

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DINÂMICA DE UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG) SOB DESEQUILÍBRIOS DA REDE ELÉTRICA: MODELAGEM, CONTROLE E SIMULAÇÃO VIA ATPDRAW

Ediliane Simão da Silva¹, Adriano Aron Freitas de Moura², Ednardo Pereira da Rocha³, Victor de Paula Brandão Aguiar⁴, Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo⁵, Maria Valéria Limeira da Costa Almeida Clemente⁶

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil
(edilianesimao2@gmail.com)

²Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

³Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

⁴Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

⁵Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Caraúbas, Brasil

⁶Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

Resumo: O presente artigo realizou a análise do desempenho de um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) sob desequilíbrio de tensão, avaliando o uso de controladores PI no controle das correntes do rotor. Por meio de simulações no ATPDraw, ao longo da pesquisa modelou-se um DFIG com parâmetros reais, implementando filtros notch e transformações dq para controlar separadamente as componentes de sequência positiva e negativa. Os resultados demonstraram que o controle PI atenuou de forma eficiente as oscilações de dupla frequência, estabilizando as correntes do rotor em aproximadamente 5 segundos. A injeção de tensões de sequência negativa pelo conversor colaborou para manter a tensão do barramento CC estável em 1800V, em regime supersíncrono. Ao final do artigo, foi possível concluir que as estratégias adotadas garantem a estabilidade do DFIG em condições de desequilíbrio, sugere-se estudos futuros com técnicas de controle preditivo, para aprimorar o desempenho do sistema.

Palavras-chave: Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG); filtro notch; transformada dq ; desequilíbrio de tensão; ATPDraw.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por fontes de energias renováveis impulsionou o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e robustas para geração elétrica, conforme o balanço energético nacional de 2024, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), uma das áreas que mais se desenvolveu foi o sistema eólico de geração. Dentre os geradores aplicados nesse contexto, o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG – *Doubly Fed Induction Generator*) tem se destacado por sua capacidade de operar em velocidades variáveis e por permitir o controle independente da potência ativa e reativa, utilizando conversores que processam apenas uma fração da potência total gerada (Dantas, 2017). Essa característica torna o DFIG uma alternativa economicamente viável e energeticamente eficiente para parques eólicos conectados à rede elétrica.

No entanto, a operação do DFIG é suscetível a distúrbios na rede, principalmente aos afundamentos de tensão assimétricos, que podem gerar componentes de sequência negativa e zero no fluxo magnético do estator, resultando em sobretensões e sobrecorrentes no rotor, que podem comprometer a integridade dos conversores e da própria máquina (Dantas, 2017). Esses desequilíbrios causam oscilações indesejadas na potência gerada e podem acarretar degradação dos enrolamentos do estator devido ao aquecimento desigual das bobinas (Oliveira, 2017; Ribeiro Araújo, 2019).

Para minimizar esses efeitos, diversas estratégias de controle têm sido propostas. Dantas (2017) sugere o uso de estratégias baseadas em referências de corrente no rotor para eliminar oscilações da potência ativa durante o afundamento desbalanceado. Outra abordagem envolve o uso de controladores do tipo PI para rejeição de perturbações e para atenuação de

correntes de sequência negativa (Ribeiro Araújo, 2019). Além disso, técnicas mais avançadas, como controle vetorial acoplado ao ajuste dinâmico de tensão (Eltamaly et al. 2020), a compensação ativa da sequência negativa e os controladores preditivos baseados em modelos (Araújo, 2018), têm se mostrado promissoras no enfrentamento das limitações operacionais do DFIG sob condições de desequilíbrio de tensão.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a eficácia da aplicação de controladores PI no controle de correntes do rotor de um DFIG operando sob desequilíbrio de tensão na rede elétrica. Para, a partir de simulações, avaliar o desempenho do sistema na rejeição de distúrbios de sequência negativa, no rastreamento preciso das referências da corrente, na atuação efetiva da injeção de tensões de sequência negativa e na manutenção da estabilidade da tensão no barramento CC, garantindo assim a operação confiável do gerador mesmo em situações adversas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado por meio de pesquisas bibliográficas e simulações computacionais utilizando o software ATPDraw, com o objetivo de modelar, controlar e analisar a operação dinâmica de um sistema de geração distribuída empregando o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). Para isso, a estratégia utilizada ao longo do trabalho consiste na utilização de controladores PI de sequência negativa para equilibrar as correntes.

