para realizar o MPPT. Simulações utilizando o *software Matlab/Simulink* comprovam a eficiência da estratégia proposta para realização do MPPT.

Palavras-chave— MPPT, Gerador de Indução com Rotor em Gaiola, Controle de Fluxo e Conjugado, Energia Eólica.

1 Introdução

Dentre todas as fontes renováveis de energia, os Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEEs) são os que mais chamam atenção. Como consequência, diversos estudos vêm sendo realizados nesse setor com o propósito de melhorar a eficiência desses sistemas (Camila Mara V. Barros, 2015), avaliar seu funcionamento durante situações atípicas da rede (Luciano S. Barros, 2017), e propor novas tecnologias (H. Merabet Boulouha, 2015).

Os principais componentes de um SCEE são: a turbina, o gerador e o conversor eletrônico de potência. Utilizando diferentes combinações destes componentes, são obtidas diversas topologias. Dentre estas, as mais estudadas e utilizadas comercialmente nas últimas décadas (Venkata Yaramasu, 2015), (Cheng and Zhu, 2014) são: SCEE de velocidade fixa (D. Trudnowski, 2004); SCEE de velocidade semi-variável (J. Lopez and Marroyo, 2007); e SCEE de velocidade completamente variável (Camila Mara V. Barros, 2015).

Turbinas de velocidade completamente variá-

vel possuem um desempenho muito superior no que se refere à eficiência de conversão, pois a faixa de velocidade (0-100%) permite a realização de MPPT para qualquer velocidade de vento, (Camila Mara V. Barros, 2015), (H. Merabet Boulouha, 2015). Esta topologia utiliza conversores plenos de potência e são utilizados geradores como PMSG (do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*), WRSG (*Wound Rotor Synchronous Generator*) e SCIG (*Squirrel Cage Induction Generator*). Além da maior eficiência de conversão, a utilização de conversores plenos permite que o sistema realize compensação de potência reativa e favorece uma conexão mais suave à rede. Contudo, o fato dos conversores serem de mesma potência das máquinas faz com que seu tamanho, complexidade e custo aumentem.

A utilização do SCIG em um sistema de geração de velocidade completamente variável traz diversas vantagens em relação aos demais geradores: é uma máquina simples, robusta e mais resistente a variações bruscas de torque, apresenta menor custo e não necessita de manutenções constantes devido a não usar escovas.

Neste trabalho será apresentada a implementação de um SCEE de velocidade completamente variável baseado em SCIG, para a realização do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Será contemplado o desenvolvimento de modelos para a turbina, gerador e conversores como também o projeto de controle para o funcionamento do sistema, a implementação desses modelos no *software Matlab/Simulink* e os resultados.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 é apresentado o modelo mecânico da turbina eólica. Na Seção 3 será apresentado o modelo elétrico do SCIG. Na Seção 4 serão abordados os projetos dos sistemas de controle e a modelagem do conversor. Na Seção 5 serão apresentados os resultados das simulações. Por fim, serão apresentadas as conclusões.

2 Modelo mecânico do aerogerador

O aerogerador consiste da turbina eólica conectada por meio de um multiplicador mecânico de velocidade (caixa de engrenagem) ao rotor de um SCIG. O modelo mecânico utilizado neste trabalho foi apresentado em (Heier, 1998) e (Barros and Barros, 2017), e é dividido em três partes principais: a aerodinâmica da turbina, o sistema de transmissão mecânica e o SCIG. Um esquema do modelo é apresentado na Figura 1.

3 Modelo elétrico

O SCIG apresenta múltiplas fases no rotor (cada barra da gaiola constitui uma fase). Para simplificar o processo de modelagem, foi considerado que o rotor possui três enrolamentos igualmente defasados entre si, como apresentado na Figura 2.

O modelo desenvolvido neste trabalho foi apresentado em (Barbi, 1985), e são feitas as seguintes considerações: os três enrolamentos do estator são iguais entre si; os três enrolamentos do rotor são iguais entre si; o entreferro é constante (polos lisos); o circuito magnético é ideal (sem saturação); a distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é radial e senoidal.

