MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE VELOCIDADE DE GERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADOS NO ATP-EMTP

Maria Valéria Limeira da Costa Almeida Clemente[1], Adriano Aron Freitas de Moura[2], Ednardo Pereira da Rocha[2], Victor de Paula Brandão Aguiar[2], Daniel Carlos de Carvalho Crisostomo[3], Olympio Cipriano da Silva Filho[2]

[1]Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil
(eng.valerialimeira@gmail.com)
[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil
[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Caraúbas, Brasil

Resumo: A constante demanda por fontes alternativas de energias renováveis vem fazendo com que a participação da geração eólica na matriz energética nacional cresça a cada dia, assim como a necessidade de estudos para o avanço dessa tecnologia. Desse modo, este trabalho apresenta a modelagem, simulação e controle da velocidade de Geradores de Indução Duplamente Alimentados (DFIG) utilizando o software ATP-EMTP. O principal objetivo é validar a capacidade do ATP-EMTP na simulação de sistemas eólicos utilizando o DFIG sob diferentes condições de operação, demonstrando a eficácia do controle vetorial implementado para variar a velocidade do rotor de acordo com a velocidade do vento. São apresentados os resultados através de gráficos e comparados com outros trabalhos que realizaram a pesquisa utilizando outros softwares para validar a aplicação do ATP-EMTP para esse tipo de sistema.

Palavras-chave: Energia eólica; ATP-EMTP; DFIG; controle vetorial; velocidade variável.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a necessidade por fontes de energia limpa cresceu no mundo todo e a participação da energia eólica se destacou nesse crescimento. No Brasil, a energia eólica vem ocupando um espaço significativo na matriz energética, principalmente devido à necessidade de reduzir o uso de combustíveis fósseis, incentivos governamentais, maiores investimentos e avanços na tecnologia. Em 2023, o segundo lugar, com 95,8 TWh de capacidade instalada, ficando atrás apenas da hidráulica. Nesse período o aumento foi de 17,4% (EPE, 2024).

A energia eólica é a energia gerada através do vento. A turbina eólica é o equipamento responsável por converter a energia cinética do vento em energia mecânica, que é entregue ao rotor do gerador e transformada em eletricidade (Pinto, 2014). Os geradores mais utilizados nos sistemas eólicos da atualidade são os Geradores de Indução Duplamente Alimentados (DFIG), eles se destacam principalmente pela possibilidade de realizar o controle das potências ativas e reativas de forma independente através de um controlador conectado ao rotor da máquina, permitindo o controle da velocidade de rotação do rotor (Blaabjerg e Ma, 2017).

As turbinas eólicas são constituídas basicamente por três partes principais: o rotor, que é formado pelas pás e cubo e são responsáveis por converterem a energia cinética do vento em mecânica, o gerador, que transforma a energia mecânica em elétrica, e a torre, que realiza a elevação e sustentação da turbina na altura ideal (Pinto, 2014).

A configuração do DFIG é dada pelo estator conectado diretamente à rede elétrica e o rotor é conectado à rede através de um conversor *back-to-back*, que é formado por dois conversores o do lado da máquina (CLM e o conversor do lado da rede (CLR), sua modelagem é realizada no

referencial dq (transformada de Park) para representar dinamicamente o rotor e o estator.

O controle do conversor é realizado utilizando estratégias de controle vetorial, que são baseadas na orientação de fluxo do estator e linearização do modelo, de forma a facilitar o projeto de malhas de controle e manter o desempenho estável mesmo com variações de vento (Rocha, 2023).

O ATP-EMTP é um software gratuito e muito poderoso, utilizado para simular transitórios eletromagnéticos em sistemas complexos. Apesar da sua capacidade, a aplicação do ATP-EMTP para modelagem do DFIG ainda é pouco explorada na literatura científica.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo realizar a modelagem, simulação e controle de velocidade de um DFIG utilizando o ATP-EMTP, e assim validando a utilização deste software para os modelos matemáticos, além de avaliar o comportamento dinâmico do sistema sob diferentes condições operacionais. Assim, busca-se contribuir para um aumento dos estudos sobre o ATP-EMTP, enriquecendo a bibliografia existente.