Assim, inicialmente, foram realizadas revisões bibliográficas focadas no princípio de operação do DFIG, suas aplicações em sistemas eólicos e estratégias de controle para mitigação de desequilíbrios de tensão. Com base nisso levantou-se os seguintes materiais sobre aprofundamentos e desbalanceamentos de tensões e controle dinâmico, para serem aplicados posteriormente para obtenção dos resultados.

Afundamentos de tensão do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)

O DFIG utiliza uma configuração com conversor back-to-back no rotor, o que permite o controle da potência ativa e reativa, mesmo em operação a velocidade variável (Teodorescu et al., 2011). Entretanto, essa estrutura também é sensível a afundamentos de tensão, principalmente aqueles desbalanceados, pois o estator é conectado diretamente à rede.

Durante essas falhas, surgem componentes de sequência negativa no fluxo do estator, induzindo correntes elevadas no rotor. Isso compromete a integridade do conversor e prejudica a estabilidade do sistema. A configuração back-to-back, embora

ofereça controle eficiente, precisa de proteção adicional, como o uso de circuitos de proteção, para limitar correntes e tensões a níveis seguros (Teodorescu et al., 2011)

As figuras (1) e (2) ilustram como diferentes configurações de conversores influenciam a operação do gerador durante esses eventos, destacando a importância de estratégia de proteção, como uso de circuitos de proteção, para garantir a estabilidade do sistema.

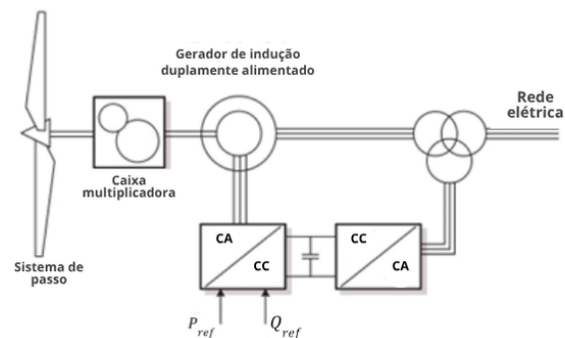


Figura 1. DFIG alimentado com conversores back-to-back conectados ao circuito do rotor.

Fonte: Teodorescu et al., 2011.

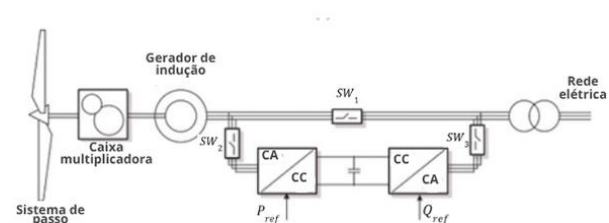


Figura 2. DFIG com conversores back-to-back conectados apenas em condições de meia potência ou para compensação de potência reativa. Fonte:

Teodorescu et al., 2011.

Controladores do DFIG em situação de desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão pode resultar em oscilações com o dobro da frequência da rede, tanto na potência ativa como reativa, afetando diretamente a estabilidade da rede; ainda, existe um aumento da tensão do rotor, que pode ultrapassar seu valor nominal para certos níveis de desequilíbrio de tensão, os quais comprometem a integridade do sistema (Oliveira, 2017). Além disso, de acordo com Ribeiro (2019), também, provoca-se diferença nas correntes do estator, levando a um aquecimento desigual das bobinas, podendo degradar a isolamento dos enrolamentos.



Assim, uma das estratégias propostas por Eltamaly et al. (2020) para minimizar os impactos do desequilíbrio de tensão no DFIG é a compensação ativa de sequência negativa, onde, por meio da injeção de corrente de sequência negativa diretamente pelo conversor do lado da rede (GSC) a estratégia visa diminuir as oscilações na potência ativa e reativa, mantendo o estator equilibrado e reduzindo efeitos adversos na rede.

Transformação de referencial das componentes

Para representar correntes e tensões em quadros síncronos de referência, Teodorescu et al. (2011) utilizou a transformação de Park. Em sistemas que operam com componentes de sequência positiva e negativa, essa transformação é aplicada com diferentes ângulos de referência, girando em sentidos opostos.

