ESTUDO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA SUJEITO A AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Nuno Adolfo Figueiredo[1]
Vandilberto Pereira Pinto[2]

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada do impacto de afundamentos de tensão em sistemas de conversão de energia eólica. São explorados os mecanismos pelos quais esses eventos afetam o desempenho dos aerogeradores, bem como as estratégias de proteção e mitigação disponíveis. Adicionalmente, o trabalho discute as tecnologias mais recentes e as tendências futuras para garantir a robustez e a confiabilidade dos sistemas eólicos frente a distúrbios na rede elétrica durante afundamentos de tensão. Neste trabalho, foi analizado um sistema de conversão de energia eólica equipado com geradores de indução duplamente alimentados (GIDA) ou Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) quando submetido a afundamentos de tensão no ponto de conexão comum (PCC) com a rede elétrica, serão também abordadas as estratégias de proteção e as tecnologias disponíveis para mitigar esses eventos. Para a validação da teoria proposta foi realizada a partir da simulação de modelos desenvolvidos usando a ferramenta de simulação no domínio do tempo MATLAB-SIMULINK, com um exemplo de um parque eólico de 9MW usando um modelo detalhado de um gerador de indução alimentado por doubly-fed (DFIG) acionado por uma turbina eólica.

Palavras-chave: Afundamentos; Conversão; Distúrbios; Turbina Eólica.

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Auroras, Discente, nunoadolfo16@gmail.com[1]
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Auroras, Docente, vandilberto@unilab.br[2]

ISSN: 2447-6161

INTRODUÇÃO

A energia eólica tem se consolidado como uma fonte de energia limpa e renovável cada vez mais relevante no cenário energético global. No entanto, a interação de sistemas eólicos com a rede elétrica pode ser afetada por diversos fatores, como variações na demanda e distúrbios na rede, que podem levar a eventos como afundamentos de tensão. Dentro do estudo sobre qualidade de energia podemos encontrar fenômenos definidos como "Variação de tensão de curta duração (VTCD)", no qual relaciona também os afundamentos de tensão. As VTCD's estão presentes no nosso cotidiano, quando a intensidade luminosa oscila (hoje nem tanto porque temos lâmpadas fluorescentes que aguentam até certo nível de variação), quando o nobreak (no caso de computadores) apita o tempo todo, só para citar alguns exemplos. Afundamentos de tensão (Voltage Sag) são reduções rápidas e significativas na amplitude da tensão da rede elétrica, que podem causar instabilidade e danos aos equipamentos conectados.

Gerador de Indução Duplamente Alimentado

O Gerador de Indução de Duplamente Alimentado (GIDA), DFIG - Doubly Fed Induction Generator (do inglês), tem essa denominação, pois ocorre uma alimentação da tensão no rotor e no estator. Isso permite que o DFIG seja utilizado em aplicações de velocidade variável, operando em uma ampla faixa de velocidades, o que lhe garante uma maior resposta frente a afundamentos de tensão.

A configuração dos conversores em "back-to-back", ou seja, CA-CC-CA, opera da seguinte forma: o conversor ligado à rede impõe uma frequência na saída do DFIG igual a da rede elétrica (60Hz no caso do Brasil) e também controla a tensão da conexão CC para que ela se mantenha constante. Já o conversor ligado ao rotor bobinado opera com diferentes frequências conforme a velocidade do aerogerador, de modo que consiga controlar o torque do DFIG e o fator de potência nos terminais do estator. Também nessa configuração back-to-back existe um capacitor na conexão CC que funciona como reserva de energia para que o ripple de tensão seja pequeno.

Os conversores estáticos atuais são compostos por chaves IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), permitindo operação nos quatro quadrantes, o que lhe da algumas vantagens, como por exemplo, controle de fator de potência a um custo mais baixo, já que o sistema opera basicamente como uma máquina síncrona, e controle desacoplado das potências ativa e reativa do gerador.