MATERIAL E MÉTODOS

As etapas da pesquisa foram conduzidas de forma sequencial, iniciando com a modelagem matemática do sistema. Em seguida, foi implementado o controle de velocidade por meio da malha de controle, e, por fim, foram realizadas simulações no software ATP-EMTP, considerando os diferentes modos de operação.

A modelagem do sistema de geração foi realizada em partes, primeiramente, modelou-se a turbina eólica, em seguida, o DFIG com os seus conversores, apresentado na Figura 1, e por último, a rede elétrica, onde foi utilizado uma fonte trifásica, um transformador, uma linha de transmissão e uma carga.

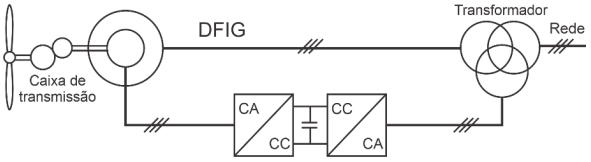


Figura 1. Componentes de uma turbina eólica com DFIG.

Para a modelagem da turbina, utiliza-se a Equação (1) para representar a potência mecânica extraída do vento levando em consideração os diversos fatores que influenciam na captação da energia dos ventos (Abu-Rub et al., 2014).

$$P_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 v^3 C_p \quad (1)$$

Onde, Pt (W) é a potência extraída do vento, ρ (kg/m3) é a densidade do ar, πR2 (m2) é a área varrida pelas pás do aerogerador, υ (m/s) é a velocidade do vento e Cp é o coeficiente de potência. O torque mecânico da turbina é a razão entre a potência mecânica e a velocidade angular (ω).

A modelagem matemática do DFIG foi realizada utilizando coordenadas espaciais, através das transformadas de Clarke e Park, que convertem as coordenadas trifásicas estacionárias abc em duas coordenadas αβ (estacionária) e dq (girantes), respectivamente. Com essas transformadas é possível linearizar as equações diferenciais para simplificar os cálculos e o controle (Araújo, 2018).

Assim, tem-se as Equações (2), (3), (4) e (5) que representam as tensões do estator e do rotor, respectivamente, deduzidas a partir da lei das malhas de Kirchhoff e transformadas para o quadro de referência dq (Rocha, 2023). Neste referencial, a velocidade de rotação dos eixos é igual a velocidade síncrona da máquina, e o eixo d é alinhado ao vetor de fluxo do estator (Abu-Rub et al., 2014).

As Equações (6), (7), (8) e (9) descrevem os fluxos magnéticos do estator e do rotor em função das correntes e das indutâncias próprias e mútuas. Onde, v é a tensão, i é a corrente, R a resistência, λ é o fluxo, L é a indutância, os índices d e q representam as componentes no quadro de referência dq, os índices r e s representam, respectivamente, o rotor e o estator, L_m é a indutância de magnetização, ω é a velocidade angular síncrona e ω_r é a velocidade angular do rotor.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega\lambda_{qs} + \dot{\lambda}_{ds} \quad (2)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega\lambda_{ds} + \dot{\lambda}_{qs} \quad (3)$$

$$v_{dr} = -R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r)\lambda_{qr} + \dot{\lambda}_{dr} \quad (4)$$

$$v_{qr} = -R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r)\lambda_{dr} + \dot{\lambda}_{qr} \quad (5)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} - L_m i_{qr} \quad (6)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{dr} \quad (7)$$

$$\lambda_{dr} = L_s i_{dr} + L_m i_{qs} \quad (8)$$

$$\lambda_{qr} = L_s i_{qr} - L_m i_{ds} \quad (9)$$

Obtendo a tensão do rotor em função das correntes do rotor e fluxo do estator, assumindo que a queda de tensão na resistência do estator é pequena e que o fluxo do estator é constante, pois o estator está conectado na rede CA, é possível utilizar um controlador para a corrente de cada eixo dq do rotor.

Para realizar o controle da velocidade foram implementados alguns métodos de controle: o controle vetorial, o proporcional integral (PI) e a modulação por largura de pulso senoidal (SPWM).