A equação (1) retirada do livro *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems* define a matriz de transformação de Park, usada para converter as correntes medidas do sistema trifásico abc para os quadros síncronos positivo e negativo.

$$[T_{dq+}] = [T_{dq-}]^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') \\ -\sin(\theta') & \cos(\theta') \end{bmatrix} \quad (1)$$

Essa transformação permite que as componentes de corrente no referencial girante assumam forma contínua (CC), facilitando o uso de controladores PI para regular correntes injetadas mesmo em condições assimétricas.

Correntes de sequência positiva e negativa

Como já dito anteriormente, em condições de desequilíbrio na rede elétrica, as correntes podem ser decompostas em componentes de sequência positiva, que representam um sistema trifásico equilibrado girando no sentido da rede, e de sequência negativa, que possuem rotação oposta e indicam desequilíbrios.

Assim, segundo Teodorescu et al. (2011), a estratégia mais usual para controlar essas componentes é através do uso de quadros de referência síncrono duplos (DSRF), cada um girando a $+\omega$ e $-\omega$, respectivamente. Contudo, essa abordagem introduz oscilações indesejadas em 2ω nas componentes dq, devido ao acoplamento cruzado entre os quadros, conforme demonstrado nas equações (2) e (3).

$$i_{dq}^+ = \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d^+ \\ \bar{i}_q^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{i}_d^- \\ \bar{i}_q^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i_{dq}^+ = I^+ \begin{bmatrix} \cos(\delta^+) \\ \sin(\delta^+) \end{bmatrix} + I^- \cos(\delta^-) \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) \\ -\sin(2\omega t) \end{bmatrix} + I^- \sin(\delta^-) \begin{bmatrix} \sin(2\omega t) \\ \cos(2\omega t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde a parcela que está sendo multiplicada pela corrente positiva (I^+) corresponde à corrente contínua, enquanto aquelas relacionadas à corrente negativa (I^-) são equivalentes a corrente alternada.

Assim, a mesma demonstração é aplicada às componentes de sequência negativa, resultando nas equações (4) e (5), que finalizam a separação e fundamentam o desenvolvimento do controle vetorial desacoplado.

$$i_{dq}^- = \begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d^- \\ \bar{i}_q^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{i}_d^+ \\ \bar{i}_q^+ \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$i_{dq}^- = I^- \begin{bmatrix} \cos(\delta^-) \\ \sin(\delta^-) \end{bmatrix} + I^+ \cos(\delta^+) \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) \end{bmatrix} + I^+ \sin(\delta^-) \begin{bmatrix} -\sin(2\omega t) \\ \cos(2\omega t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

O que varia é: a parcela que estão sendo multiplicadas pelas correntes negativas (I^-) serão os termos em corrente contínua.

Essas oscilações não são totalmente eliminadas por controladores PI, sendo assim, para mitigar esses efeitos, Teodorescu et al. Propõe o uso de filtros notch capazes de reduzir significativamente essas oscilações, aprimorando o desempenho do sistema de controle de corrente (Teodorescu et al., 2011).

Controle da corrente do rotor

Para lidar com as oscilações no referencial síncrono dq, Schmidlin Jr. Et al. (2019) propõe a separação das correntes em dq^+ e dq^- , onde, nesta abordagem, as correntes do rotor são separadas em componentes de sequência positiva (dq^+) e negativa (dq^-), então, controladores PI são aplicados a cada uma delas.

Ou seja, os controladores Proporcional-Integral (PI) são utilizados para controlar a corrente do sistema de geração, corrigindo os erros entre a referência desejada e a corrente real, ajustando dinamicamente o sinal de controle para minimizar os desvios (Oliveira et al., 2017). No caso do controle de sequência negativa, o controlador PI é aplicado para compensar os efeitos de desequilíbrio de tensão na rede elétrica (Barros et al., 2010). Em outras palavras, quando surgem componentes de sequência negativa, o controlador PI trabalha para eliminar essas oscilações, ajustando as correntes do rotor do DFIG de forma independente para as sequências positivas e negativas (Eltamaly et al., 2020).

Tratamentos dos harmônicos por meio da utilização de filtros notch

Para lidar com os harmônicos e ressonância, foram implementados filtros notch com função de transferência. De acordo com Liu (2017) sua função de transferência pode ser dada pela equação (6) mostrada abaixo.