Os fluxos e as tensões do estator e do rotor, como também o conjugado eletromagnético, podem ser obtidos por:

$$\phi_{s123} = \bar{L}_{ss}i_{s123} + \bar{L}_{sr}i_{r123} \quad (1)$$

$$\phi_{r123} = \bar{L}_{rs}i_{s123} + \bar{L}_{rr}i_{r123} \quad (2)$$

$$v_{s123} = R_s i_{s123} + \frac{d\phi_{s123}}{dt} \quad (3)$$

$$v_{r123} = R_r i_{r123} + \frac{d\phi_{r123}}{dt} \quad (4)$$

$$T_e = P i_{s123} \frac{d\bar{L}_{sr}}{d\theta} i_{r123}. \quad (5)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{ss} &= \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \\ \bar{L}_{rr} &= \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}, \\ \bar{L}_{sr} &= M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}, \\ \bar{L}_{rs} &= \bar{L}_{sr}' \text{ e } \frac{d\bar{L}_{sr}}{d\theta} = \\ &= -M_{sr} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin \theta & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin \theta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Em que i_{s123} são as correntes nas fases do estator; i_{r123} são as correntes nas fases do rotor; ϕ_{s123} são os fluxos concatenados pelas bobinas das fases do estator; ϕ_{r123} são os fluxos concatenados pelas bobinas das fases do rotor; v_{s123} são as tensões nas fases do estator; v_{r123} são as tensões nas fases do rotor; L_s é a indutância própria de uma bobina do estator; L_r é a indutância própria de uma bobina do rotor; M_s é a indutância mútua entre duas bobinas do estator; M_r é a indutância mútua entre duas bobinas do rotor; M_{sr} é a indutância mútua entre uma bobina do estator e uma do rotor; P é o número de pares de polos da máquina; θ é a posição angular elétrica do rotor. O modelo elétrico é representado pelo esquema da Figura 3.

4 Sistemas de controle

O esquema completo está representado na Figura 4, onde o aerogerador (turbina + caixa de engrenagens + SCIG) é conectado à rede através de um conversor de potência plena (*back-to-back*). A operação desse conversor pode ser dividida em dois subsistemas: controle do lado do gerador e controle do lado da rede. Nesta seção serão apresentados os projetos desses controles e a modelagem dos conversores do lado da máquina, C_1 , e do lado da rede, C_2 .

4.1 Controle do lado do gerador

O controle do lado do gerador é responsável por realizar o MPPT, para isso controla-se a velocidade da turbina, ω_t , em resposta às variações da velocidade do vento, v_w , para manter a relação ótima de velocidade na ponta da pá, λ , (Luciano S. Barros, 2017), e então captar o máximo de potência possível. O controle da velocidade da turbina é realizado controlando a velocidade do rotor do SCIG, já que estão mecanicamente acoplados.

O modelo de máquina no referencial 123, (1) a (5), é um sistema multivariável e não linear, o que dificulta o projeto de um sistema de controle com bom desempenho dinâmico. Aplicando a Transformada de Park é possível simplificar o modelo

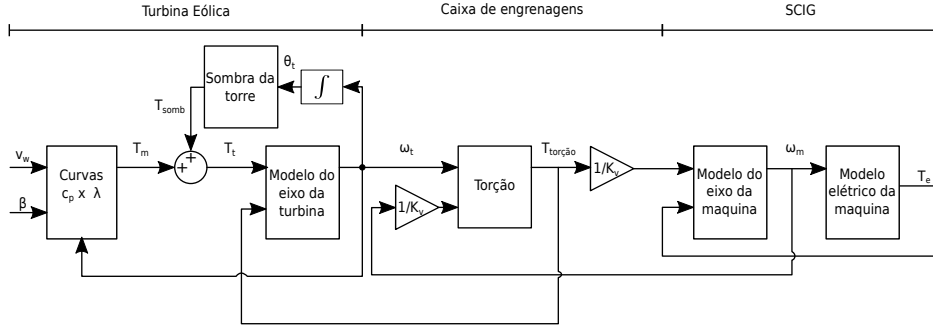


Figura 1: Diagrama de blocos do modelo do aerogerador.

