Controle de tensão em sistemas de distribuição com tensões desbalanceadas utilizando unidades eólicas de geração

Bruna Neres Ferreira de Jesus
brunaj@alunos.utfpr.edu.br
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil.

Ricardo Vasques de Oliveira
vasques@utfpr.edu.br
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

RESUMO

O sistema de distribuição de energia elétrica comporta cargas que podem ser desigualmente distribuídas, o que faz com que as correntes que circulam pelo sistema provoquem diferentes quedas de tensão ao longo deste, resultando em desequilíbrio de tensão. Para garantir a qualidade da distribuição de energia, a ANEEL define procedimentos que devem ser seguidos de forma a garantir níveis baixos de desequilíbrio de tensão no sistema. Este trabalho propõe a utilização de unidades eólicas como forma complementar para compensação de desequilíbrio de tensão, aliada aos tradicionais dispositivos reguladores de tensão. Para isso, propõe-se por meio de análise da curva Q-V da barra de interesse, em que é inserida a unidade eólica, um método para a compensação do desequilíbrio entre as fases do sistema. Os resultados obtidos demonstram a capacidade da unidade eólica em compensar o desequilíbrio ao longo do sistema e ainda contribuir para melhora de seu perfil de tensão.

PALAVRAS-CHAVE: Geração Eólica. Controle de Tensão. Sistema Desequilibrado.

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas elétricos de potência, os desequilíbrios de tensão ocorrem com maior intensidade e frequência nos sistemas de distribuição de energia, devido à distribuição desigual das cargas em cada fase no sistema trifásico. Essa distribuição desigual faz com que as correntes que circulam pelo sistema sejam diferentes, o que causa diferentes quedas de tensão nas fases do sistema, resultando em desequilíbrio de tensão (TEODORO, 2005). Em sistemas de distribuição cuja carga não varia com grande frequência e amplitude, os dispositivos reguladores de tensão tradicionalmente utilizados em sistemas de distribuição são capazes de controlar a tensão dentro dos níveis de qualidade estipulados (LIU, *et al.*, 2015), (FIORIN, 2014).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) os procedimentos de qualidade da energia elétrica. O PRODIST estabelece que a tensão contratada nos pontos de conexão com tensão nominal de operação inferior a 69 kV e superior a 1 kV deve situar-se entre 93% e 105% da tensão nominal de operação do sistema, e que o desequilíbrio de tensão não deve ser superior a 2%. O desequilíbrio de tensão é um fenômeno que se caracteriza pela diferença de amplitude entre as três fases de um sistema trifásico, ou ainda pela diferença da defasagem angular das tensões do sistema. Podendo ser definido como a razão entre a tensão de sequência negativa e tensão de sequência positiva no ponto de interesse do sistema (DE ENERGIA ELÉTRICA, 2013).

Para o controle local dos níveis de tensão nos sistemas de distribuição utiliza-se de dispositivos que se baseiam na alteração da relação de transformação, como o regulador série e o transformador com comutação de *tap* com carga - OLTC, que alteram os níveis de tensão a jusante de seu ponto de inserção no sistema. Também se utiliza dispositivos com suporte de potência reativa, capazes de alterar os níveis da tensão do sistema tanto à montante quanto à jusante de seu ponto de inserção, como bancos de capacitores e geradores elétricos com capacidade de geração de potência reativa, como os geradores eólicos (LIU, *et al.*, 2015), (FIORIN, 2014). No caso dos geradores eólicos, estes possuem diferentes malhas de controle independentes e permitem que o controle da geração de potência reativa possa ser feito por fase, de forma independente, diferente dos geradores síncronos convencionais. A ideia básica da compensação de potência reativa a partir de geradores eólicos é consumir potência reativa quando a tensão em seus terminais estiver acima do limite determinado, e fornecer potência reativa quando a tensão em seus terminais estiver abaixo do limite determinado (SALIH; CHEN, 2016), (DRANKA, 2014).

Baseado neste contexto, este trabalho propõe uma análise da capacidade de usinas eólicas em compensar o desequilíbrio da magnitude da tensão do sistema a partir da injeção de potência reativa desequilibrada para diferentes condições de vento, considerando uma rede trifásica em desequilíbrio. Avalia-se também a contribuição da geração eólica para a melhoria do perfil de tensão do sistema.

2 METODOLOGIA

Nesta seção apresenta-se conceitos e técnicas utilizados no desenvolvimento deste trabalho, incluindo o sistema trifásico desbalanceado escolhido para o estudo, as principais características de unidades eólicas e o

método de análise da sensibilidade da variação de tensão em função da potência reativa injetada em um dado nó do sistema.