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + 2\pi Bs + \omega_c^2} \quad (6)$$

Onde ω_c é a frequência característica do filtro, também chamada de frequência de rejeição, e B é a largura de banda. Ainda, o projeto de filtros notch envolve a determinação desses parâmetros com base nas frequências de ressonância subsíncrona. Assim, conforme Liu (2017), a equação do filtro notch pode ser definida como mostrada na equação (7):

$$H(s) = \frac{s^2 + (2\pi f_c)^2}{s^2 + 2\pi Bs + (2\pi f_c)^2} \quad (7)$$

Onde f_c representa a frequência central de rejeição e B a largura de banda.

Simulação no ATPDraw

Com base no que foi dito anteriormente, o circuito simulado no ATPDraw foi configurado com parâmetros representativos de sistemas reais, incluindo o gerador DFIG de 2MW, 690V com características elétricas específicas: resistência do estator (R_s) de $0,0027\Omega$, resistência do rotor (R_r) de $0,0022\Omega$, indutância de magnetização (L_m) de $0,00366$ H/pu sem saturação, indutância de dispersão ($L_{ls} = 7,95 \times 10^{-5}$ H/pu, $L_{lr} = 14,6 \times 10^{-5}$ H/pu). Além disso, o sistema operou com escorregamento inicial de $-10,85\%$ e frequência nominal de 50Hz.

Para análise foram aplicados métodos de transformação de referencial das componentes, viabilizando o estudo separado das correntes de sequência positiva e negativa. Isso possibilitou a modelagem detalhada das condições de desequilíbrio de tensão no sistema. Controladores específicos para o DFIG foram implementados visando o controle da corrente do rotor, essenciais para a operação sob condições não ideais. Além disso, a simulação incluiu o uso de filtros notch para capturar a frequência dupla de oscilação das correntes do rotor. Ainda, a configuração adotada permitiu investigar os efeitos dos afundamentos no DFIG, avaliando aspectos como a resposta dinâmica e o desempenho dos controladores em uma simulação com parâmetros realistas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio das simulações do sistema DFIG sob condições de desequilíbrio de tensão no estator, destacando a resposta do sistema de controle de corrente do rotor. A atuação do controle PI desacoplado para as componentes de sequência negativa e positiva é mostrada por meio da evolução temporal das correntes e das tensões de referência.

Desempenho do controle de corrente

A Figura 3 mostra a operação das correntes do rotor antes e depois da atuação dos controladores PI. Observa-se que, após a entrada em operação do controle, as oscilações de dupla frequência, característica do desequilíbrio do rotor, são gradualmente atenuadas; isso está associado à presença de componentes de sequência negativa. Assim, com a ação do controle, as correntes começam a se estabilizar por volta de 4,5s a 5s, indicando que o sistema alcançou um novo equilíbrio dinâmico. Esse fator demonstra que o controlador PI é eficaz na rejeição de perturbações de sequência negativa.

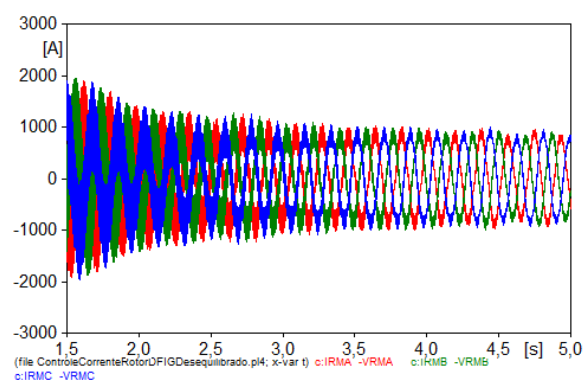


Figura 3. Correntes do rotor antes e depois da atuação dos controladores PI.

A resposta do sistema para o rastreamento das correntes de sequência negativa de referência pode ser observada por meio da análise da Figura 4. Onde nota-se que o tempo de resposta é satisfatório, o que mostra o bom dimensionamento dos ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i) dos controladores PI aplicados. A atuação eficiente do controle pode ser vista não apenas na rapidez da resposta, como também na capacidade do sistema em atuar de forma desacoplada sobre as componentes da corrente no referencial dq^- pode ser percebida, principalmente pela diferença na dinâmica de resposta entre os eixos, o que confirma o benefício do controle vetorial empregado.

