

GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA A PARTIR DO GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Leonardo Pires de Sousa Silva – leonardo85pires@gmail.com

Levy Rodrigues Cavalcante – levyrodrigues8@gmail.com

Denisia de Vasconcelos Mota – denisia.vasconcelos07@gmail.com

Lucas Taylan Pontes Medeiros – lucastaylanp@gmail.com

Adson Bezerra Moreira – adsonbmoreira@gmail.com

Vanessa S. C. Teixeira – vanessasct@gmail.com

Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Resumo. Este artigo analisa o comportamento de um sistema de energia eólica quando submetido à variação de potência produzida na geração. A conexão de sistemas de geração distribuída à rede elétrica impõe desafios no controle da potência gerada, visto que toda demanda da carga deve ser suprida integralmente. Nesse sentido, é proposto o controle de potência em um sistema de geração de energia eólica com uso de um gerador síncrono de ímã permanente (GSIP) de velocidade variável. As potências ativa e reativa são controladas no conversor do lado do gerador (CLG) pela orientação do fluxo rotórico no eixo-d. No conversor do lado da rede (CLR), a potência injetada na rede é controlada pelo sincronismo entre a tensão da rede e a corrente produzida no CLR. A estrutura do sistema consiste em um GSIP com capacidade nominal de geração de 12 kW conectado através de um conversor CA/CC a um elo CC que, por sua vez, é conectado à rede por um conversor CC/CA. Neste esquema, o CLR é usado para controlar a tensão do elo CC e das correntes entregues ao ponto de acoplamento comum (PAC). Os resultados de simulações permitem inferir que a técnica empregada no controle de potências do sistema analisado mostrou-se satisfatório para a geração de energia eólica entregue à rede elétrica.

Palavras-chave: CLR, GSIP, Energia Eólica.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a geração de energia a partir de fontes renováveis, como a eólica, se tornou mais atraente devido ao menor impacto ambiental causado e à escassez de combustíveis utilizados pela geração de energia tradicional em um futuro próximo (Gosh, Saha e Panda, 2015). Segundo Patil, Saha e Bhosle (2013), existem vários tipos de geradores para sistemas de conversão de energia eólica, dentre eles estão o Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (GIGE), Gerador de Indução com Rotor Bobinado (GIRB), Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA) e o Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (GSIP). Este último, se destaca por apresentar diversas vantagens como: inexistência de um sistema de excitação, possuir um sistema de controle simplificado e ter custos de manutenção relativamente baixos (Zarkov e Demirkov, 2017). Além disso, o GSIP é adequado para operar com velocidades variáveis fornecendo um acréscimo de potência entre 10 e 15% quando comparado com a operação em velocidade constante (Minh et al, 2012).

Devido a natureza inconstante dos ventos, em relação à demanda da rede, a produção de energia em usinas eólicas pode ser superavitária ou deficitária, sendo necessária a implantação do controle de potências (Varadarajan e Kottayil, 2016). Além disso, é necessário utilizar esse tipo de controle para regular a frequência da rede (Mu, Qiao e Lo, 2012), pois quando a frequência diminui, a potência ativa aumenta (Yingcheng e Nengling, 2011). Existem diferentes estratégias aplicadas em máquinas síncronas como: *synchronous reference frame (SRF)*, Máximo Torque por Ampère (MTPA) e o Controle Direto de Potência (CDP).

Zarkov e Demirkov (2017) propõem um sistema que controla as potências ativa e reativa através do torque, associando dois algoritmos: MTPA e o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês: *Maximum Power Point Tracking*). A estratégia é criar o valor máximo de torque eletromagnético no gerador com corrente mínima do estator através do MTPA. O MPPT, entretanto, ajusta o ponto de máxima potência do gerador, de acordo com a velocidade do vento. Deste modo, a turbina eólica pode ser operada em toda a região de velocidade variável.

Vários autores como Mahdhi, Azza e Jemli(2019), Varadarajan e Kottayil (2016) e Ejlali e Arab Khaburi (2014) utilizam a estratégia CDP. A estratégia se baseia no controle das potências instantâneas do sistema e fornece uma resposta dinâmica rápida através de uma estrutura simples que opera adequadamente quando o sistema apresenta variações dos parâmetros de tensão e corrente (Mahdhi,Azza e Jemli, 2019). Entretanto, o CDP apresenta grande ondulação nas correntes elétricas e nas potências ativa e reativa. Além disso, a frequência de comutação variável é outra desvantagem deste método (Ejlali e Arab Khaburi, 2014).

Este artigo propõe uma estratégia de controle baseada na teoria SRF, na qual as potências ativa e reativa são controladas pelas correntes de componentes direta e em quadratura. Neste método, a corrente de eixo direto é controlada em zero, diminuindo a corrente no estator da máquina e minimizando as perdas dos enrolamentos (Sharma e Gidwani, 2018) (Bunjongjit e Kumsuwan, 2013).