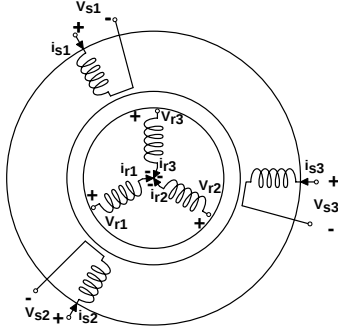


Figura 2: Máquina simétrica trifásica.

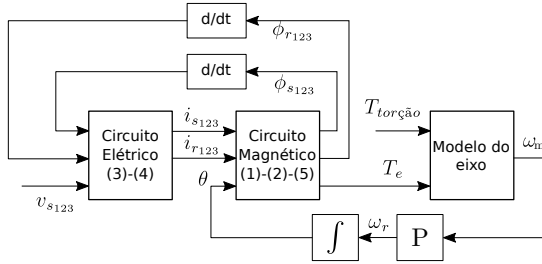


Figura 3: Modelo elétrico do aerogerador.

da máquina trifásica para um sistema com três eixos desacoplados 0, d e q. O modelo de máquina em 0dq para um referencial genérico, g , é representado por (6) a (10).

A estratégia utilizada é a de controle de fluxo e conjugado por escorregamento com fluxo estático. Esta estratégia vetorial é uma variação da apresentada em (T. G. Habetler, 1991), e foi desenvolvida para controle de velocidade de motores de indução. Na aplicação desta estratégia (1) a (5) foram manipuladas para se obter o modelo descrito por (11) a (16) no referencial estator da máquina, s .

Analisando (11) percebe-se que o conjugado eletromagnético pode ser controlado por ω_{ar} desde que a intensidade de fluxo ϕ_s seja mantida constante. O controle de fluxo por sua vez é realizado controlando as componentes d e q no referencial estático. Os fluxos podem ser estimados a partir das correntes e tensões estáticas, de acordo

com (17).

O controle gera referências de tensão a serem aplicadas ao estator da máquina pelo conversor C_1 . O diagrama de blocos do sistema de controle é ilustrado na Figura 5.

Equações em 0dq:

$$v_s^g = r_s i_s^g + \frac{d\phi_s^g}{dt} + j\omega_g \phi_s^g \quad (6)$$

$$0 = r_r i_r^g + \frac{d\phi_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \phi_r^g \quad (7)$$

$$\phi_s^g = l_s i_s^g + l_m i_r^g \quad (8)$$

$$\phi_r^g = l_r i_r^g + l_m i_s^g \quad (9)$$

$$T_e = i_s \phi_s \sin(\delta_i - \delta_a) = \frac{l_m}{l_r} \phi_r \sin(\delta_i - \delta_b). \quad (10)$$

Equações em 0dq manipuladas para o controle:

$$T_e = \frac{Pl_m^2 \omega_{ar} \phi_s^2}{r_r l_s^2} \quad (11)$$

$$\phi_s^{s*} = \phi_s^* e^{j\delta_a^*} \quad (12)$$

$$\delta_a^* = \int_0^t \omega_{ar}^*(\tau) d\tau + \int_0^t \omega_r(\tau) d\tau \quad (13)$$

$$v_s^g = \frac{r_s}{\sigma l_s} \phi_s^g + \frac{d\phi_s^g}{dt} - \frac{l_m r_s}{\sigma l_s l_r} \phi_r^g \quad (14)$$

$$v_{sd}^s = \frac{r_s}{\sigma l_s} \phi_{sd}^s + \frac{d\phi_{sd}^s}{dt} - \frac{l_m r_s}{\sigma l_s l_r} \phi_{rd}^s \quad (15)$$

$$v_{sq}^s = \frac{r_s}{\sigma l_s} \phi_{sq}^s + \frac{d\phi_{sq}^s}{dt} - \frac{l_m r_s}{\sigma l_s l_r} \phi_{rq}^s. \quad (16)$$