No ATP-EMTP o controle vetorial é realizado no referencial dq, a velocidade do rotor é ajustada com base no torque e no fluxo (Teixeira, 2012). O controlador PI compara os valores de referência com os medidos obtendo o erro, já o SPWM realiza os chaveamentos dos conversores CLM e CLR, melhorando a resposta dinâmica do sistema.

O controle de cada conversor é realizado de forma independente. O CLM realiza o ajuste do torque, da velocidade e compara os reativos presentes no estator (Rocha, 2018). Ele utiliza duas malhas de controle, a malha interna, que controla as correntes, e a malha externa, que controla a potência reativa e o torque da máquina.

O diagrama de controle do CLM está apresentado na Figura 2. Através do controle vetorial foram obtidas as tensões do rotor do CLM, apresentadas nas Equações (10) e (11), onde observa-se que é possível controlar as correntes do rotor utilizando um controlador para cada componente da corrente.

$$V_{dr} = -R_r I_{dr} + \sigma L_r i_{qr} \omega + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} \quad (10)$$

$$V_{qr} = -R_r I_{qr} - i_{dr} \omega \sigma L_r + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \left(\omega - \omega_r\right) \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{V_s}{\omega}\right) \quad (11)$$

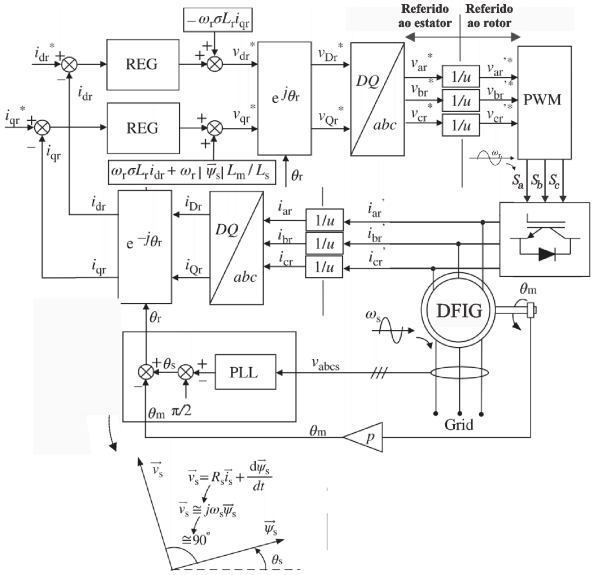


Figura 2. Diagrama conversor do lado da máquina.

A malha de controle da corrente do rotor do eixo direto e do eixo em quadratura, é apresentada na Figura 3, essa malha busca manter a velocidade do rotor sempre próxima do ponto de máxima extração de potência mesmo diante de diferentes velocidades de vento. Observa-se que ao escolher ganhos iguais e utilizar os termos cruzados, a função de transferência de ambos os eixos se tornam iguais (Abu-Rub et al., 2014). Utilizando a ferramenta do lugar geométrico das raízes, foi possível obter os ganhos proporcional e integral do controlador PI.

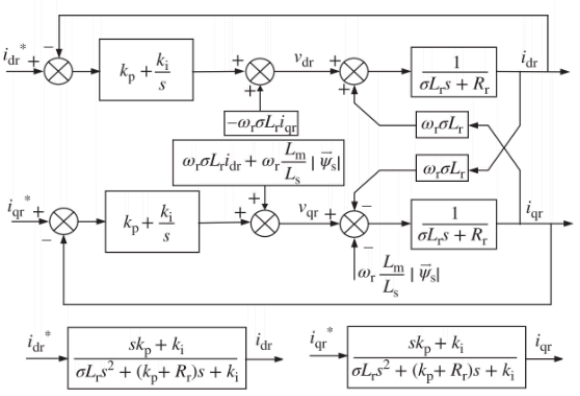


Figura 3. Malha de controle interna de corrente do conversor do lado da máquina.

Na malha de controle da velocidade, apresentada na Figura 4, tem-se uma velocidade de referência na entrada, que é comparada com a medida, o erro é processado pelo controlador PI, gerando uma corrente de referência do eixo em quadratura que controla o torque.

O torque simplificado, Equação (12), foi obtido através do controle orientado da tensão (VOC),

alinhando o eixo d com a tensão do estator, já que o estator da máquina é conectado diretamente a rede elétrica e consequentemente a sua tensão e frequência são constantes (Rocha, 2018).