A configuração do sistema de geração eólica analisado com o GSIP é mostrada na figura 1, na qual o GSIP é conectado à rede elétrica por meio de um conversor back-to-back, que consiste em um conversor CA/CC, um elo de corrente contínua e um conversor CC/CA conectado ao ponto de acoplamento comum (PAC) por um filtro indutivo para

melhorar a corrente entregue à rede elétrica. Também foi analisada a distorção harmônica total (DHT) da corrente da rede, a fim de verificar os níveis de distorções para diferentes operações de geração.

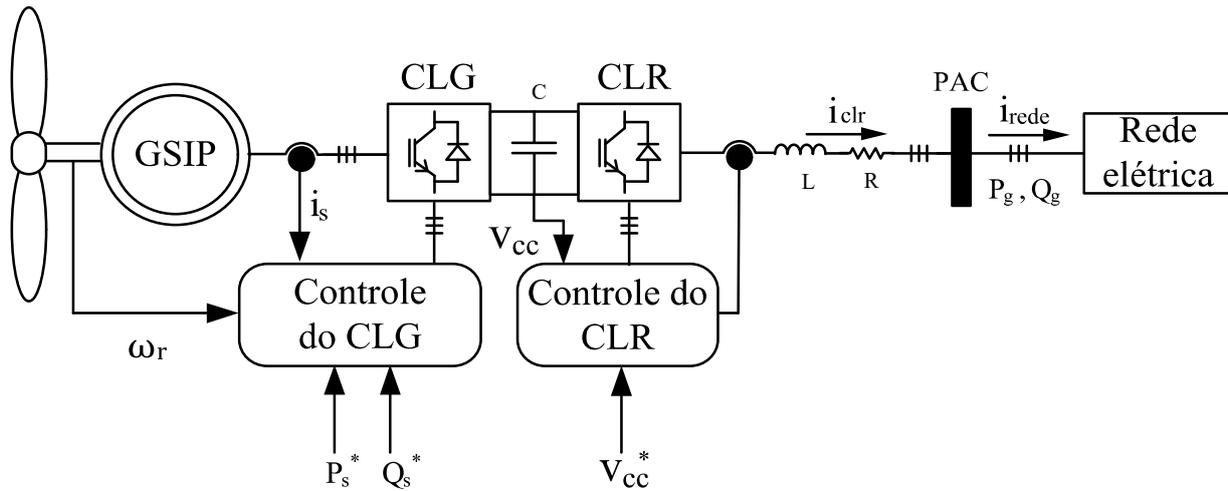


Figura 1 – Esquema de operação da geração de energia eólica com o GSIP.

2. CONTROLE DAS POTÊNCIAS DO GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE

2.1 Controle do conversor do lado do gerador (CLG)

Para que seja possível o controle das potências ativa e reativa do GSIP isoladamente, é necessário que elas estejam desacopladas. Para isso, o controle vetorial do CLG é realizado pela orientação do fluxo do rotor na orientação na referência síncrona no eixo-d (Aminarser Yazdazni, 2010). Logo, o controle deve ser implementado de acordo com o modelo dinâmico da máquina em coordenadas d-q, conforme (1) e (2).

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - L_{sq} \omega_r i_{sq} \quad (1)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + L_{sd} \omega_r i_{sd} + \omega_r \lambda_m \quad (2)$$

onde V_{sd} e V_{sq} são as componentes da tensão no estator, R_s é a resistência do estator, i_{sd} e i_{sq} são as componentes de corrente do estator, L_{sd} e L_{sq} são as componentes de indutância do estator, ω_r é a velocidade do rotor e λ_m o fluxo magnético.

O modelo dinâmico da máquina é complementado com a equação do torque eletromagnético no rotor (3).

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) [(L_{sd} - L_{sq}) i_q i_d + \lambda_m i_{sq}] \quad (3)$$

em que T_e é o torque eletromagnético e p é o número de polos.

O cálculo do torque eletromagnético depende da construção do gerador, podendo este ser de polos lisos ou salientes (Aminarser Yazdazni, 2010). O GSIP utilizado no projeto possui polos lisos, logo, $L_{sd} = L_{sq}$, e, assim, a equação (3) resulta em (4):

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \lambda_m i_{sq} \quad (4)$$

Para facilitar a implementação do controle do gerador, pode-se introduzir duas novas variáveis (u_d e u_q) a partir de (1) e (2) para representar o desacoplamento das componentes das correntes do estator. Assim, a regulação das correntes se torna possível a partir do desacoplamento com sistema de primeira ordem, do inglês *single-input-single-output* (SISO) a partir de (1) e (2), conforme (5) e (6):

$$L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + R_M i_{sd} = u_d \quad (5)$$

$$L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + R_M i_{sq} = u_q \quad (6)$$

A partir de (5) e (6), pode-se regular as duas componentes de corrente do estator i_{sd} e i_{sq} para suas respectivas referências, de acordo com o esquema mostrado na Fig. 2.