Estimador de fluxo:

$$\phi_s^s = \int_0^t [v_s^s(\tau) - r_s i_s^s(\tau)] d\tau. \quad (17)$$

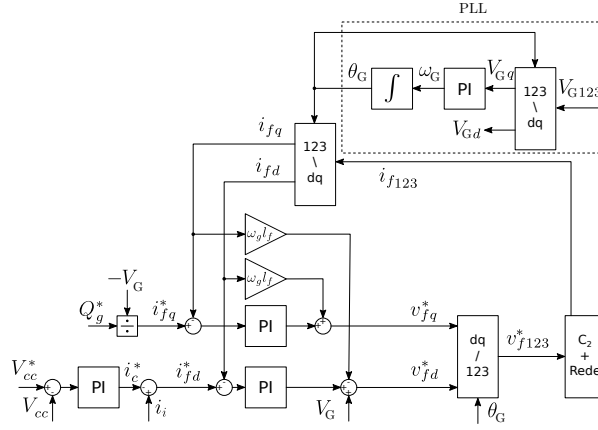


Figura 6: Controle do lado da rede.

5 Resultados

Os modelos apresentados anteriormente foram implementados utilizando o software Matlab/Simulink. Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações para avaliar o desempenho da estratégia de controle proposta no processo de acionamento do SCEE, na realização do MPPT e o comportamento do sistema durante rajadas de vento. Os dados do SCEE simulado são apresentados no Apêndice.

5.1 Entrada em operação do controle

É importante avaliar o funcionamento do controle desde o processo de entrada em operação, Figura 7. Este é composto de três etapas: pré carga do capacitor do elo cc, início do controle do lado da rede e início do controle do lado do gerador.

Na primeira etapa, o capacitor do elo cc é carregado até V_{cc} atingir o valor de operação do conversor *back-to-back*.

Após a primeira etapa, o controle do lado da rede entra em operação, sendo iniciado o chaveamento do conversor C_2 para manter a tensão cc.

Por fim entra em operação o controle do lado do gerador, iniciando o chaveamento de C_1 . Nesta etapa o SCIG funciona inicialmente como motor acelerando até atingir a velocidade de referência do MPPT e então passa a funcionar como gerador.

5.2 Resultados do MPPT

O perfil de vento real utilizado na simulação é apresentado na Figura 8. O trecho em destaque corresponde ao período de 1 minuto para o qual foi simulado o MPPT.

O controle apresenta um desempenho excelente como pode ser observado na Figura 9, mantendo-se praticamente com o mesmo valor da referência de velocidade. O resultado do MPPT pode ser observado pelo gráfico do coeficiente de potência c_p na Figura 10, que é mantido em seu valor máximo durante todo o processo,

0,411 segundo o modelo utilizado para $\beta = 0$, (Heier, 1998). O resultado do controle de fluxo pode ser observado na Figura 11, em que a intensidade do fluxo estatístico é mantida constante durante toda a operação.

5.3 Comportamento em rajadas de vento

Um fator importante a ser avaliado é o comportamento do controle perante rajadas de vento. Foi aplicada à turbina uma rajada de vento cujo perfil é ilustrado na Figura 12.

Durante uma rajada de vento, a velocidade sofre variações bruscas, Figura 13. Observando o gráfico da potência ativa, Figura 15, percebe-se que em determinados momentos o SCEE consome energia da rede. Devido à velocidade do gerador ser controlada pelo escorregamento do fluxo estatístico, para um aumento brusco da velocidade do vento o controlador gera uma referência de escorregamento positiva, com o objetivo de acompanhar a referência e acelerar o SCIG, fazendo-o funcionar como motor.

Uma forma de evitar que a máquina funcione como motor, nestes casos, é limitar o escorregamento de referência, ω_{ar}^* da Figura 5, para um valor máximo de 0 rad/s. Uma nova simulação foi realizada aplicando esta alteração e os resultados podem ser observados nas Figuras 14 e 16.

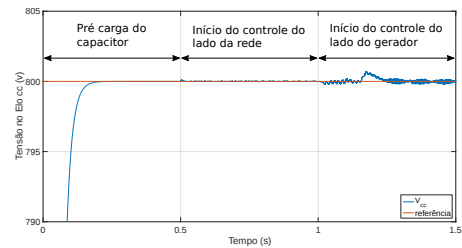


Figura 7: Entrada em operação do SCEE.