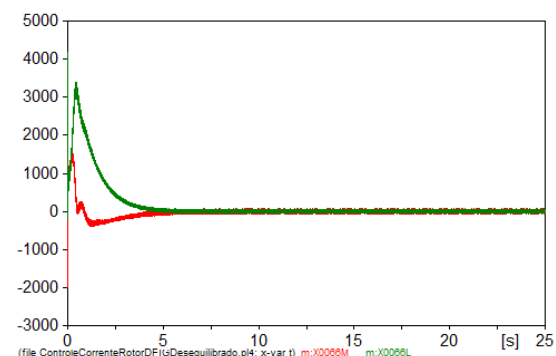


Figura 4. Tempo de rastreamento das correntes de sequência negativa.

Condições de operação do estator

Por meio da análise da Figura 5, observa-se que a tensão do estator trifásico é caracterizada por um desequilíbrio entre as fases, com valores de pico de 300V, 391V e 391V, correspondente aos ângulos de 0°, -120° e 120°, respectivamente. Esse desequilíbrio da condição ideal de simetria entre as fases caracteriza uma situação de desequilíbrio de tensão na rede, o que leva à aparição de componentes de sequência negativa nas correntes do rotor, induzindo oscilações indesejadas. Tal comportamento justifica a necessidade da estratégia de controle adotada, voltada para a mitigação dos efeitos da sequência negativa.

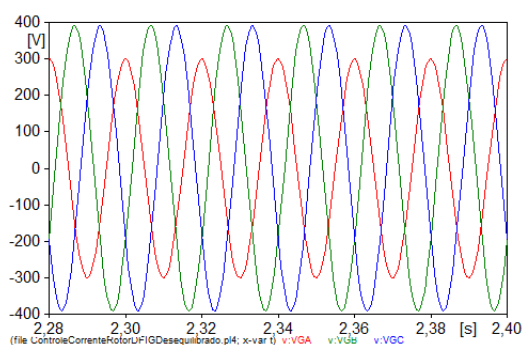


Figura 5. Tensão de alimentação do estator.

Aplicações de tensões de sequência negativa

Na figura 6 são apresentadas as tensões de referência geradas para a técnica de SPWM – Modulação por Largura de Pulso Senoidal – obtidas a partir da aplicação da transformada inversa $dq \rightarrow abc$. Essas tensões de referência representam a base para geração dos sinais modulados que controlam o inversor conectado ao rotor do DFIG. É possível observar que o sistema, por meio de sua estratégia de controle, gera propositalmente componentes de sequência negativa nas tensões de referência, com o objetivo de compensar e anular os efeitos causados por essas mesmas componentes nas correntes do rotor. Esse comportamento valida o princípio de que a injeção controlada de tensões de sequência negativa no rotor é uma técnica eficaz para promover o balanceamento das correntes do rotor do sistema.

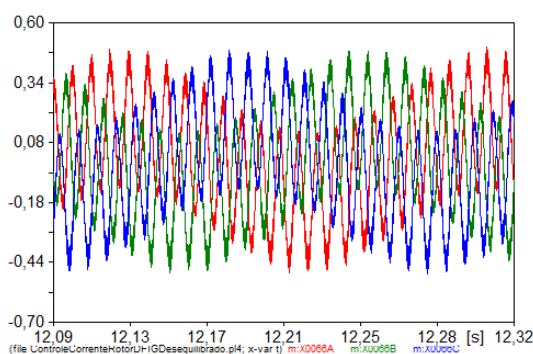


Figura 6. Tensões de referência geradas pelo SPWM.

Estabilização da tensão do barramento CC

Por fim, a Figura 7 apresenta a tensão do barramento CC, que é mantida em 1800V ao longo do período analisado. Essa estabilidade é fundamental para o funcionamento correto do inversor e para a eficiência geral do sistema. O controle do rotor desempenha um papel crucial ao contribuir para o equilíbrio energético do sistema, sob condições de operação supersíncronas, com escorregamento negativo de -10,85%, conforme adotado na simulação. A manutenção dessa tensão do barramento em níveis constantes indica que o sistema é capaz de controlar o fluxo de potência de forma eficaz, garantindo a estabilidade dinâmica e a robustez do gerador DFIG mesmo em condições adversas.