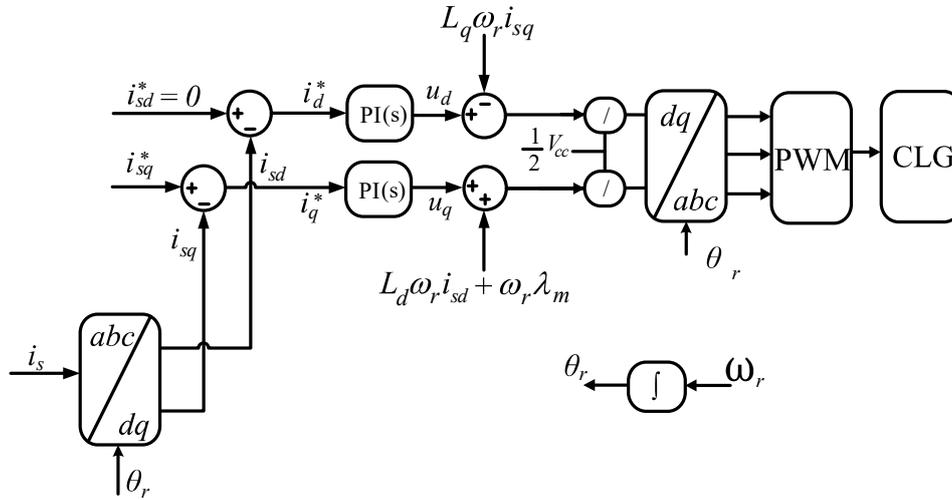


Figura 2 – Esquema de controle do conversor do lado do gerador (CLG).

A potência ativa e a potência reativa do GSIP em termos das coordenadas d-q podem ser definidas de acordo com Moreira (2017), conforme (7) e (8).

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} + V_{sd} i_{sq}) \quad (8)$$

Como o controle do GSIP é realizado de acordo com o eixo em quadratura, pode-se considerar $i_{sd} = 0$ e reescrever as equações das potências ativa e reativa (7) e (8) nas formas simplificada (9) e (10), respectivamente.

$$P_s = \frac{3}{2} V_{sq} i_{sq} \quad (9)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} V_{sd} i_{sq} \quad (10)$$

2.2 Controle do conversor do lado da rede (CLR)

O controle vetorial do conversor do lado da rede é realizado pelo sincronismo da tensão da rede elétrica com as correntes sintetizadas pelo CLR. É aplicado um algoritmo chamado *Phase Locked Loop* (PLL) para rastrear o ângulo da tensão no PAC, e então sincronizar o sistema no lado da rede.

O esquema do controle do CLR é mostrado na Fig. 3, em que as potências de referências são calculadas por (11) e (12).

$$P_{sref} = \frac{3}{2} [V_d i_d^* + V_q i_q^*] \quad (11)$$

$$Q_{sref} = \frac{3}{2} [-V_d i_q^* + V_q i_d^*] \quad (12)$$

O controle de potências é feito em coordenadas dq, em que as componentes de tensão e corrente do eixo-q, V_q e i_q^* , são nulas. Desta forma, a potência reativa de referência é nula e a corrente de referência no eixo-q é dada por (13).

$$i_d^* = \frac{2}{3V_d} P_{sref} \quad (13)$$

O conversor fonte de tensão do lado da rede controla a corrente entregue ao PAC e também a tensão no elo CC. Este conversor é conectado à rede por meio de um filtro indutivo e, como a tensão da rede é conhecida, sintetizando uma tensão nos terminais do conversor controla-se a corrente injetada na rede.

O controle da tensão do elo CC é feito pela comparação da tensão medida e da tensão de referência, ambas normalizadas de forma quadrática. Esse controle permite extrair as correntes de referências que são utilizadas na malha de corrente do CLR.

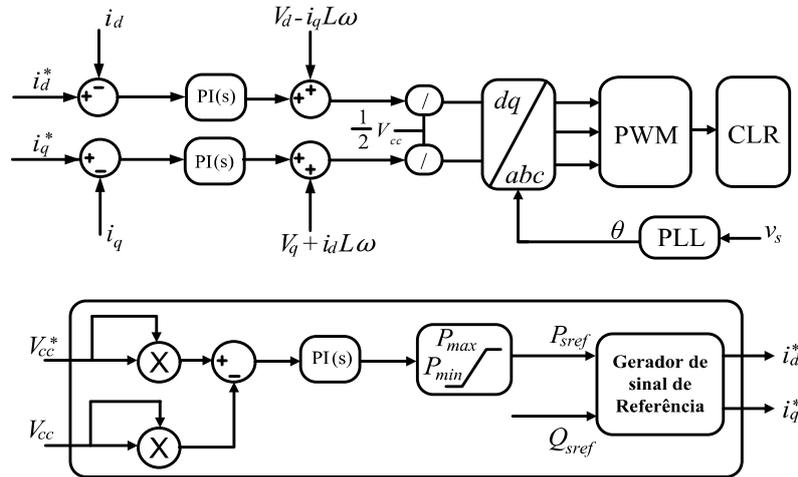


Figura 3 – Esquema de controle do conversor do lado da rede (CLR).