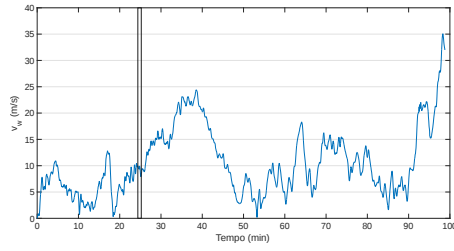


Figura 8: Curva de vento real.

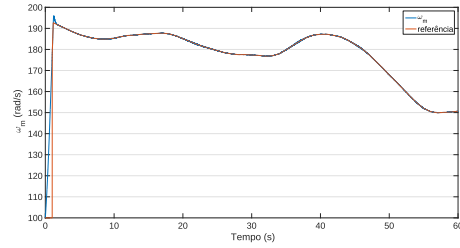


Figura 9: Comportamento da velocidade do rotor do SCIG.

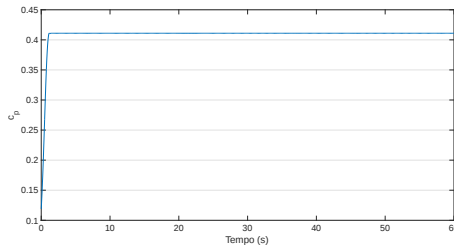


Figura 10: Coeficiente de potência.

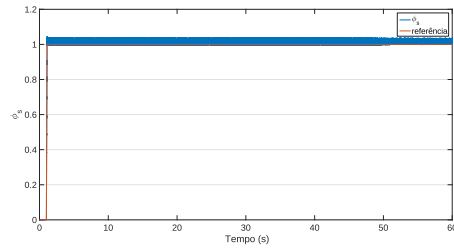


Figura 11: Intensidade de fluxo.

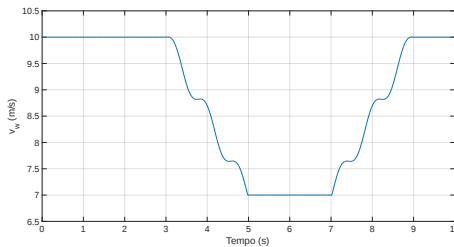


Figura 12: Perfil da rajada de vento.

6 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a implementação da estratégia vetorial de controle de fluxo e conjugado por escorregamento com fluxo estatístico em um SCEE de velocidade variável baseado em

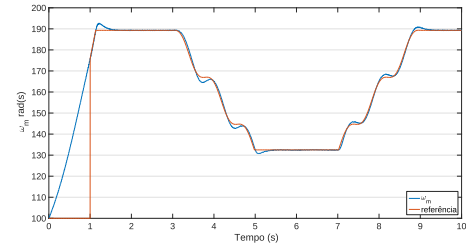


Figura 13: Velocidade do SCIG sem a alteração.

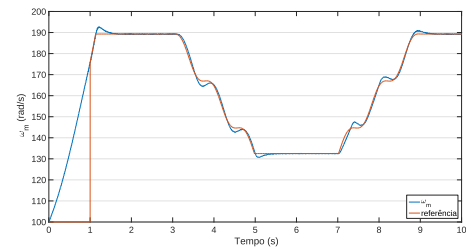


Figura 14: Velocidade do SCIG com a alteração.

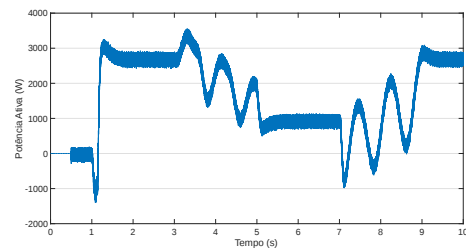


Figura 15: Potência entregue à rede sem a alteração.

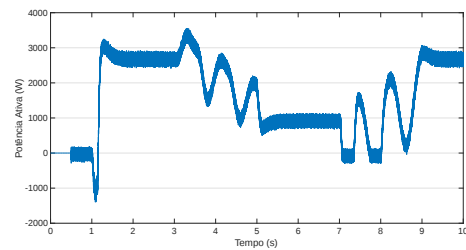


Figura 16: Potência entregue à rede com a alteração.