Uma importante consequência desse controle bi-direcional de potências é a possibilidade de operação sub-síncrona e sobre-síncrona. Além disso, dependendo da técnica de controle adotada é possível garantir sempre o máximo fornecimento de potência ativa à rede, otimizando o processo de geração. No entanto, uma sensibilidade muito grande do modelo do DFIG é com relação a curtos-circuitos no sistema, pois além do estator estar diretamente conectado à rede, deixando assim o sistema mais vulnerável, também existe a preocupação em proteger os conversores, que são bem sensíveis a faltas. Recentemente, esse problema tem sido resolvido com uma técnica de proteção chamada "crow-bar", que é um dispositivo de proteção que curto-circuita os enrolamentos do rotor do DFIG em caso de falhas, como curto-circuito ou sobrecorrente. Essa ação dissipa rapidamente a energia armazenada no rotor, evitando danos ao conversor de frequência e ao sistema elétrico.

Capacidade de operar frente a afundamentos de tensão

ISSN: 2447-6161

O Brasil experimentou um enorme crescimento de capacidade instalada de energia eólica, figurando hoje o 6° lugar no ranking mundial de Capacidade Total Instalada de Energia Eólica Onshore com 30,45 GW (ABEEólica, 2024). Quando se tem um crescimento dessa magnitude em termos de capacidade instalada, essa fonte passa a ser representativa na matriz energética, tornando assim cada vez mais diverso. Com a relevância dessa fonte na matriz energética, surgem também um conjunto de regulações que possam garantir a qualidade e confiabilidade que a mesma deve ter para atender alguns requisitos que definirão se a mesma fonte pode ou não se conectar ao sistema de transmissão. Antigamente, quando a fonte eólica não era tão relevante na matriz energética, qualquer que fosse o distúrbio que houvesse na rede como: descarga atmosférica mais severa ou até mesmo a queda de uma linha, os parques eólicos normalmente se desconectavam com a finalidade de proteger suas instalações internas sem para isso causar grandes instabilidades na rede. Hoje em dia, com a fonte eólica representando quase 13% da matriz elétrica, a desconexão da mesma ja causa um impacto que pode afetar fortemente a matriz como um todo, por conta disso, foram estabelecidos os limites e alguns parâmetros de qualidade e confiabilidade que um parque eólico deve seguir, para se conectar ao sistema de transmissão.

O submódulo 2.10 – ONS que trata sobre os requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão, estabelece que o parque eólico tenha que atuar numa faixa de frequência de (56,0Hz – 66,0Hz) e num regime de tensão de (0,90 p.u – 1,10 p.u) sem atuação dos relês de subfrequência ou sobrefrequência instantâneos, deve ainda ser capaz de atuar com fator de potência 0,95 – Capacitivo ou Indutivo e também deve ter suportabilidade a determinadas condições de Afundamentos de tensão (que é o nosso foco). A curva que segue, descreve resumidamente as condições de operação do parque eólico.

Impactos dos Afundamentos de Tensão em Sistemas Eólicos

Os afundamentos de tensão podem provocar uma série de problemas em sistemas eólicos, tais como:

• **Desconexão da Rede:** Muitas vezes, os sistemas de proteção dos aerogeradores são configurados para desconectar a máquina da rede em caso de afundamentos de tensão profundos ou prolongados, a fim de evitar danos aos equipamentos.

• **Danos em Componentes Eletrônicos:** Os componentes eletrônicos dos conversores de potência podem ser danificados por sobretensões ou subtensões causadas pelos afundamentos de tensão.

• **Desaceleração da Turbina:** A redução na tensão da rede pode levar à desaceleração da turbina e à perda de produção de energia.

• **Instabilidade da Rede:** A desconexão em massa de aerogeradores durante um afundamento de tensão pode contribuir para a instabilidade da rede elétrica.

METODOLOGIA

ISSN: 2447-6161

A pesquisa teve como principal método, revisões bibliográficas, simulações computacionais e montagem de um protótipo para teste e validação dos parâmetros estudados, porém, não estando ainda completamente terminado, não foi possível ainda desenvolver o protótipo para a parte experimental.

Simulações: Foram realizadas simulações no software Matlab-Simulink para analisar o comportamento de sistemas eólicos sujeitos a diferentes cenários de afundamentos de tensão, foram simuladas várias condições, mas para este artigo apresentaremos as condições sem afundamento e com afundamento de 50% para efeitos de comparação. Os modelos utilizados consideraram as características dos aerogeradores, dos conversores de potência e da rede elétrica.