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Para analisar a técnica de controle proposta na Fig. 1, é utilizado o software de simulação computacional Matlab/Simulink®. O circuito analisado é formado pelo GSIP acoplado mecanicamente a uma turbina eólica, por dois conversores fonte de tensão conectados entre si por um elo de corrente contínua, chamado *back-to-back*, e uma fonte trifásica equilibrada representando a rede elétrica. Para o chaveamento dos conversores foi utilizado uma frequência de 15 kHz conforme Moreira (2019). Os outros parâmetros utilizados na implementação do sistema proposto são listados na Tab. 1 (Ferreira, 2011).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação do sistema de geração de energia eólica.

PARÂMETROS	VALORES
GSIP: $R_s, L_s, \lambda_m, P_{nom}, V_{LL}$, frequência, p	2,895Ω, 8,5mH, 0,175Wb, 12kW, 380V, 60Hz, 8 polos
CLR: R, L, C	5Ω, 10mH, 9000μF
Rede Elétrica: V_{LL} , frequência	380V, 60Hz

A análise da operação do GSIP é feita para diferentes excitações no enrolamento de armadura, a partir da corrente de eixo-q, verificando o comportamento de suas correntes trifásicas e da potência entregue a rede elétrica. Também é incluída a variação da velocidade do gerador para mostrar um sistema mais realístico.

De acordo com o controle vetorial no CLR, a resposta das potências ativa e reativa entregues à rede elétrica (Fig. 4) é estabelecida de acordo com a potência gerada pelo GSIP, sendo a potência reativa regulada em zero. A potência ativa é controlada para sua potência nominal de 12kW e, após um curto período de tempo decaí para aproximadamente 8 kW, suprindo assim uma potência abaixo de sua capacidade nominal de operação.

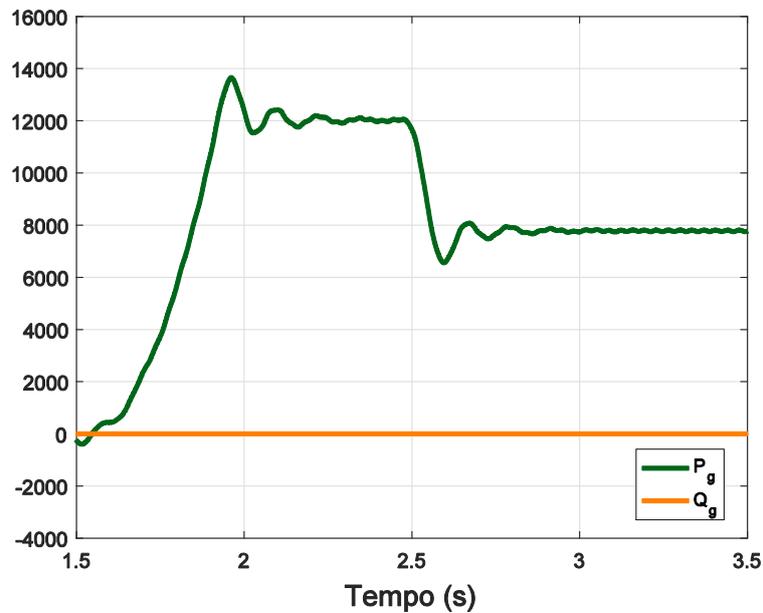


Figura 4 – Resposta das potências ativa e reativa entregues à rede elétrica.

A Fig. 5 mostra a tensão e a corrente da rede elétrica na fase A para exemplificar que não há defasamento angular entre elas, uma vez que a potência reativa é nula. Deste modo, o fator de potência é mantido unitário, logo, somente potência ativa é injetada na rede elétrica. A corrente na fase A apresenta valores de pico de aproximadamente 25 A para o GSIP fornecendo sua potência nominal, e de 17 A quando o sistema de energia eólico fornece 8 kW.