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{PL_m}{\omega_s L_s} v_{ds} i_{qr} \quad (12)$$

Como é possível observar na Equação (12), o torque é proporcional a componente q da corrente, logo, é possível realizar o controle da velocidade através de iqr.

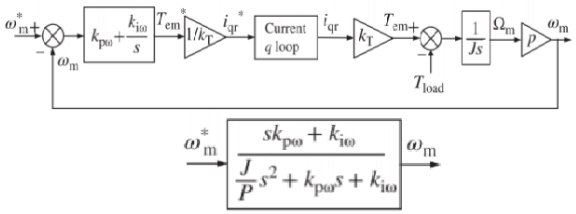


Figura 4. Malha de controle externa de velocidade do conversor do lado da máquina.

O controle do conversor do lado da rede é utilizado para regular a tensão do barramento CC e equilibrar o fator de potência da rede através da compensação dos reativos. A malha de controle do CLR, apresentada na Figura 5, se dá inicialmente pela extração do ângulo de fase da tensão da rede, através de um SRF-PLL (Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop).

As tensões são convertidas utilizando a transformada de Park, Equações (13) e (14), em seguida, processadas pelo controlador PI e então, enviadas para realizar o acionamento do SPWM. As potências ativa e reativa, estão apresentadas nas Equações (15) e (16), respectivamente, onde é possível observar que a componente direta da corrente do rotor controla a potência ativa, enquanto a componente em quadratura controla a potência reativa do estator.

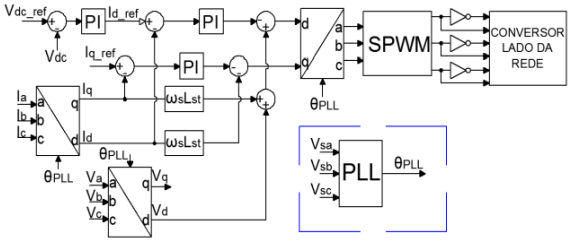


Figura 5. Malha de controle do conversor do lado da rede.

$$V_{dg} = V_{dt} + R_g i_d + L\frac{di_d}{dt} - \omega L i_q \quad (13)$$

$$V_{qg} = V_{qt} + R_g i_q + L\frac{di_q}{dt} - \omega L i_d \quad (14)$$

$$P_s = \frac{3}{2}\left(v_{ds} i_{ds}\right) \quad (15)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2}\left(v_{ds} i_{qs}\right) \quad (16)$$

A simulação foi realizada no ATP-EMTP (*Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program*) na versão 7.5, que é um software gratuito muito utilizado para simulações de transitórios em sistemas de potência, principalmente devido a sua precisão e confiabilidade numérica das simulações. Apesar da sua capacidade de simulação, as bibliografias que abordam esse software ainda são escassas.

A utilização do ATP-EMTP permite que o DFIG seja implementado de forma bem próxima a realidade, já que ele comporta tanto o circuito elétrico complexo quanto os sistemas mecânicos da turbina. A montagem da simulação se deu através da montagem de blocos equivalentes para representar o circuito do estator e rotor, utilizando a ferramenta MODELs para a criação dos componentes que o *software* não disponibiliza, e de alguns componentes presentes na biblioteca do ATP-EMTP.

A configuração da simulação foi realizada de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1. A simulação foi realizada considerando o gerador operando nos modos subsíncrono e supersíncrono, onde foram analisadas as respostas do sistema a diferentes velocidades de vento.

Observa-se que a corrente de referência do eixo em quadratura, na Tabela 1, não possui um valor exato, sendo determinada pela Equação (17), isso se deve pelo fato dessa corrente depender do torque de referência que varia de acordo com a variação da velocidade.

Tabela 1. Parâmetros de simulação do DFIG.