Análise de Dados: Dados reais de afundamentos de tensão serão posteriormente utilizados para validar os modelos de simulação e avaliar a eficácia das estratégias de proteção e mitigação propostas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 apresenta o comportamento da tensão nas fases a, b e c no barramento de 25 KV (na linha de tranamissão) sob diferentes condições, ou seja, na figura 3a observa-se que o comportamento da tensão sem distúrbio (afundamento) não possui grandes alterações, possuindo assim um valor que varia de -1pu a 1pu, sem causar alterações ao longo de um tempo de observação (simulação) que durou 1 segundo. Na figura 3b quando aplicado um afundamento de 50% (por um tempo que foi de 0,03s à 0,13s) ao modelo, observou-se um afundamento de 50% (0,5 pu) durante 0,10 segundos conforme a figura, tendo voltado ao seu nível original instantâneamente após cessar o afundamento.

A figura 4 apresenta o comportamento da potência ativa de saída do gerador sob diferentes condições, ou seja, na figura 4a observa-se que o comportamento da potência sem distúrbio (afundamento) é normal, no caso do nosso modelo que tem uma potência de 9 MW, nota-se uma leve variação que se pode considerar muito pequena e que ainda assim está dentro da potência nominal do gerador. Na figura 4b quando aplicado um afundamento de 50% (por um tempo que foi de 0,03s à 0,13s) ao modelo, observou-se uma redução brusca de potência que foi instantaneamente para aproximadamente 5 MW e durante o afundamento que durou 0,10 segundos subiu para aproximadamente 6 MW, após o término do afundamento teve uma subida brusca de potência, tendo atingido um pico de aproximadamente 13 MW e até 1 segundo (tempo de simulação) o valor de potência permaneceu instável.

A figura 5 apresenta o comportamento da potência reativa de saída do gerador sob diferentes condições, que é necessária para manter a tensão e corrente em fase. Os DFIGs podem gerar (figua 5b, com afundamento de 50%) ou absorver (figura 5ª, sem afundamento) energia reativa de acordo com as necessidades do sistema elétrico. A otimização da energia reativa é crucial para melhorar a estabilidade da rede e reduzir as perdas.
Com os resultados da simulação pode se concluir que no mundo real, essas variações afetam em muito as cargas que estarão conectadas no ponto de conexão comum, dependendo também da sensibilidade de cada uma, visto que tem se usado cada vez mais cargas com equipamentos eletrônicos integrado, e estas por sua vez tornam determinados equipamentos mais sensíveis.

Como forma de mitigar ou até mesmo minimizar os problemas causados pelos afundamentos de tensão, pode-se destacar algumas tecnpologias disponíveis atualmente como: Conversores de Potência Baseados em IGBTs

ISSN: 2447-6161

(Transistores Bipolares de Porta Isolada) por estes oferecerem alta eficiência e capacidade de resposta, permitindo a implementação de estratégias de controle avançadas para mitigação de afundamentos de tensão, Filtros Ativos que podem ser utilizados para melhorar a qualidade da energia elétrica na rede, compensando harmônicos e flutuações de tensão e os Sistemas de Compensação de Reativos Estáticos (SVC) que podem ser utilizados para regular a tensão da rede e melhorar a estabilidade do sistema.