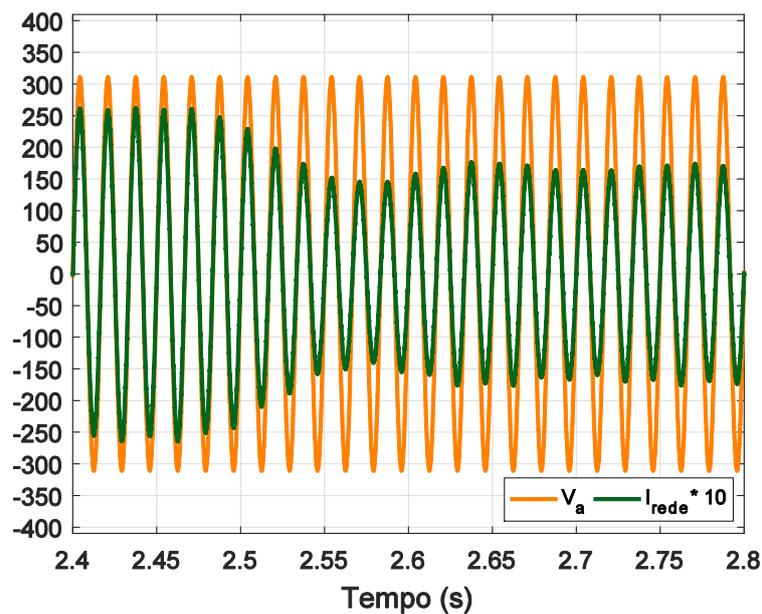


Figura 5 – Resposta das potências ativa e reativa entregues à rede elétrica.

A Fig. 6 apresenta a resposta do controle de tensão do elo CC, em que a tensão (V_{cc}) é regulada em 800 V de acordo com sua referência (V_{cc}^*) adotada no controle do conversor do lado da rede. Inicialmente, a tensão do elo CC é carregada até alcançar a tensão de pico de linha de aproximadamente 537 V e, em um tempo de 500 ms, é estabelecida uma referência em rampa para a regulação em 800 V.

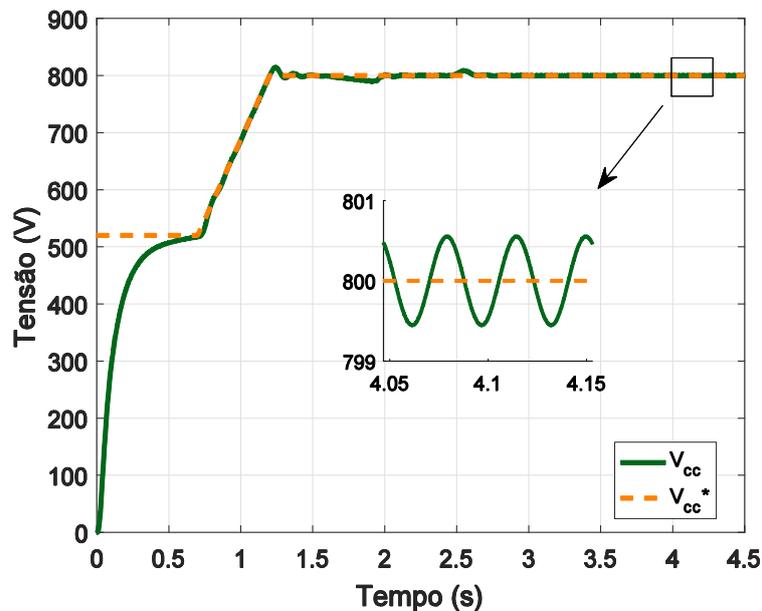


Figura 6 – Resposta do controle de tensão do elo CC.

A velocidade do gerador, Fig. 7, apresenta variações para simular um sistema mais próximo do real. Com a regulação da velocidade de 800 rpm para a sua velocidade nominal de 900 rpm, o sistema não apresentou nenhum sobressinal, assim como de 900 rpm para 850 rpm. As formas de ondas obtidas, nas Figuras 4 e 6, se mantiveram estáveis mesmo com estas variações de velocidade do gerador.

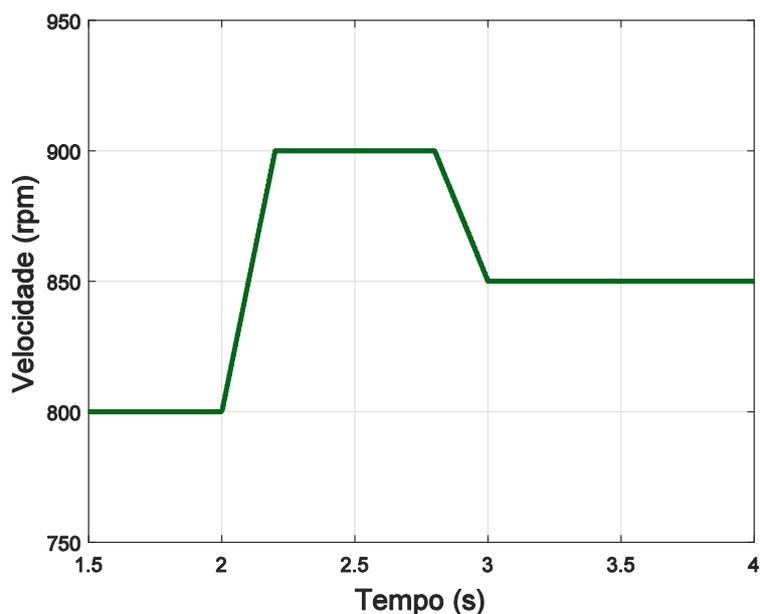


Figura 7 – Velocidade do gerador.