Parâmetros do DFIG	Valores
Potência da Turbina	1 MW
Número de Polos	4
Tensão CC	1800 V
frequência	60Hz

Indutância do estator	0,0795 mH
Resistência do rotor	0,0022 Ω
Indutância do rotor	0,146 mH
Resistência do estator	0,0022 Ω
Indutância de magnetização	3,66 mH
Escorregamento (subsíncrono)	10%
Escorregamento (supersíncrono)	-2,5%
Corrente de referência eixo d	0 A
Corrente de referência eixo q	Equação (17)
Velocidade angular de referência subsíncrono	128,71 rad/s
Velocidade angular de referência supersíncrono	200 rad/s

$$i_{qref} = \frac{2}{3}\frac{T_{ref}}{p}\frac{L_s 2\pi f}{L_m v_{ds}} \quad (17)$$

Com base nos dados obtidos, foram realizadas análises avaliando a resposta dinâmica do sistema, utilizando indicadores de desempenho como erro em regime permanente, estabilidade, tempo de resposta e eficiência.

Os resultados foram apresentados através de gráficos gerados no software PlotXWin, integrado ao ATP-EMTP. Dessa forma, foi possível analisar o comportamento de diferentes parâmetros elétricos do sistema como tensões e correntes no estator e rotor, a velocidade do rotor e o torque eletromagnético ao longo do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados da simulação realizada, a partir da análise gráfica e comparação com os resultados esperados para essa simulação. O diagrama do sistema implementado no ATP-EMTP está mostrado na Figura 6.

O tempo de simulação considerado para as análises foi de 20 segundos e os ganhos do controlador PI escolhidos, para ambos os modos de operação do gerador, que resultaram em uma melhor resposta do sistema, estão apresentados na Tabela 2.

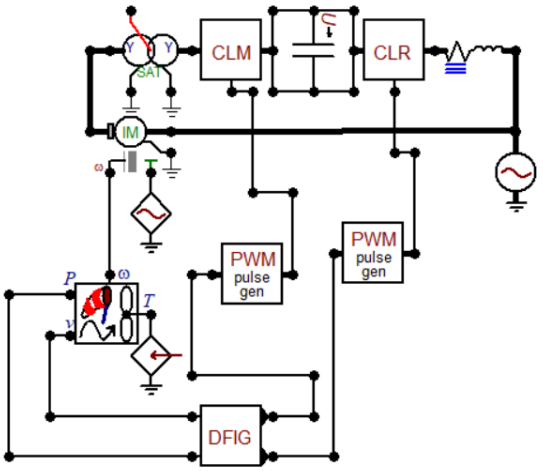


Figura 6. Diagrama do sistema implementado no ATP-EMTP.

Tabela 2. Parâmetros do controlador PI.

Parâmetro	Valor
Kp	10000
Ki	10000

Foram realizadas duas simulações com velocidades de vento diferentes, nos modos de operação subsíncrono e supersíncrono. A tabela 3 apresenta os valores de velocidades de vento consideradas em cada simulação e os principais resultados obtidos através dos indicadores de desempenho.

Tabela 3. Principais resultados da simulação.

Modo de operação	Slip (%)	Velocidade de vento (m/s)	Tempo de acomodação (s)	Erro (%)
Sub síncrono	10	9	4	~0,2

Super síncrono	-20	10	3	~0,0

As Figuras 7 e 8 apresentam os gráficos do desempenho do controle de velocidade do rotor nos modos subsíncrono e supersíncrono, respectivamente.

A curva vermelha indica a velocidade do rotor, enquanto a verde indica a velocidade de referência. Observa-se que, por volta dos 4 segundos, o sistema atinge o regime permanente, o que demonstra a efetividade do controle implementado em estabilizar a velocidade.



Figura 7. Desempenho do controle de velocidade no modo subsíncrono.

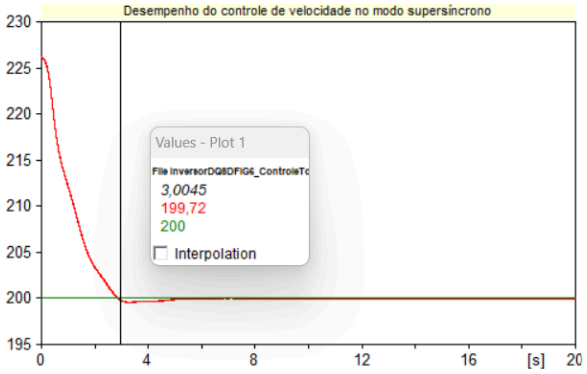


Figura 8. Desempenho do controle de velocidade no modo supersíncrono.