CONCLUSÕES

Os afundamentos de tensão representam um desafio significativo para a operação de sistemas eólicos. A adoção de estratégias de proteção e mitigação, combinada com o desenvolvimento de tecnologias avançadas, é fundamental para garantir a confiabilidade e a eficiência dos sistemas eólicos e sua integração segura na rede elétrica. Com o aumento da automação nos mais distintos processos e o uso de componentes eletrônicos, os equipamentos vão ficando cada vez mais sensíveis às flutuações no fornecimento de energia, com isso se faz necessário cada vez mais que a qualidade de energia entregue ao consumidor seja o mais estável possível, além disso podemos ainda destacar o aumento das energias renováveis que vão aumentando não só a quantidade em termos de capacidade de geração, mas também vão cada vez mais se tornando cada vez mais presentes no sistema interligado nacional, além de ter uma evolução notável no uso de novas tecnologias, que garantem a estes uma melhor qualidade de geração de energia, adequação às normas estabelecidas e uma melhor confiabilidade na geração de energia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo fólego de vida, aos meus pais por me terem criado com muito amor e me terem ensinado valores inestimáveis como respeito, humildade e honestidade. Gostaria de agradecer também à Funcap pelo fomento à bolsa de iniciação científica, que graças a ela consegui um aprendizado mais direcionado sobre a energia eólica e fenomenos que ocorrem como afundamento, agradecer a professora Ada Amélia Sanders por ter descoberto esse potencial em mim e me ter sugerido e incentivado a participar da pesquisa, ao PGERC pela acolhida no laboratório de pesquisa, bem como me ter fornecido ferramentas e auxílio necessário para o andamento e concretização da pesquisa. Finalmente agradecer ao professor orientador, Vandilberto Pereira Pinto por estar me orientando durante um ano, agradecer pela paciência, e confiança mesmo quando as coisas não saiam como esperado.

REFERÊNCIAS

ABEEólica. Relatório Global de Energia Eólica 2024. 16 abr. 2024. Disponível em: https://abeeolica.org.br/brasil-permanece-em-6o-lugar-no-ranking-mundial-de-energia-eolica/. Acesso em 29 Ago. 2024.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. O vento. In: CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.p 17-39.

COSTA, J.P. Contribuição ao estudo do Gerador de Inducão Duplamente Alimentado: operacão durante distúrbios na rede elétrica. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica,

ISSN: 2447-6161

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.
CUSTÓDIO, R. D. S. Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.
FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. Energia Eólica. Barueri, SP: Manole, 2011.
FONSECA, Hannah Maria Véras Caldeira da. ESTUDO DA MODELAGEM DE UM AEROGERADOR DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO. 2015. 87p. Monografia (Projeto de Graduação - Engenharia Elétrica) – UFRJ/Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro,Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/33330/3/TCC - FONTES RENOV%C3%81VEIS DE ENERGIA - Rev12.pdf. Acesso em: 30 Ago. 2024.
GONÇALVES, Márcio Mateus. Implementação de Estratégias Passivas para Aumento da Suportabilidade de Aerogeradores DFIG. 2019. 54f. Monografia (Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/33330/3/TCC - FONTES RENOV%C3%81VEIS DE ENERGIA - Rev12.pdf. Acesso em: 28 Ago. 2024.
JÚNIOR, S. T. Da Silva. Estudo da máquina de indução duplamente alimentada como gerador eólico. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Faculdade UnB Gama – FGA, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.
KOZAK, P. Effects of unsteady aerodynamics on vertical-axis wind turbine performance. 2014. Dissertação (Mestrado) — Illinois Institute of Technology, 2014.
LOPEZ, Ricardo Aldabó. Qualidade de energia: efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções. São Paulo, SP: Artliber editora Ltda, 2013.
LIMA, F.K. de Araújo. Aerogerador baseado em maquina de indução duplamente alimentada - suportabilidade para afundamento de tensao. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.
LOPEZ, R. A. Energia Eólica. Artliber Editora, 2. ed. São Paulo, 2012.
MACEDO, Wilson Negrão. Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica. Belém (PA). Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Campus Universitário do Guamá. Universidade Federal do Pará - UFPA. fev. 2002.
MASTERS, G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. In: MASTERS, G. M. Wind Power Systems. 1. ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2004. Cap. 6, p. 306-323. ISBN 0-471-28060-7.
OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.10: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo 2.10-RQ_2023.10.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.
PINTO, Milton de Oliveira. O vento. In: PINTO, Milton de Oliveira. Fundamentos da Energia Eólica. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
PINTO, M. Fundamentos de Energia Eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
PINTO, Milton de Oliveira. O vento. In: PINTO, Milton de Oliveira. Fundamentos da energia eólica. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. p. 47-66.
TALAIA, M. A. R; FERNANDES, R. Diagnóstico de vento de uma região usando uma carta meteorológica de superfície. Anais do I Congresso Internacional de Riscos. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2009. p. 63-68.

ISSN: 2447-6161