Com o controle vetorial do CLG realizado em dq, a corrente de eixo direto (i_{sd}) é mantida em zero, conforme sua referência (i_{sd}^*), e o eixo em quadratura é utilizado para controlar toda a corrente do estator do gerador, conforme é observado na Fig. 8. A corrente de eixo-q (i_{sq}) rastreia sua referência (i_{sq}^*), sendo que para uma corrente de 52 A o GSIP fornece potência nominal e, para uma corrente de 42 A entrega à rede elétrica uma potência de aproximadamente 8 kW.

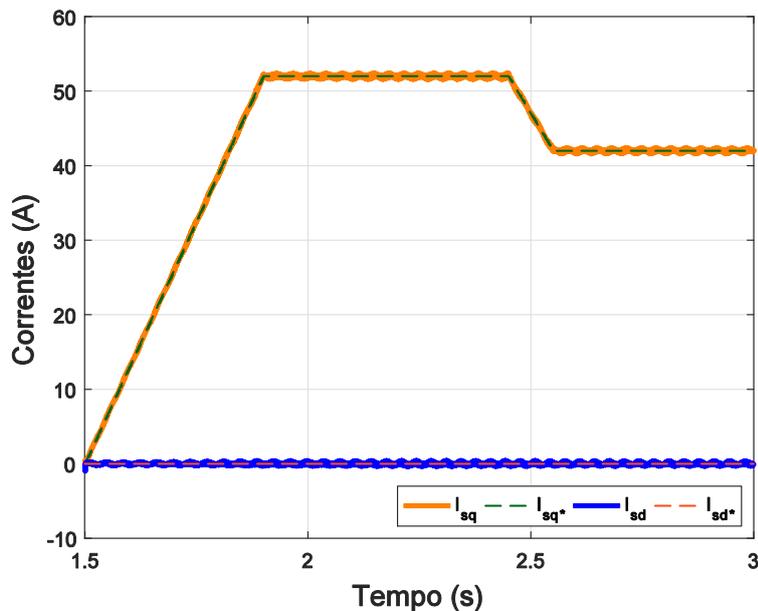


Figura 8 –Formas de onda das correntes do CLG no eixo dq.

As correntes trifásicas do estator do gerador síncrono de ímãs permanentes (Fig. 9) são proporcionais a corrente do eixo-q e possuem a mesma amplitude de i_{sq} , uma vez que a transformada dq aplicada foi de invariância em amplitude. Assim, a amplitude das correntes trifásicas é a mesma da corrente do eixo-q, e variam na mesma intensidade que se muda a corrente do eixo em quadratura.

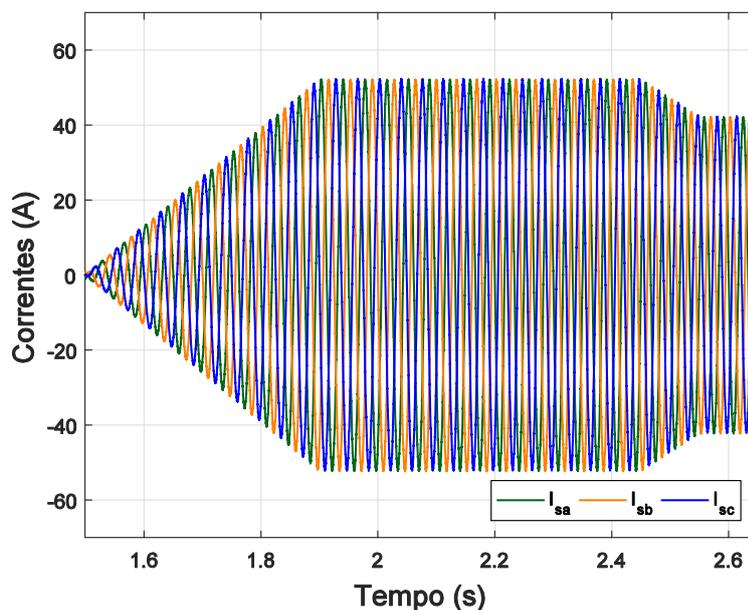


Figura 9 –Formas de onda das correntes trifásicas do CLG.