Os gráficos do torque em cada modo de operação, são apresentados nas Figuras 9 e 10, neles é possível observar as oscilações iniciais, quando o rotor está em processo de sincronia com a velocidade de referência.

Após o transitório, em regime permanente, o torque se estabiliza, acompanhando a demanda de manter a velocidade do rotor constante independente das variações do vento. O comportamento do torque demonstra que o controle vetorial funcionou corretamente, já que nenhum pico é detectado durante o regime permanente.

A potência ativa gerada pela turbina no modo subsíncrono e supersíncrono, estão apresentadas nas Figuras 11 e 12, observa-se que a potência ativa no modo subsíncrono é menor do que no supersíncrono, porém isso já era esperado, pelo fato de que no modo subsíncrono o gerador consome uma parte da energia mecânica pelo escorregamento, já no supersíncrono toda a energia mecânica é convertida em elétrica.

Por tanto, os gráficos da potência ativa, estão condizentes com o esperado, acompanhando as variações da velocidade e do torque, mantendo a geração de acordo com a potência de referência.

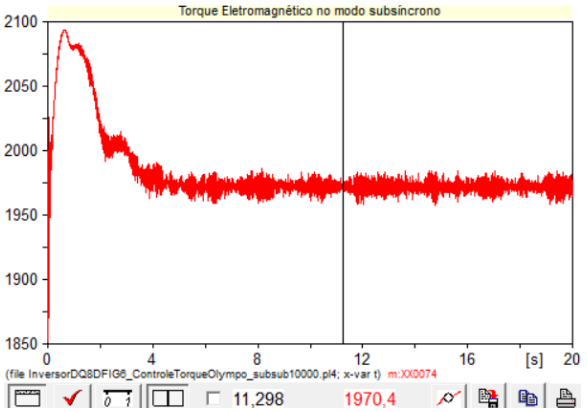


Figura 9. Torque eletromagnético no modo subsíncrono.

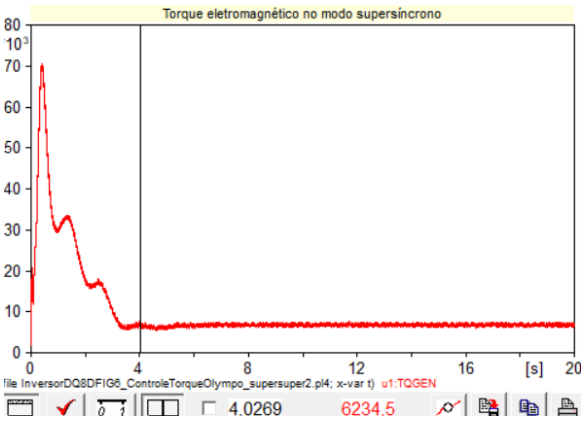


Figura 10. Torque eletromagnético no modo supersíncrono.

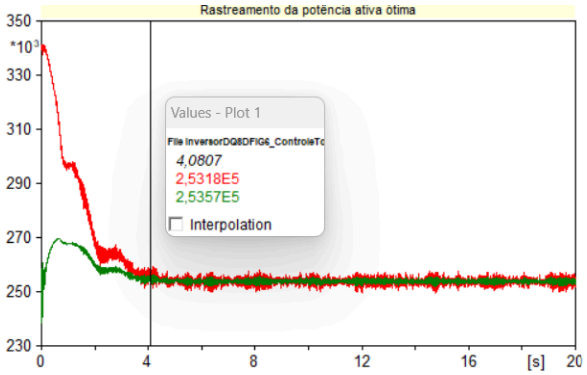


Figura 11. Rastreamento da potência ativa ótima no modo subsíncrono.

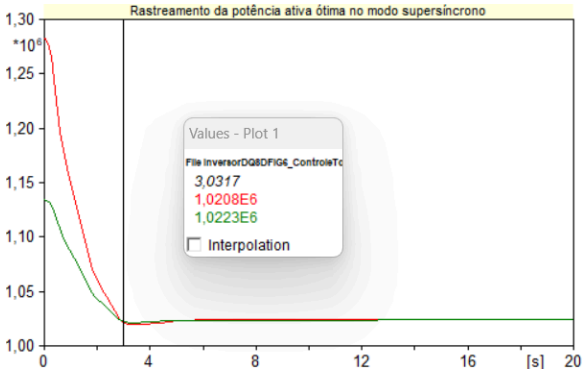


Figura 12. Rastreamento da potência ativa ótima no modo supersíncrono.