2.1 SISTEMA TESTE

O sistema utilizado neste estudo é o *IEEE* 34 *Node Test Feeder*, um sistema de 34 barras com cargas desequilibradas e tensão nominal de 24,9 kV. É um sistema longo e levemente carregado que contém dois reguladores de tensão do tipo série e um transformador. Para realização do estudo inseriu-se uma unidade eólica na barra 830. A unidade eólica inserida no sistema de 34 barras tem capacidade instalada de 1500 kVA e tensão de 690 V, com transformador de potência para adequação ao nível de tensão do sistema de distribuição. O estudo deste sistema é feito por meio de uma análise estática de fluxo de potência trifásico.

2.2 ANÁLISE ESTÁTICA

Nesse trabalho, a análise estática para regulação de tensão baseia-se em estudos de fluxo de potência trifásico, em que é possível determinar curvas Q-V das barras de interesse de um sistema. Para determinar estas curvas é necessário rodar diversas vezes o fluxo de potência, variando no barramento de interesse a potência reativa e mantendo a potência ativa constante, obtém-se então o comportamento da barra pela curva Q-V, que demonstra a relação entre a potência reativa e tensão na barra de interesse no sistema (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Esta curva permite que se avalie o comportamento da tensão para diversos pontos de operação do sistema. Utiliza-se deste método pois a magnitude da tensão está predominantemente relacionada com a potência reativa injetada, dessa forma, se apresenta como um recurso amplamente utilizado nos estudos de sistemas energéticos (FIORIN, 2014), (SILVA, 2015).

Com a análise da curva Q-V obtida é possível determinar com que taxa a tensão varia em função da injeção de potência reativa na barra de interesse. A partir dessa taxa tem-se a quantidade de potência reativa a ser injetada de forma a se obter um determinado nível de tensão no barramento de interesse. No estudo proposto, utiliza-se desta técnica de análise estática para realizar o controle de tensão e equilibrar as tensões no sistema de interesse (SILVA, 2015), (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

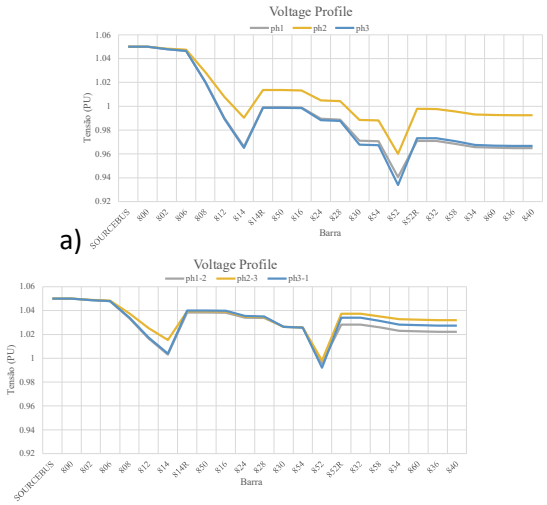
Utilizando o software OpenDSS para a análise de fluxo de potência do sistema desequilibrado adotado, obteve-se o perfil da tensão da Figura 1a. Para melhor exibição dos resultados em figuras, são mostradas as tensões das principais barras do sistema apenas. Observa-se que as fases do sistema estão em desequilíbrio.

A partir da curva Q-V da barra 830, determinou-se que a resposta da barra à variação de potência reativa é aproximadamente linear, sendo necessário em média 371 kVar para variar em 1 kV a tensão em cada fase da barra. Utilizando desta análise para definir o valor de potência reativa a ser injetada no sistema

pela unidade eólica, implementou-se um script no *software* MatLab, em que é calculado o menor valor de potência reativa a ser injetada no sistema, considerando os três cenários possíveis de compensação do desequilíbrio: no primeiro caso, considera-se a tensão da fase 1 como a tensão de referência, e calcula-se a potência reativa necessária a ser injetada pelas duas outras fases para atingir o equilíbrio, os outros casos seguem da mesma forma, com a mudança da tensão de referência para fase 2 e 3.

Considerando a velocidade do vento igual a 10 m/s, a unidade eólica injetou no sistema de distribuição 1000 kW de potência ativa distribuída igualmente nas três fases, 31,5 kVar capacitivos na fase a, 20 kVar capacitivos na fase 2 e 128 kVar reativos na fase 3. A Figura 1b mostra as tensões nas barras do sistema após a compensação feita pela unidade eólica, sendo possível observar que a potência reativa injetada foi capaz de mitigar significativamente o desequilíbrio de tensão.