O conteúdo harmônico da corrente da rede elétrica foi analisado para os dois cenários distintos de fornecimento de potência elétrica, no entanto, como não há carga não linear conectada ao PAC, a distorção sofrida pela corrente da rede será devido ao chaveamento dos conversores fonte de tensão. Na Fig. 10 é apresentada a DHT de 0,9 % para uma potência de 12 kW em uma velocidade do gerador de 900 rpm. Já na Fig. 11 é mostrado a DHT de 1,4 % para uma potência de 8 kW sob uma velocidade de operação de 850 rpm.

É possível verificar que para maiores potências têm-se maiores correntes fundamentais, já que a tensão da rede é fixa, assim, a componente fundamental da corrente será maior resultando em uma DHT menor. É observado que estes valores de distorções harmônicas estão de acordo com os padrões internacionais para geradores conectados à rede de baixa tensão (IEEE, 1991).

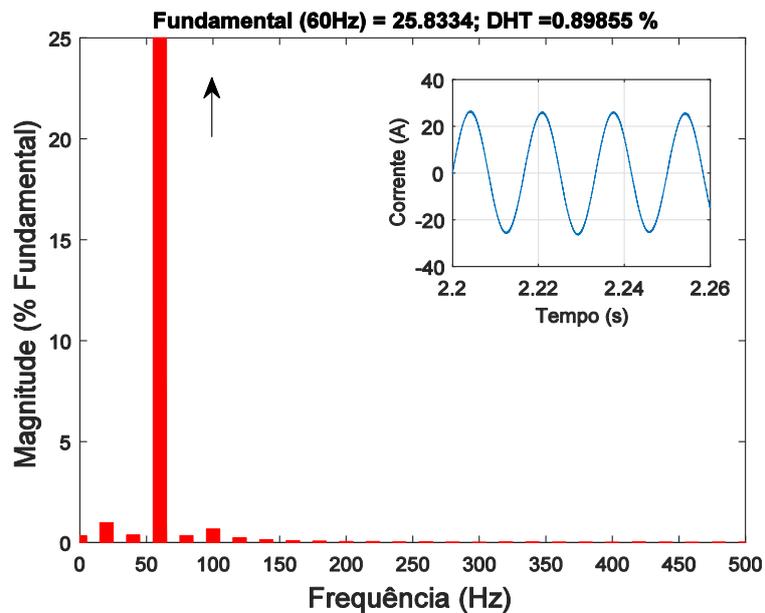


Figura 10 – Espectro harmônico da corrente da rede elétrica para uma velocidade de 900 rpm do gerador e 12 kW potência entregue à rede.

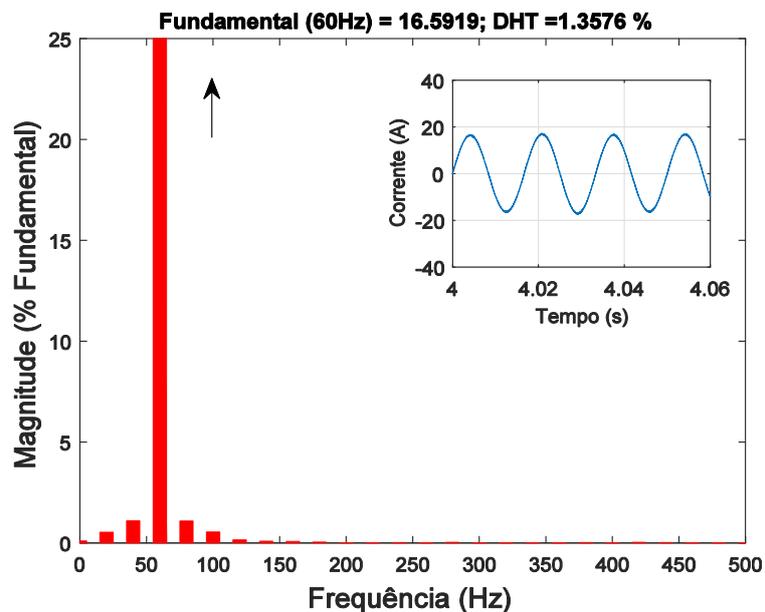


Figura 11 –Espectro harmônico da corrente da rede elétrica para uma velocidade de 850 rpm do gerador e 8 kW potência entregue à rede.

4. CONCLUSÕES

Este artigo investiga um sistema de geração de energia eólica com o GSIP operando em sua condição nominal de potência de 12 kW e suprindo uma potência de 8 kW. É feita a análise da operação do sistema proposto para variações na velocidade no eixo do gerador, observando o comportamento da tensão elo CC e da potência entregue à rede elétrica.

Foi verificado que o controle vetorial do CLR mantém o fator de potência unitário, uma vez que não injeta potência reativa no PAC. Foi analisada a DHT da corrente da rede elétrica para a variação da potência gerada pelo GSIP. Para a potência e velocidade nominal do gerador, a corrente da rede apresentou uma DHT de 0,9 % e, para uma potência suprida à rede de 8 kW sob uma velocidade de 850 rpm, a DHT da corrente da rede foi de 1,4 %. Estes níveis de distorções causadas na corrente se devem ao chaveamento dos conversores e estão de acordo com os padrões internacionais.