A partir da análise realizada foi possível observar que o sistema apresentou um desempenho satisfatório, com o tempo de acomodação relativamente baixo e erro em regime permanente inferior a 1% em relação à velocidade de referência.

Logo, demonstrou-se a eficácia do controle vetorial implementado, em ajustar a velocidade e a potência ativa de forma precisa, mantendo os valores próximos a referência adotada. Assim, foi possível validar a aplicabilidade do ATP-EMTP para a simulação dinâmica de sistemas com Geradores de Indução Duplamente Alimentados (DFIG), evidenciando a sua robustez no controle de sistemas de geração eólica.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a modelagem, simulação e controle de velocidade de Geradores de Indução Duplamente Alimentados (DFIG) utilizando o ATP-EMTP. O modelo foi implementado no software, onde foi possível analisar a operação dinâmica do DFIG nos modos subsíncrono e supersíncrono.

Os gráficos obtidos demonstraram a eficiência do modelo utilizado para o controle da velocidade. Os indicadores de desempenho analisados obtiveram resultados satisfatórios, com tempo de acomodação de aproximadamente 4 segundos para ambos os modos de operação e erro em regime permanente menor que 0,5%.

Dessa forma, foi validada a aplicação do ATP-EMTP para simulação de sistemas eólicos com DFIG, se mostrando um software poderoso e de precisão. Esse trabalho contribui para o fortalecimento da literatura técnica, aumentando as aplicações do ATP-EMTP em sistemas de potência e controle.

Como trabalhos futuros, sugere-se a alteração dos ganhos do controlador PI de forma a otimizar e refinar o desempenho e resposta do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a pesquisa e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) por todo o apoio técnico e acadêmico..

REFERÊNCIAS

ABU-RUB, Haitham. MALINOWSKI, Mariusz. AL-HADDAD, Kamal. Power Electronics for Renewable Energy Systems, transportation and industrial applications. IEEE Press, United Kingdom, 2014.

ARAÚJO, Lucivando Ribeiro de. Análise do Comportamento do DFIG em uma Rede Elétrica Diante de Afundamentos de Tensão e Falhas Internas Utilizando Técnicas de Controle PI e LQI. 2018. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral, 2018.

BLAABJERG, Frede; MA, Ke. Wind Energy Systems. Proceedings of the IEEE, [S. l.], v. 105, n. 11, p. 2116-2131, 16 maio 2017. DOI 10.1109/JPROC.2017.2695485. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7927779. Acesso em: 20 jun. 2024.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Balanço Energético Nacional (BEN) 2024: Ano base 2023, 2024. Disponível em: https://ben.epe.gov.br. Acesso em: 14 jun. 2024.

PINTO, Milton de Oliveira. Fundamentos de Energia Eólica. LTC, Rio de Janeiro, 2014.

ROCHA, MARCO AURÉLIO. Modelagem e Controle de Gerador de Indução Duplamente Alimentado para Estudo de Sistema de Geração Eólica. 2018. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia

de Bauru (FEB) – UNESP, Bauru - SP, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6d951303-76b7-4e72-9da8-eddcdeacc137/content. Acesso em: 13 ago. 2024.

ROCHA, Yago da Silva Pires. Modelagem para Simulação em Regime Permanente e Dinâmico do DFIG no ATP- EMTP. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró - RN, 2023. DOI 10.21708/bdtd.ppgee.dissertacao.11576. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/items/4bf8f1d9-6052-4b90-a8cd-f75a38bc03fb. Acesso em: 27 maio 2024.

TEIXEIRA, Diego César Nogueira. Controle Vetorial Do Motor de Indução Operando na Região de Enfraquecimento de Campo. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: https://www3.dti.ufv.br/sig_del/consultar/download/91. Acesso em: 4 jul. 2024.