Figura 1 – Perfil de tensão do sistema: a) antes da compensação da unidade eólica b) depois da compensação da unidade eólica.



a) b)

Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando o índice de desequilíbrio das barras deste sistema observou-se uma redução de praticamente todo o desequilíbrio na barra em que a unidade eólica foi inserida e redução significativa do índice nas outras barras. Considerando que após a inserção da unidade eólica não houve troca de *taps* dos reguladores do sistema em nenhum dos casos, é possível minimizar a atuação dos reguladores de tensão tradicionais e ainda assim regular a tensão do sistema e mantê-la dentro dos níveis apropriados.

3 CONCLUSÕES

Considerando a crescente utilização de sistemas eólicos na geração de energia, é necessário que as formas de controle se aprimorem e se adaptem no mesmo ritmo, de forma a manter a confiabilidade do sistema elétrico e melhorar a qualidade da energia elétrica fornecida.

Com a utilização da geração eólica no sistema de distribuição estudado, a injeção de potência ativa no sistema proporcionou uma melhora no perfil da tensão nas barras, contribuindo com a geração de energia elétrica no sistema. Além disso, o controle da tensão por compensação de potência reativa, utilizando

a curva Q-V como método de análise, se mostrou funcional, contribuindo com significativa melhora nos índices de desequilíbrio de tensão, sendo útil por evitar que os reguladores de tensão na rede necessitassem alternar *taps* para corrigir os níveis de tensão. A integração de unidades eólicas no sistema de controle em sistemas de distribuição pode desempenhar um papel importante na manutenção dos dispositivos já instalados, bem como auxiliar nesta transição em que as cargas e própria geração apresentam comportamento cada vez mais dinâmico, e as formas de controle precisam ser revistas e melhoradas.

Voltage control of unbalanced distribution systems with wind generation units

ABSTRACT

The electric power distribution system has loads that can be unequally distributed along the network, which causes different voltage drops in the different phases of the system, resulting a voltage imbalance. To guarantee the quality of the electrical energy, ANEEL defines procedures in order to guarantee low levels of voltage imbalance in the system. This work proposes the use of wind units as a complementary form for voltage imbalance compensation, taking into account also the traditional devices for voltage regulation. A method for compensation of the voltage imbalance between the phases of the system, based on the analysis of the curve Q-V of the bus of interest, is proposed in this work. The obtained results have demonstrated the capacity of the wind unit to compensate the voltage imbalance throughout the system and contribute to the improvement of its voltage profile.

KEYWORDS: Wind Generation. Voltage Control. Unbalanced System.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa concedida para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

DE ENERGIA ELÉTRICA, Procedimentos D. D. N. S. E. N. M. 8. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2013. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/modulo-8 >. Acesso 24 ago. 2017.

DRANKA, G. G. **Uso da Geração Eólica Associada a Sistemas de Armazenamento de Energia para Operação Ilhada de sistemas Eólicos.** 2014. 139p.[s.n.]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

FIORIN, Marcos. **Estratégias de controle coordenado de tensão para sistemas de distribuição com geração eólica**. 2014.[s.n.]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

KUNDUR, Prabha; BALU, Neal J.; LAUBY, Mark G. **Power system stability and control**. New York: McGraw-hill, 1994.

LIU, Guodong et al. Optimal voltage regulation for unbalanced distribution networks considering distributed energy resources. **IEEE. Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE**, p. 1-5, 2015. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/document/7286473/>. Acesso em: 24 ago. 2017.

PES, IEEE. **Distribution System Analysis Subcommittee's Distribution Test Feeder Working Group**. Disponível em: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>. Acesso em: 24 ago. 2017.

SALIH, Shemsedin N.; CHEN, Peiyuan. On coordinated control of OLTC and reactive power compensation for voltage regulation in distribution systems with wind power. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, p. 4026-4035, 2016. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/document/7332982/>. Acesso em: 24 ago. 2017.

SILVA, João V. Estudo da Estabilidade de Tensão em Redes de Distribuição com Geração Distribuída, p. 89, 2015.

TEODORO, Ricardo G. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. 2005.[s.n.]. Ilha Solteira, 2005.

Recebido: 31 ago. 2017.
Aprovado: 02 out. 2017.
Como citar:
NERES, B. et al. Controle de tensão em sistemas de distribuição com tensões desbalanceadas utilizando unidades eólicas de geração. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22 out. 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2017/index. Acesso em: XXX.
Correspondência:
Bruna Neres Ferreira de Jesus
Avenida Tupi, número 1822, Bairro Centro, Pato Branco, Paraná, Brasil.
Direito autoral:
Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.