SCIG. Os resultados das simulações revelam o bom desempenho da estratégia proposta na realização de MPPT, obtendo-se a máxima eficiência na conversão energética durante todo o período de operação. A utilização do gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo apresenta diversas vantagens, dentre elas: a robustez da máquina, a capacidade de suportar variações bruscas de velocidade, e apresentar um bom tempo de resposta aos comandos dos controladores. Como únicas desvantagens tem-se: a necessidade de se utilizar uma caixa de engrenagens, o que aumenta o peso do sistema e a frequência de manutenções, e em casos de máquinas de grande porte, o tamanho e a complexidade dos conversores.

Apêndice

Os dados do gerador são apresentados na Tabela 1. Parâmetros da turbina eólica na Tabela 2. Os dados do conversor e do filtro de linha estão na Tabela 3. Os ganhos dos controladores PI estão na Tabela 4.

Tabela 1: Parâmetros do SCIG.

Parâmetro	Valor
Tensão Nominal	380/220 V
Potência Nominal	3400 W
L_s e L_r	0,214067 H
R_s e R_r	2,8237 Ω
M_s e M_r	-0,0994 H
M_{sr}	0,1989 H
P	2
F_m	0,00146 N · m · s/rad
J_m	0,0133 Kg · m ²

Tabela 2: Parâmetros da turbina eólica.

Parâmetro	Valor
R	2,1 m
ρ	1,21 kg/m ³
J_t	5 kg · m ²
F_t	0,02 N · m · s/rad
K_{somb}	0,2
α	30°
K_v	5
K_{toro}	50000

Tabela 3: Conversor e filtro de linha.

Parâmetro	Valor
C	2000 μF
τ_s	0,2 ms
V_{cc}	800 V
r_f	0,05 Ω
l_f	30 mH

Tabela 4: Dados dos controladores PI.

Malha de controle	K_p	K_i
ω_m	5,32	29,2
ϕ_{sd}	4000	380770,4
ϕ_{sq}	4000	380770,4
V_{cc}	1,6	320
PLL	30	200
i_{fd}	120	200
i_{fq}	120	200

Agradecimentos

Os autores agradecem ao DEE da UFRN pela oportunidade de realização deste trabalho.

Referências

- Barbi, I. (1985). *Teoria fundamental do motor de indução*, Editora da UFSC Florianópolis.
- Barros, L. and Barros, C. (2017). An internal model control for enhanced grid-connection of direct-driven pmsg-based wind generators, *Electric Power Systems Research* **151**: 440–450.
- Camila Mara V. Barros, Wellington S. Mota, P. R. B. L. S. B. (2015). MPPT de sistemas de conversão de energia eólica baseados em PMSG usando controle preditivo, *Eletrônica de Potência* **20**(4): 362–364.
- Cheng, M. and Zhu, Y. (2014). The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review, **88**: 332–347.
- D. A. Fernandes, F. F. Costa, E. C. D. S. (2013). Digital-Scalar PWM approaches applied to four-leg voltage source inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **60**(5): 2022–2030.
- D. Trudnowski, A. Gentile, J. K. E. P. (2004). Fixed-speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies, *IEEE Trans. Power Syst.* **19**(4): 1911–1917.
- H. Merabet Boulouiha, A. Allali, M. L. A. T. M. D. A. D. (2015). Direct torque control of multilevel SVPWM inverter in variable speed SCIG-based wind energy conversion system, *Renewable Energy* **80**: 140–152.
- Heier, S. (1998). *Grid integration of wind energy conversion systems*, 2 edn, University of Kassel, Germany.
- J. Lopez, P. Sanchis, X. R. and Marroyo., L. (2007). Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips, *generator during three-phase voltage dips,* *IEEE Trans. Energy Convers.* **22**(3): 709–717.
- Luciano S. Barros, C. M. V. B. (2017). Modificação no controle do lado da rede de geradores eólicos baseados em PMSG para ampliar a suportabilidade a afundamentos de tensão, *Eletrônica de Potência* **22**(2): 167–178.
- T. G. Habetler, D. M. D. (1991). Control strategies for direct torque control using discrete pulse modulation, *IEEE Trans. Ind. Appl. cat.* **27**: 893–901.
- Venkata Yaramasu, Bin Wu, P. C. S. S. K. M. N. (2015). High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies, *Proceedings of the IEEE* **103**(5).