As potências injetadas no PAC e no elo CC permaneceram estáveis quando a potência gerada e a velocidade do gerador foram variadas. Deste modo, a técnica de controle empregada por meio da orientação do fluxo rotórico no eixo-d no CLG, e o algoritmo empregado no controle do CLR por meio da orientação do vetor tensão da rede elétrica, mostraram-se satisfatórios para o sistema de geração de energia eólica conectado à rede elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FUNCAP pelo apoio financeiro (processo BP3-0139-00022.01.00/18).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Ejlali and D. Arab khaburi, "Power quality improvement using nonlinear-load compensation capability of variable speed DFIG based on DPC-SVM method," *The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014)*, Tehran, 2014, pp. 280-284.
- A. B. Moreira, T. A. S. Barros, V. S. C. Teixeira, P. S. F. NASCIMENTO, E. Ruppert, "Metodologia e projeto de controle de potências para geração eólica e filtragem de corrente harmonica com gerador de indução duplamente alimentado" In: CBA2016 – XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016, Vitória-ES. CBA2016 – XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016
- A. B. Moreira, T. A. D. S. Barros, V. S. D. C. Teixeira, R. R. D. Souza, M. V. D. Paula and E. R. Filho, "Control of Powers for Wind Power Generation and Grid Current Harmonics Filtering From Doubly Fed Induction Generator: Comparison of Two Strategies," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 32703-32713, 2019.
- Amirnaser Yazdani, R.I., 2010. *Voltage-Source Converters in Power Systems - Modeling, Control, and Applications*, WILEY IEEE.
- FERREIRA, Abel António, "Sistema de produção de energia eólica," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Dissertação, 2011.
- GHOSH, S., Saha, P., Panda, G., Wind Energy Conversion System Connected With Grid Using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 4, Issue 1, 2015
- H. B. Mahdhi, H. B. Azza and M. Jemli, "Direct Power Control of a PMSG in Wind Power Conversion System under Faulty Rectifier Conditions," *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia, 2019, pp. 394-398
- Hossam H.H. Mousa, Abdel-Raheem Youssef, Essam E.M. Mohamed, Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 108, 2019, Pages 218-231.
- IEEE, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System Project IEEE-519.," 1991.
- K. Bunjongjit and Y. Kumsuwan, "Performance enhancement of PMSG systems with control of generator-side converter using d-axis stator current controller," *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, 2013, pp. 1-5.
- Minh et al. H. Q., "A new MPPT method for stand-alone wind energy conversion system," In *Proc. of the 2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications*, pp. 335-340, Newcastle upon Tyne, UK, 2012..
- Patil, N. S. e Bhosle, Y. N., "A review on wind turbine generator topologies," *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, Sri Ranganalatchum Dindigul, 2013, pp. 625-629.
- S. Varadarajan and S. K. Kottayil, "Active power control in grid connected wind driven PMSG," *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, Bangalore, 2016, pp. 1-5.
- V. K. Sharma and L. Gidwani, "Performance Analysis of PMSG for Wind Turbine Using Optimum Torque Control and D-Axis Current Control," *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, JAIPUR, India, 2018, pp. 1-5
- X. Yingcheng, T. Nengling. Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine, *Renew Energy*, 11 (2011), pp. 1671-1677
- Y. Mu, Z. Lu, Y. Qiao and K. L. Lo, "Optimized active power control of DFIG wind farm," *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, London, 2012, pp. 1-5
- Zarkov, Z. e Demirkov, B., "Power control of PMSG for wind turbine using maximum torque per ampere strategy," *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, 2017, pp. 292-297

WIND POWER GENERATION FROM PERMANENT MAGNETIC SYNCHRONOUS GENERATOR CONNECTED TO THE GRID

Abstract. This paper analyzes the behavior of a wind power system when subjected to the power variation produced in the generation. The connection of distributed generation systems to the electric grid poses challenges in the control of power generated, since all load demand must be fully met. In this sense, power control is proposed in a wind power generation system using a variable speed with permanent magnet synchronous generator (PMSG). Active and reactive powers are controlled in the machine side converter (MSC) by the stator flux oriented in d-axis. In the grid side converter (GSC) the power injected in the grid is controlled by the synchronism between the grid voltage and the current produced by GSC. System structure consists of a PMSG with 12kW of nominal generation capacity, connected via an AC / DC converter to a DC link, which in turn is connected to the grid by a DC / AC converter. In this scheme, the CLR is used to control the DC link voltage and currents delivered to the common coupling point (PCC). The simulations results allow to infer that the technique used in the control of power system analyzed was satisfactory for the generation of wind power delivered to the grid.

Key words: *GSC, PMSG, Power Control.*