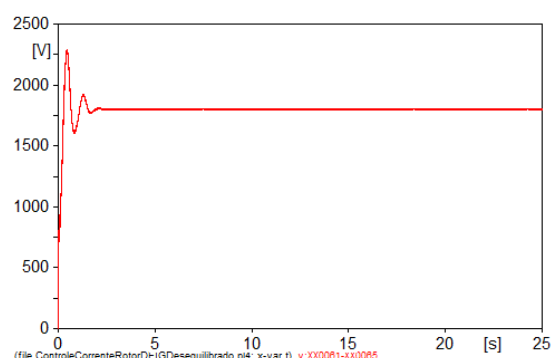


Figura 7. Tensão do barramento CC.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma análise detalhada da operação e controle da corrente do rotor em um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) operando sob condições de desequilíbrio de tensões do estator. A partir da aplicação das transformadas vetoriais abc/dq^+ e abc/dq^- , foi possível implementar uma estratégia de controle vetorial desacoplada, que permite atuar de forma independente sobre as componentes de sequência positiva e negativa das correntes do rotor. Essa abordagem proporcionou maior precisão na compensação dos efeitos provocados pelas assimetrias na rede elétrica.

Através da aplicação da transformada inversa $dq \rightarrow abc$, foram geradas tensões de referência utilizadas no algoritmo SPWM, possibilitando que o conversor injetasse tensões de sequência negativa no rotor, as quais compensam as componentes indesejáveis decorrentes do desequilíbrio da rede. Os resultados obtidos evidenciaram a eficácia do controle proposto, demonstrada pela atenuação das oscilações de dupla frequência típicas das condições de desequilíbrio, bem como pela estabilização das correntes do rotor em torno de 5 segundos após a aplicação do controle.

Além disso, o sistema se mostrou capaz de ter a tensão do barramento CC em níveis estáveis e



adequados (1800V) durante a operação em modo supersíncrono, com escorregamento negativo, reforçando a robustez e a estabilidade do esquema de controle adotado.

Para continuidade e aprimoramento da pesquisa, recomenda-se a integração de controladores adaptativos ou ressonantes, que possam ser sintonizados em tempo real com base na frequência da rede, visando a melhorar a resposta do sistema diante de variações rápidas e transitórias de tensão. Além disso, sugere-se a incorporação de algoritmos preditivos baseados em modelos, que podem otimizar a atuação do conversor frente a distúrbios e flutuações da rede.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa, que foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus agradecimentos ao meu orientador, o qual contribuiu para o desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BARROS, C. M. V. et al. Controle de Corrente e Tensão em Turbinas Eólicas com DFIG. In: Transmission and Distribution Conference and Exposition Latim America. P. 9-12. 2010.
- BORGES, Fernando Tondin. Filtro Notch digital para 60 Hz: projeto, simulação e montagem. 2018. 35f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2018.
- DANTAS, Joacillo Luz. Contribuições para o estudo do DFIG diante de afundamentos desbalanceados: detecção e LVRT. 2017.
- ELTAMALY, Ali M.; AL-SAUD, M. S.; ABO-KHALIL, Ahmed G. Dynamic controlo f a DFIG wind power generation system to mitigate unbalanced grid voltage. IEEE acces, v. 8, p. 39091-39103, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- LIU, Huakun et al. Mitigation of SSR by embedding subsynchronous notch filters into DFIG converter controllers. IET **Geration, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 11, p. 2888-2896, 2017.
- OLIVEIRA, Ítalo André Cavalcanti de et al. Sistemas de geração eólica baseado no gerador de indução de rotor bobinado alimentado por tensões desequilibradas. 2017.

RIBEIRO ARAÚJO, Luciano. Analise do comportamento do dfig em uma rede elétrica diante de afundamento de tensão e falhas internas utilizando técnicas de controle pi e lqi. 2019.

SCHMIDLIN JR, Celso R. et al. Modelo Simplificado para as Sequências Positiva e Negativa do Sistema de Conversão Eólico-Elétrico Baseado em Gerador de Indução Duplamente Alimentado. Eletrônica de Potência, v. 23, n. 2, p. 171-181. 2018.

TEODORESCU, R., Liserre, M., & Rodríguez, p. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Wiley. Capítulo 6 e 10. 2011.